

Quantenphysik und Realität

Gehen Sie den Dingen gerne auf den Grund? Dann können Sie in etwa vier Lektionen anhand eines populärwissenschaftlichen Texts einen Einblick in eine aktuelle, wissenschaftliche Fragestellung gewinnen: Wie sind die Konzepte der Quantentheorie zu interpretieren? Nochmals soviel Zeit brauchen Sie, wenn Sie die Diskussion anhand einiger Originaltexte vertiefen wollen.

	Mr. Tompkins übernimmt die Einleitung	A2.1
	Zum Begriffspaar: Formalismus und Konzept	A2.3
	Lernziele für Additum 2	A2.4
	Arbeitsanweisung	A2.5
A2.1	Auszüge aus "Der Geist im Atom"	A2.6
A2.2	Die Quantentheorie und ihre Wirklichkeiten	A2.23
A2.3	Fünf Originaltexte	A2.27
	Lernkontrollen	A2.41
	Antworten zu den Lernkontrollen	A2.43

Mr. Tompkins übernimmt die Einleitung

Der kleine Bankbeamte C. G. H. Tompkins ist der Held einer ganz unmathematischen Einführung in die moderne Physik: "Mr. Tompkins seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos". Tompkins' geistiger Vater ist *George Gamow*, ein äusserst vielseitiger, unkonventioneller Physiker russischer Herkunft. Wie in Kapitel 3 erwähnt, konnte er den Alpha-Zerfall mit dem Tunneleffekt beschreiben. In Gamows Klassiker der populärwissenschaftlichen Literatur erklärt "Der Professor" die Geheimnisse von Mikro- und Makrokosmos Mr. Tompkins anhand drastischer Beispiele. Doch beim Tunneleffekt wird es dem Schüler zu bunt:

"Wenn dem so ist, gehe ich nie wieder in einen Zoo!" sagte Mr. Tompkins entschlossen. Seine lebhaft Phantasie gaukelte ihm bereits schreckliche Bilder von Löwen und Tigern vor, die durch die Stäbe ihrer Käfige "hindurchsickerten".

Er fragt daraufhin den Professor, wie lange er warten müsse, bis ein richtiges Auto durch die Wand der Garage "hindurchsickere". Nach einer kurzen Kopfrechnung versichert ihn dieser, es würde ziemlich lang - an die 1'000'000'000'000'000 Jahre - sein. Beruhigt macht Tompkins weiter und lernt alles Wesentliche über die Naturkonstante in der Initiale seines dritten Vornamens. Er durchstreift mit dem Professor einen Urwald, in dem h rund 10^{34} mal vergrössert ist, ein verschwommener Tiger zugleich von allen Seiten angreift und eine einzelne Gazelle, die einen Palmenhain (Mehrfachspalt) durchstreift, als dressierte Herde erscheint...

Erstaunt es Sie, dass vierzig Jahre später einige Ergänzungen nötig wurden, als man Gamows Erzählung neu herausgab? Roman U. Sexl, theoretischer Physiker und Autor von populärwissenschaftlichen Werken und Schulbüchern hat sie unter der Rubrik "Was der Professor noch nicht wusste" hinzugefügt. Im folgenden Text spricht er in humorvoller Weise eine ernsthafte Warnung hinsichtlich der Interpretation der Quantentheorie aus:

Wie unverfänglich waren doch die relativistischen Träumereien von Mr. Tompkins gewesen. Wie gefährlich ist es dagegen, sich im Quantenschungel mit seinen Elephanten, Tigern und Quantenmoskitos zu verirren! Vielleicht durchdringen zwar Autos Wände, doch etwas seltener als der Professor im Kopf berechnete. Meine Überlegungen lassen erwarten, dass ein derartiges Ereignis nur alle $10 \text{ hoch } 10^{40}$ Jahre auftreten würde. Wenn Sie öfter durch Wände fahren, sollten Sie diesen Effekt vielleicht doch nicht auf die Quantentheorie, sondern auf Ihre Fahrweise zurückführen.

Gefährlicher als Quantenmoskitos und Tiger sind aber vielleicht Begegnungen mit Physikern und Philosophen, die debattierend im Quantenschungel herumstreunen. Dürfen wir sie etwas belauschen?



Eine Herde verschwommen aussehender Tiger griff den Elephanten an

"Wie der Professor richtig sagte", meinte ein grauhaariger Herr, der noch an den berühmten Diskussionen in Kopenhagen teilgenommen hatte, "entsteht die Unschärfe dadurch, dass wir die Quantensysteme durch unsere Beobachtungen stören. Um uns im Quantenschungel zu orientieren, beschossen wir alles mit Lichtatomen und verschmieren dadurch die Wellenpakete." "Und wenn wir nicht beobachten?", fragte sein Gesprächspartner, der fast über eine verschmierte Wurzel gestolpert wäre. "Gibt es die Wellenpakete dann nicht?" Der grauhaarige

Herr schüttelte den Kopf: "Physik muss sich auf Beobachtungen beschränken! Es ist sinnlos zu fragen, was die Tiere des Quantendschungels tun, wenn wir sie nicht beobachten." (...)

Leider wurden nach diesen Worten die Wellenpakete der beiden Widersacher so diffus, dass Mr. Tompkins ihren Streit nicht weiter verfolgen konnte. Nur wirre Geräusche drangen an sein Ohr. Statistische Deutung, Kopenhagener Deutung, Universen, die sich bei jeder Messung spalten, interferierten so lange miteinander, bis Mr. Tompkins gar nichts mehr verstand, die streitenden Deuter der Quantentheorie sich selber überliess und sich lieber neuen Träumen zuwandte. (Gamow / Sexl 79)

Zum Begriffspaar: Formalismus und Konzept

Die Einleitung zeigte Ihnen, dass um die Auslegung der Quantentheorie noch gestritten wird. Dabei geht es nicht um die mathematische Analyse von Experimenten, sondern um die Bedeutung der Symbole. In der philosophischen Interpretationsdebatte sind deshalb Formalismus und Konzept auseinanderzuhalten:

- Der **Formalismus** erlaubt mit Hilfe von mathematischen Symbolen und Rechenvorschriften experimentell zugängliche Sachverhalte zu beschreiben. Zentral sind dabei die Wahrscheinlichkeitswellen (Siehe Kapitel 3.2) mit dem Symbol ψ . Von den atomaren Spektren über die chemische Bindung bis zur Laserdiode im CD-Player kann alles mit ihnen perfekt berechnet werden. (Beispiele: siehe Additum 1) Der als *Quantenmechanik* bezeichnete Formalismus wird heute aufgrund seines Erfolges von niemandem ernsthaft in Frage gestellt.
- Mathematische Symbole aber stehen vorerst nur auf dem Papier! Da die Physik bekanntlich - wenigstens im Idealfall - das Sein erklären will, fehlt also noch die Verbindung zwischen dem Formalismus und der Wirklichkeit, bzw. dem, was dann als Wirklichkeit bezeichnet wird. Diese Verbindung wird durch eine Menge von Regeln hergestellt, die die Symbole und Rechenvorschriften den Elementen und Prozessen der Wirklichkeit zuweisen. Es braucht Regeln, die sagen, was der Formalismus "in Wirklichkeit bedeutet". Diese Interpretationsregeln bilden zusammen das **Konzept** der Quantentheorie.

Zur Erläuterung sei hier ein Beispiel aus der Kinematik angegeben: Ein Teil des Formalismus ist die Formel $v = \Delta s / \Delta t$. Was bedeutet sie in Wirklichkeit? Nun, Δs ist die Wegstrecke zwischen einem Anfangspunkt A und einem Endpunkt E. Ein Beobachter steht bei A und schaut auf die Uhr, wenn ein Auto vorbeifährt. Ein zweiter Beobachter steht bei E und blickt ebenfalls auf die Uhr, wenn das Auto bei ihm ankommt. Die Zeitdifferenz ist Δt , wenn die beiden Uhren gleich gehen. Sowohl die räumliche Entfernung zwischen A und E als auch das Verstreichen der Zeit betrachten wir als etwas Wirkliches. Das Auto war bei A und später bei E: also ist auch die Bewegung wirklich und v ist ein Mass dafür. Bei dieser Interpretation sind wir davon ausgegangen, dass die Wirklichkeit (Erde, Auto, Uhren ...) als äussere Wirklichkeit existiert und gemessen werden kann, so wie sie ist. Es finden sich aber auch Gegner eines solchen Konzeptes.

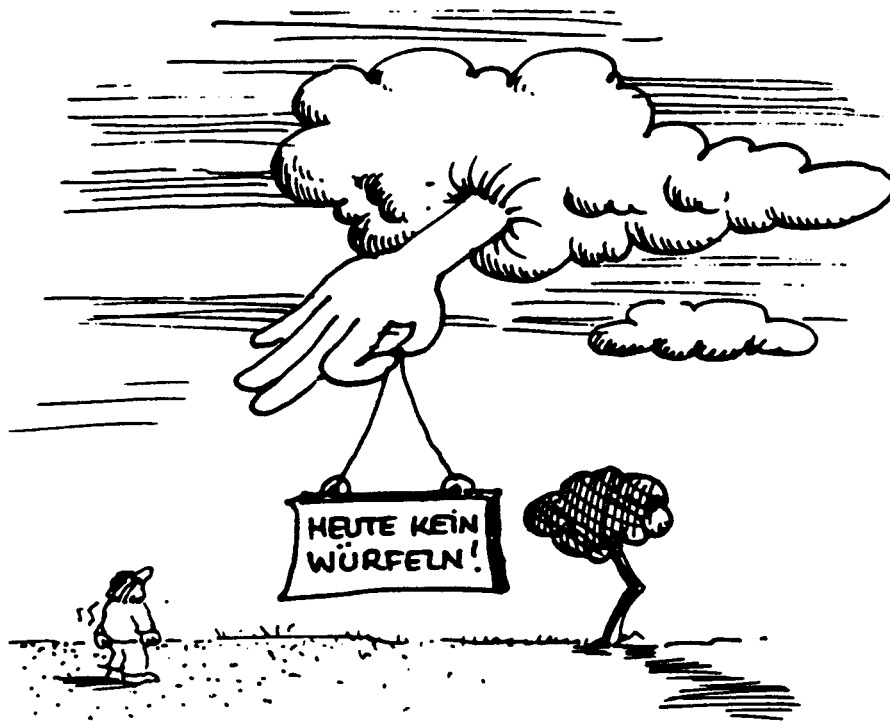
Tatsache ist nun, dass die **Interpretationsregeln** - und damit das erkenntnistheoretische Fundament aller so erfolgreichen Arbeiten auf dem Gebiet der Quantenphysik - **bis heute umstritten** sind. Verschiedene theoretische Konzepte wurden bei der Entstehung der Quantenmechanik intensiv diskutiert. Max Born und besonders Niels Bohr in Kopenhagen zusammen mit seinem Schüler Werner Heisenberg schienen ende der Zwanzigerjahre sämtliche Widersprüche beseitigt zu haben. Zwar liessen sich de Broglie, Schrödinger und Einstein von dieser sogenannten "*Kopenhagener Interpretation der Quantentheorie*" nicht überzeugen. Aber ihre Einwände gerieten in Vergessenheit und schienen auch angesichts der Erfolge des Formalismus bedeutungslos. Doch das dünne Eis über dem naturphilosophischen Abgrund brach fünfzig

Jahre später wieder auf: Eine wichtige Rolle spielte ein Satz des berühmten Mathematikers John von Neumann, der zeigte, dass die Quantenmechanik mathematisch vollständige Theorie sei. In von Neumanns Beweis zur Vollständigkeit der Quantenmechanik wurde eine Schwachstelle aufgedeckt.

Bis in die Gegenwart nimmt die Reihe der Publikationen zu den grundlegenden Fragen kein Ende. Dabei wird philosophiert, gerechnet und auch gemessen. Sie haben also die Nase im frischen Wind!

Lernziele für Additum 2

- Sie wissen, dass die Interpretation der Quantentheorie eine wissenschaftlich offene Frage ist. Sie können zwei verschiedene Positionen durch Stichworte charakterisieren.
- Sie können die Gedankenexperimente von Einstein-Podolski-Rosen und Schrödinger einem Mitschüler/einer Mitschülerin erläutern, der/die den Hauptteil des Leitprogramms erfolgreich durchgearbeitet hat.
- Von den verschiedenen Realexperimenten, die mit Licht, Elektronen oder Neutronen durchgeführt worden sind, kennen Sie zwei besonders gut. Sie sind in der Lage, deren Zusammenhang mit der Diskussion um die Interpretation der Quantenphysik Ihrem Philosophielehrer respektive Ihrer Philosophielehrerin zu erklären.



Veranschaulichung von Einsteins umstrittener Aussage: "Gott würfelt nicht."

(Die Comics sind dem Buch "Die Deutungen der Quantentheorie" (Baumann 84) entnommen.)

Arbeitsanweisung

Additum 2 enthält als Grundgerüst und Leitfaden umfangreiche Ausschnitte aus dem in der deutschen Übersetzung vergriffenen, populärwissenschaftlichen Werk "Der Geist im Atom" (mit Erlaubnis von Cambridge University Press; Davies 88). Die Rechte der deutschen Übersetzung bleiben jedoch bei Birkhäuser, Basel-Boston-Berlin.

Wenn Sie sich entschliessen, "nur" die grundsätzlichen Überlegungen kennenzulernen, genügt es, diesen Text 2.1 sorgfältig durchzuarbeiten. Studieren Sie danach den Teil "*Die Quantentheorie und ihre Wirklichkeiten*". Dort wird versucht, mit ständigem Rückgriff auf den gelesenen populärwissenschaftlichen Text die wichtigsten Interpretationsströmungen der Quantentheorie pointiert darzustellen. Beim Beantworten der Kontrollfragen erhalten Sie nochmals Gelegenheit das eigentlich Paradoxe der Quantentheorie gedanklich erfassen. Für die Lektüre, für das Zurücklehnen und Nachdenken, für die Beantwortung der Kontrollfragen benötigen Sie etwa drei Lektionen. Die Kontrollfragen und Lösungen finden Sie ganz am Schluss des Additums 2.

Wenn Sie die Thematik tiefer verstehen möchten, wenn Sie also neben der "Pflichtkür" auch noch die "freie Kür" absolvieren wollen, dann stehen Ihnen dafür ergänzende Originaltexte zur Verfügung. Sie stammen von berühmten Physikern wie Einstein und Heisenberg und sind dem Buch "Die Deutungen der Quantentheorie" (Baumann 84) entnommen. Diese nicht mehr jungen Gedankengänge sind aber noch aktuell: Realexperimente aus den letzten paar Jahren, die im Band "Wieviele Leben hat Schrödingers Katze?" (Audretsch 90) beschrieben sind, belegen es Ihnen. Um die Originaltexte inhaltlich richtig in das Grundgerüst einordnen zu können, ist am Rand jeweils vermerkt, wo der Originaltext ansetzt. Sie finden die Originaltexte unter A 2.3 hinzugefügt. Für ihre Lektüre müssen Sie wohl nochmals drei Lektionen plus die entsprechende Hausarbeit investieren. In 2.2 werden einige wichtige Begriffe geklärt.

Sollten Sie am Schluss des Leitprogramms trotz intensiver Arbeit den Eindruck haben, Ihr Verständnis für die Probleme sei nicht präzise genug, können Sie sich direkt in "Die Debatte um die Quantentheorie" (Selleri 83) stürzen. Dieses - angesichts der schwierigen Thematik - recht gut lesbare Buch und andere stehen in der Handbibliothek bereit ...

Symbole

Damit es Ihnen trotz der vielen Bäume jederzeit klar ist, in welchem Teil des Waldes Sie sich befinden, sind einige neue Symbole angebracht:

Originaltext

An dieser Stelle des populärwissenschaftlichen Texts setzt die Zusatzarbeit mit dem Originaltext an.



Hurra: Ein modernes Experiment zur Überprüfung der Theorie!



Lehnen Sie sich zurück und lassen Sie das Gelesene Revue passieren. Halten Sie bitte in Stichworten auf drei Zeilen fest, was Ihnen am Wichtigsten erscheint.

A 2.1 Auszüge aus "Der Geist im Atom" von P. C. W. Davies und J. R. Brown

(Davies 88; © Deutsch: Birkhäuser Basel, © English: Cambridge University Press)

Wellen oder Teilchen ?

Der Geist im Atom p. 15:

Das Merkwürdige an den Quanten zeigt sich sogleich daran, daß ein Photon wellenähnliche als auch teilchenähnliche Eigenschaften aufweisen kann. Photonen können gebeugt werden und Interferenzmuster bilden, was ein sicherer Beweis für ihre Wellennatur ist. Andererseits bewirken Photonen einen photoelektrischen Effekt, indem sie wie bei einer Schießbude aus Metallen Elektronen herausschlagen. Das deutet mehr auf die Teilchennatur des Lichts hin. ~~Nur~~ ^{Die} ~~Ver~~ ^{Ver} ~~ein~~ ^{Ver} ~~einander~~ ^{ein} von Wellen- und Teilcheneigenschaften führt schnell zu einigen überraschenden Einsichten in die Natur. Ein bekanntes Beispiel: Nehmen wir an, daß ein Strahl polarisierten Lichts auf ein Stück polarisierendes Material trifft (Abb. 2).

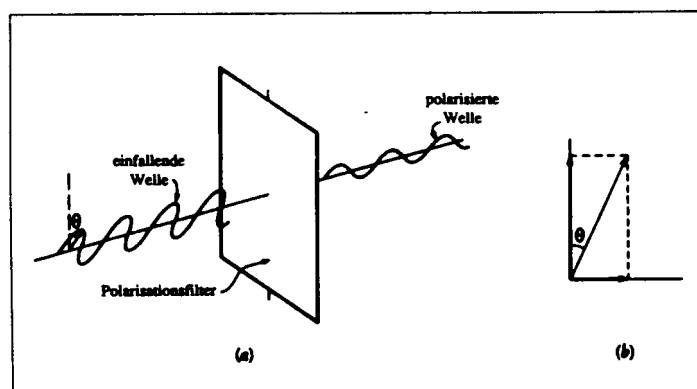


Abb.2: Die Ungleichheit der Voraussage. (a) Nach dem klassischen Bild durchdringt das polarisierte Licht den Polarisator mit um $\cos^2\theta$ reduzierter Intensität und pflanzt sich polarisiert fort. Faßt man das Photon als einen Strom identischer Photonen auf, so kann es nur unter der Annahme erklärt werden, daß auf nicht voraussagbare Weise einige Photonen passieren können und andere blockiert werden, und zwar mit Wahrscheinlichkeiten von $\cos^2\theta$ bzw. $\sin^2\theta$. (b) Eine einfallende Lichtwelle kann auch als Lagerung von und polarisierten Wellen aufgefaßt werden.

Nach der ~~klassischen~~ ^{theorie} des Elektromagnetismus kann sich das Licht ungehindert ausbreiten, wenn die Polarisationsebene des Lichts und des Schirms parallelausgerichtet sind. Stehen sie jedoch senkrecht zueinander, wird kein Licht durchgelassen. Bei allen Winkeln dazwischen wird das Licht teilweise durchgelassen; bei einem Winkel von 45° zum Beispiel hat das durchgelassene Licht genau die halbe Intensität des ursprünglichen Lichtstrahls, wie der Versuch bestätigt.

Wenn die Intensität des einfallenden Lichts so reduziert ist, daß immer nur ein Photon zur Zeit durch den Polarisator hindurch kann, stoßen wir auf

etwas sehr Merkwürdiges. Da ein Photon nicht geteilt werden kann, muß jedes Photon entweder passieren können oder aufgehalten werden. Beim Winkel von 45° müssen etwa die Hälfte der Photonen durchkommen, während die andere Hälfte blockiert wird. Aber welche Photonen kommen durch und welche nicht? Da wir annehmen müssen, daß alle Photonen gleicher Energie identisch und deshalb nicht zu unterscheiden sind, müssen wir schließen, daß der Durchlaß ausschließlich dem Zufall überlassen ist. Obwohl die Chancen durchzukommen jedes beliebige Photon 50:50 stehen (eine Wahrscheinlichkeit von $1/2$), läßt sich unmöglich voraussagen, welchen Photonen es gelingen wird. Feststehen nur die Erfolgchancen. Je nachdem, wie man den Winkel verändert, kann die Wahrscheinlichkeit von null bis eins reichen.

Diese ~~Schl~~folgerung daraus ist zugleich faszinierend und verwirrend. Vor der Entdeckung der Quantenphysik hielt man die Welt für vollkommen voraussagbar, wenigstens im Prinzip. Insbesondere erwartete man, daß Versuche zu identischen Ergebnissen führen. Im Fall der Photonen und des Polarisationsfilters konnten jedoch zwei identische Experimente durchaus zu verschiedenen Ergebnissen führen, wenn das eine Photon den Polarisator passiert, während ein anderes, identisches Photon blockiert wird. Im Grunde ist die Welt offenbar doch nicht ganz voraussagbar. Wir können über das Schicksal eines Photons im allgemeinen erst etwas aussagen, wenn wir es beobachtet haben.

Diese ~~Ges~~ankengänge beinhalten, daß in der Mikrowelt der Photonen, Elektronen, Atome und anderer Teilchen ein Element der Ungewißheit herrscht. 1927 hat Heisenberg dieser Ungewißheit durch seine berühmten Unbestimmtheitsrelationen einen zahlenmäßigen Ausdruck gegeben. Eine Aussage dieses Prinzips gilt dem Versuch, gleichzeitig Ort und Bewegung eines Quants zu messen. Genauer: Wollen wir den Ort eines Elektrons ~~best~~agen wir, sehr genau - feststellen, so müssen wir auf die Kenntnis seines Impulses verzichten. Können wir umgekehrt den Impuls eines Elektrons genau messen, so wird sein Ort unbestimmt. Schon der Versuch, ein Elektron auf einen bestimmten Ort festzulegen, verursacht eine unkontrollierbare und unbestimmbare Störung seiner Bewegung, und umgekehrt. Und schließlich ist diese unvermeidliche Beschränkung unseres Wissens über Ort und Bewegung des Elektrons nicht lediglich eine Folge unserer unzulänglichen Meßtechnik, sondern wohnt der Natur inne. Offenbar hat das Elektron einfach *nicht* gleichzeitig einen Ort und einen Impuls.

Originaltext 1

Werner Heisenberg (1927): Über den anschaulichen Inhalt der quantenmechanischen Kinematik und Mechanik

Der Geist im Atom p. 17:

Daraus ergibt sich, daß der ~~Mikrowelt~~ere Unbestimmtheit eigen ist, die immer dann zutage tritt, wenn wir zwei unvereinbare, beobachtbare Größen wie Ort und Impuls zu messen versuchen. Diese Unbestimmtheit zerstört unter anderem auch unsere intuitive Vorstellung, daß sich ein Elektron (oder ein Photon, oder was auch immer) im Raum einem bestimmten Weg oder einer besonderen Flugbahn entlang bewegt. Damit ein Teilchen einer wohldefinierten Bahn folgen kann, muß es in jedem Augenblick einen Ort (einen Punkt auf der Bahn) und eine Bewegung (einen zur Bahn tangentialen Vektor) haben. Ein Quantenteilchen kann jedoch nicht beides zugleich haben.

Im ~~glichen~~ Leben halten wir es für selbstverständlich, daß eine Kugel oder ein Planet durch strenge Gesetze von Ursache und Wirkung auf einer genau definierten geometrischen Bahn im Raum in ihr Ziel gelenkt oder auf ihrer Orbitalbahn gehalten werden. Trifft die Kugel ins Ziel, so besteht für uns kein Zweifel daran, daß ihr Aufschlagsort den Endpunkt einer durchgehenden Kurve

darstellt, die im Gewehrlauf beginnt. Nicht so bei Elektronen. Wir können zwar einen Ausgangspunkt und einen Endpunkt erkennen, aber wir können daraus nicht einfach schließen, daß beide durch eine bestimmte Bahn verbunden waren.

Diese Unbestimmtheit macht sich am deutlichsten am berühmten Doppelspalt-Experiment von Thomas Young bemerkbar (Abb. 3).

Dabei fällt ein Strahl von Photonen oder Elektronen von einer kleinen Lichtquelle auf einen mit zwei kleinen Spalten versehenen Schirm. Auf einem zweiten Schirm erzeugt der Strahl ein Abbild der Spalten. Das Bild besteht aus einem deutlichen Muster heller und dunkler, da die Wellen nach ihrem Durchgang durch den einen Spalt auf die Wellen treffen, die durch den anderen Spalt kommen. Wo die Wellen im Gleichtakt aufeinandertreffen, entsteht eine Verstärkung, wo sie sich im Gegenrhythmus befinden, heben sie sich gegenseitig auf. Damit ist die wellenähnliche Natur des Photons oder Elektrons eindeutig erwiesen.

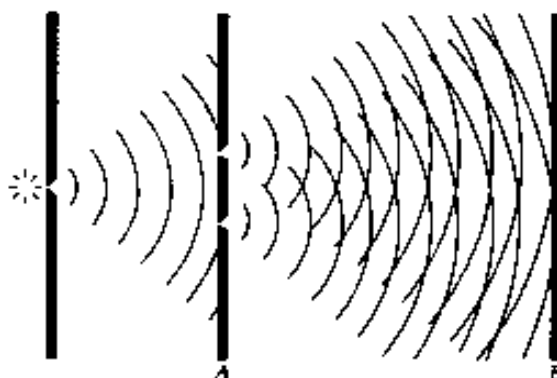


Abb. 3: Wellen oder Teilchen? In diesem Doppelspalt-Experiment strömen Elektronen oder Photonen von einer Lichtquelle durch zwei schmale Öffnungen im Schirm A und breiten sich aus, bis sie auf Schirm B treffen, wo die Rate ihres Auftreffens gemessen wird. Dabei läßt sich ein Muster wechselnder Intensität beobachten, das ein Interferenzphänomen zwischen Wellen darstellt.

Der Strahl kann aber auch als aus Teilchen bestehend angesehen werden. Nehmen wir an, die Intensität ist wieder so abgeschwächt, daß jeweils nur ein Photon oder Elektron die Apparatur durchqueren kann. Jedes Photon trifft natürlich an einem bestimmten Punkt des Bildschirms auf und kann als kleiner Lichtblitz registriert werden. Andere Teilchen treffen an anderen Orten auf und verursachen dort einen Lichtblitz. Der Effekt scheint zunächst ganz willkürlich aufzutreten. Aber schließlich entsteht ein gesprenkeltes Muster. Jedes Teilchen wird zu einem besonderen Ort auf dem Bildschirm gelenkt, nicht durch einen Befehl sondern dem entsprechend. Nachdem eine große Zahl von Teilchen die Anordnung passiert hat, ist ein geordnetes Muster entstanden, ein Interferenzmuster. Ein einzelnes Photon oder Elektron erzeugt also noch kein Muster, sondern nur einen einzelnen Punkt. Jedes Photon oder Elektron aber, obwohl anscheinend frei, sich beliebig zu bewegen, bezieht sich auf die anderen, daß ein nach den Regeln der Wahrscheinlichkeit geordnetes Muster entsteht.

Wenn nun eine der beiden Öffnungen geschlossen wird, so ändert sich das durchschnittliche Verhalten der Photonen oder Elektronen ganz auffallend - das Interferenzmuster verschwindet nämlich. Es kann auch nicht durch Überlegen der Filme der bei abwechselnd geöffneten Spalten entstandenen Bilder wiederhergestellt werden. Interferenzmuster entstehen nur, wenn beide Spalten gleichzeitig geöffnet sind. Jedes Photon oder Elektron muß deshalb für

sich allein herausfinden, ob beide Spalten geöffnet oder nur einer. Aber wie ist ihnen das möglich, da sie doch unteilbare Partikel sind? Auf den ersten Blick kann jedes Teilchen nur durch einen Spalt hindurchlaufen. Trotzdem das Teilchen irgendwie über den anderen Spalt Bescheid. Aber wie?

Eine mögliche Antwort ergibt sich daraus, daß Quantenteilchen, wie wir uns erinnern, nicht genau definierten Bahnen im Raum folgen. Es kann zweckdienlich sein, sich vorzustellen, daß jedem Teilchen unendlich viele Bahnen zugeordnet sind, von denen jede sein Verhalten beeinflusst. Diese Bahnen oder Kurven laufen durch beide Öffnungen des Schirms und enthalten verschlüsselte Informationen über sie. Auf diese Weise kann das Teilchen auch über weitere umlichte Entfernungen über die Geschehnisse auf dem Laufenden sein. Die Unbestimmtheit seiner Aktivität ermöglicht ihm, viele verschiedene Bahnen abzutasten.

Nehmen wir an, ein unglücklicher Physiker würde Detektoren vor den beiden Öffnungen anbringen, um im Voraus zu ermitteln, welche Öffnung ein bestimmtes Elektron ansteuert. Könnte dieser Physiker dann nicht, ohne das Elektron, die andere Öffnung schnell verschließen, während das Elektron seine Richtung beibehält? Wenn wir die Situation unter Berücksichtigung der Heisenbergschen Unschärferelation analysieren, stellen wir fest, daß die Natur den schlauen Physiker ausmanövriert. Eine Messung der Elektronen, die so genau ist, daß man ihr entnehmen kann, welche Öffnung ein Elektron ansteuert, stört seine Bewegung dermaßen, daß das Interferenzmuster voller Schadenfreude verschwindet! Allein schon der Versuch herauszufinden, in welche Richtung sich das Elektron bewegt, genügt, daß das Spiel mit den beiden Öffnungen mißlingt. Das des Elektrons über Bahnen zeigt sich nur, wenn wir uns entschließen, seiner Spur nicht zu folgen.

Originaltext 2

Anton Zeilinger (1989): Fundamentale Experimente mit Materiewellen und deren Interpretation

Der Geist im Atom p. 20:

John Wheeler hat auf eine weitere faszinierende Konsequenz der eben erwähnten Dichotomie aufmerksam gemacht. Die Entscheidung, entweder das Experiment zur Bahnbestimmung des Elektrons durchzuführen oder auf dieses Wissen zu verzichten und statt dessen mit einem Interferenzmuster zu experimentieren, kann aufgeschoben werden, bis ein gegebenes Elektron die Versuchsanordnung durchquert hat! In diesem sogenannten () zeigt sich, daß eine Entscheidung, die der Versuchsleiter in diesem Augenblick trifft, seiner Hinsicht einen Einfluß darauf hat, wie sich Quantenteilchen in der Vergangenheit verhalten haben werden, obwohl betont werden muß, daß die allen Quantenprozessen eigene Unvorhersehbarkeit ausschließt, diese Anordnung zu benutzen, um Signale rückwärts in die Zeit zu senden oder irgendwie die Vergangenheit zu .



In Abb. 4 ist das Schema einer Versuchsanordnung dargestellt, die sich zur Durchführung eines ähnlichen Experiments der verzögerten Wahlentscheidung (mit Photonen statt mit Elektronen) eignet.

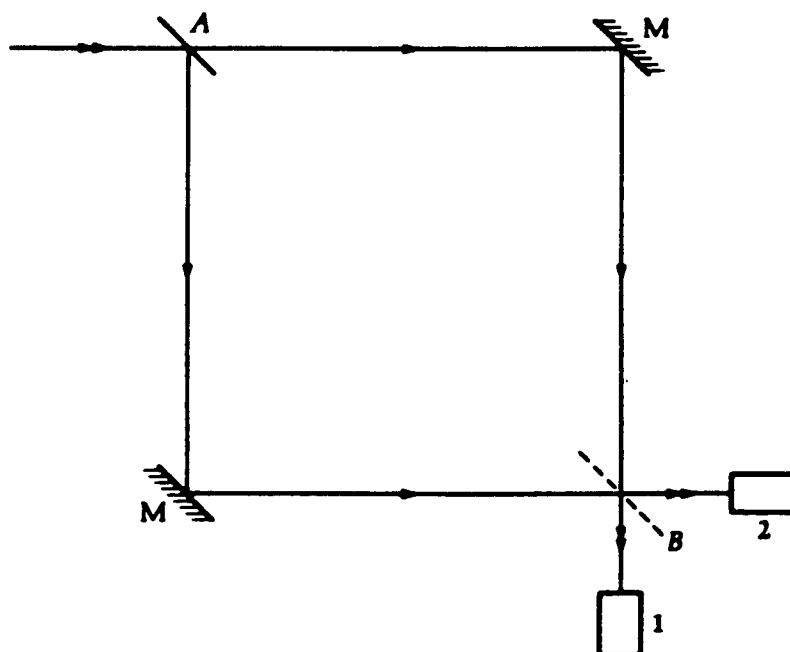


Abb. 4: Schema der Anordnung eines praktischen Versuchs der verzögerten Wahlentscheidung nach Wheeler.

Carroll Alley und seine Mitarbeiter haben vor kurzem auf dieser Basis einen praktischen Versuch an der Universität von Maryland durchgeführt. Bei diesem Versuch trifft Laserlicht auf einen halbversilberten Spiegel (A), wo es sich in zwei Strahlen teilt, analog zu den beiden Bahnen durch die Spalten in dem Experiment von Young. Weitere Reflexionen durch die Spiegel (M) leiten die Strahlen so um, dass sie sich kreuzen und auf die Photonendetektoren (1) bzw. (2) treffen.

Um festzustellen, welchen der beiden möglichen Wege ein gegebenes Photon genommen hat, genügt es in dieser Versuchsanordnung, dass das Photon entweder von dem Detektor (1) oder (2) registriert wird.

Wenn nun an dem Kreuzungspunkt ein zweiter halbversilberter Spiegel zwischengeschaltet wird (siehe Abb. 4), werden die beiden Strahlen wieder vereinigt und fließen teils entlang der Bahn nach (1) und teils entlang der Bahn nach (2). Das führt zu Interferenzerscheinungen, und die Stärke der nach (1) oder (2) fließenden Strahlen wird von der Phasenbeziehung beider Strahlen am Punkt ihrer Wiedervereinigung abhängen. Diese Phasen können durch Einstellen der Bahnlänge variiert werden, wodurch im wesentlichen das Interferenzmuster abgetastet wird. Vor allem kann man die Phasen so einstellen, dass die Stärke des nach (1) fließenden Strahls durch destruktive Interferenz auf null reduziert wird, während 100 % des Lichts nach (2) fließt. Durch diese Anordnung ist das System dem ursprünglichen Experiment von Young analog, bei dem man nicht feststellen kann, welche der beiden Bahnen ein gegebenes Elektron genommen hat. (Locker gesagt, nimmt jedes Photon beide Bahnen.)

Der springende Punkt besteht nun darin, dass man mit der Entscheidung, ob man den zweiten halbversilberten Spiegel dazwischenschalten will oder nicht, solange warten kann, bis ein gegebenes Photon den Kreuzungspunkt beinahe erreicht hat. Ob das Photon die Anordnung auf einer oder auf der anderen Bahn durchquert haben wird, wird erst entschieden, nachdem die Durchquerung stattgefunden hat.



Lehnen Sie sich zurück und lassen Sie das Gelesene Revue passieren. Halten Sie bitte in Stichworten auf drei Zeilen fest, was Ihnen am Wichtigsten erscheint.

Was hat das alles zu bedeuten?

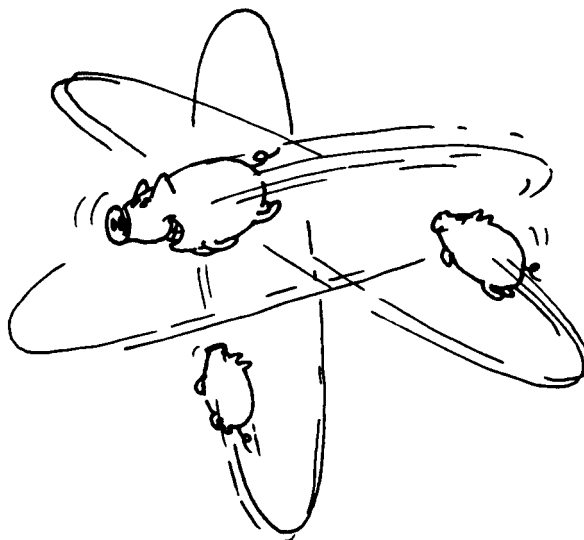
Der Geist im Atom p. 22:

Die Tatsache, daß Elektronen, Photonen und andere Quantenteilchen sich manchmal wie Wellen und manchmal wie Teilchen verhalten, ruft oft die Frage hervor, was sie denn nun ~~seien~~. Die herkömmliche Auffassung zu Fragen dieser Art beruft sich auf die späteren Arbeiten von Bohr, der glaubte, eine in sich geschlossene Interpretation der Quantenmechanik gefunden zu haben. Gewöhnlich spricht man von der Kopenhagener Interpretation, so genannt nach Bohrs physikalischem Institut, das er 1920 in Dänemark gründete.

Nach Bohr ist es sinnlos zu fragen, was ein Elektron ist. Oder anders gesagt, die Physik kann auf diese Frage ~~gar~~ ^{gar} keine Antwort geben. Die Physik, erklärte er, sagt uns nicht was *ist*, sondern was wir ~~ein~~ ^{ein} ~~ander~~ ^{ander} ~~Welcher~~ ^{Welcher} ~~mitteilen~~ ^{mitteilen} können. Wenn ein Physiker einen Versuch zu einem Quantenproblem durchführt und eine genaue technische Beschreibung der Versuchsanordnung gegeben ist, so kann die Physik ~~genaugenommen~~ ^{genaugenommen} eine sinnvolle Voraussage nur darüber machen, was er beobachten und kraft dessen seinen Kollegen in verständlicher Sprache mitteilen wird.

Youngs Experiment zum Beispiel haben wir eine eindeutige Wahl. Wir können entweder die Elektronen oder Photonen unbeachtet lassen und ein Interferenzmuster untersuchen, oder wir können einen flüchtigen Blick auf die Flugbahnen der Teilchen werfen und damit das Interferenzmuster löschen. Die beiden Möglichkeiten stehen nicht im Widerspruch, sondern verhalten sich komplementär zueinander.

Gleicher Weise besteht eine Komplementarität von Ort und Impuls. Wir haben die Wahl, den Ort eines Teilchens zu ermitteln, wobei sein Impuls unbestimmt bleibt, oder wir können den Impuls messen und dafür auf das Wissen über seinen Ort verzichten. Jede Eigenschaft - Ort, Impuls - stellt einen komplementären Aspekt des Quantenteilchens dar.



Max Born in der 20er Jahren in einem Brief an Albert Einstein:
"Die Quanten sind doch eine hoffnungslose Schweinerei."

Bohr entwickelte aus diesen Prinzipien der Komplementarität. Beim Welle/Teilchen-Dualismus zum Beispiel stellen die Wellen- und die Teilcheneigenschaften eines Quants komplementäre Aspekte seines Verhaltens dar. Niemals, so behauptete er, werden diese beiden unterschiedlichen Verhaltensweisen während eines Experiments miteinander in Konflikt geraten. Eine weitreichende Folgerung aus Bohrs Gedanken besteht in der radikalen Wandlung des Verhältnisses von Makro- und Mikrowelt, des Ganzen und seiner Teile. Bevor man verstehen kann, was ein Elektron macht, behauptete Bohr, muß man den ganzen Versuchszusammenhang im einzelnen bestimmen, also angeben, was man messen will, wie die Apparatur aufgebaut usw. Die Quantenrealität der Mikrowelt ist untrennbar mit der Struktur der Makrowelt verbunden. Das Teil hat, mit anderen Worten, für sich allein keine Bedeutung, sondern in Verbindung mit dem Ganzen. Dieser ganzheitliche Charakter der Quantenphysik hat großen Anklang bei den Anhängern stlicher Mystik gefunden, der Philosophie, die in fern stlichen Religionen wie Hinduismus, Buddhismus und Taoismus zum Ausdruck kommt. Und tatsächlich haben viele Physiker, einschließlich Schrödinger, in den ersten Tagen der Quantentheorie sehr schnell Parallelen gezogen zwischen der Quantenvorstellung von Ganzen und seinen Teilen und der traditionellen stlichen Vorstellung der Harmonie und Einheit der Natur.



Lehnen Sie sich zurück und lassen Sie das Gelesene Revue passieren. Halten Sie bitte in Stichworten auf drei Zeilen fest, was Ihnen am Wichtigsten erscheint.

Der Geist im Atom p. 24:

Im Mittelpunkt von Bohrs Philosophie steht der Gedanke, daß Schemenhaftigkeit und Unfaßbarkeit ein wesensmäßiger Ausdruck der Quantenwelt sind und nicht lediglich eine Folge davon, daß wir sie unzureichend wahrnehmen - eine ziemlich hintergründige Perspektive. Natürlich sind uns viele Bereiche bekannt, in denen wir keine Voraussagen machen können: beim Umkippen von Wetterlagen, Aktienmärkten und beim Roulette kennen wir das Gelingen. Und doch sind wir dadurch nicht zu einer radikalen Neubewertung der physikalischen Gesetze gezwungen. Die Unvorhersehbarkeit der meisten Dinge im Alltag können wir nämlich darauf zurückführen, daß wir nicht genug Informationen haben, um ihr Verhalten so detailliert zu berechnen, wie es für eine genaue Voraussage nötig wäre. Beim Roulette begnügen wir uns zum Beispiel mit einer statistischen Beschreibung. Genauso kann das kollektive Verhalten von Myriaden von Molekülen in der klassischen Thermodynamik mit Hilfe der statistischen Mechanik auf der Ebene von Durchschnittswerten erfolgreich beschreiben. Die Abweichungen von berechneten Mittelwerten sind jedoch in diesem Fall keine Unbestimmtheit dem Wesen nach, denn im Prinzip könnte von jedem beteiligten Molekül eine umfassende mechanische Beschreibung gegeben werden (Quanteneffekte in diesem Beispiel einmal ausgenommen).

Lassen wir die Information über einige dynamische Variablen unberücksichtigt, so bekommt unsere Beschreibung des untersuchten Zusammenhanges ein Moment des Ungefühls und Zufälligen. Wir wissen aber, daß diese Ungenauigkeit in Wirklichkeit auf den Einfluß jener Variablen zurückzuführen ist, die wir ja ausklammern wollten. Wir könnten sie nennen. Sie sind immer vorhanden, aber vielleicht sind unsere Beobachtungsmethoden zu ungenau, um sie wahrzunehmen. Die Messung eines Gasdrucks ist beispielsweise zu grob, um auch individuelle Molekülbewegungen festzustellen.

Weshalb können wir die Unbestimmtheit bei Quanten nicht auf eine tiefere Ebene verborgener Variablen zurückführen? Durch eine solche Theorie könnten wir das chaotische, offensichtlich willkürliche Herumgeistern von Quanten-

teilchen als das Wirken eines Substrats ganz und gar festumrissener Kräfte darstellen. Daß wir anscheinend nicht in der Lage sind, gleichzeitig Ort und Impuls eines Elektrons festzustellen, wäre dann der Unzulänglichkeit unserer Instrumente zuzuschreiben, die jene Kräfte eben noch nicht nachweisen können.

Einstein war davon überzeugt, daß es sich um etwas anderes handeln mußte, daß also dem Irrenhaus der Quanten letztlich die vertraute klassische Welt von Ursache und Wirkung zugrundeliegt. Er befaßte sich intensiv mit Gedankenexperimenten, um diese Vermutung zu prüfen. Die scharfsinnigsten beschrieb er in einem Artikel, den er 1935 zusammen mit Boris Podolsky und Nathan Rosen schrieb.

Originaltext 3

Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen (1935): Kann man die quantenmechanische Beschreibung der physikalischen Wirklichkeit als vollständig betrachten?

Das Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)-Experiment

Der Geist im Atom p. 25:

Dieses Gedankenexperiment sollte das zutiefst Seltsame an der quantenmechanischen Beschreibung eines sehr große räumliche Entfernungen ausgedehnten physikalischen Zusammenhangs demonstrieren. Das Experiment fordert uns dazu auf, der Heisenbergschen Unschärferrelation Schnippchen zu schlagen, indem wir heimlich einen unerlaubten Blick auf Ort und Impuls eines Teilchens gleichzeitig werfen. Die Strategie ist, die Messung nicht direkt an dem uns interessierenden Teilchen vorzunehmen, sondern stellvertretend an einem anderen Teilchen, das an dem Vorgang beteiligt ist.

Wir nehmen an, ein einzelnes, stationäres Partikel explodiert in zwei gleiche Teilchen A und B (siehe Abb. 5).



Abb. 5: Zwei Teilchen gleicher Masse fliegen von einem gemeinsamen (ruhenden) Zentrum auseinander, haben gleichen, aber entgegengesetzt gerichteten Impuls und sind beide immer gleich weit vom Zentrum entfernt. Unter diesen Umständen verrät eine Messung des Ortes oder des Impulses von A auch Ort oder Impuls von B.

Nach Heisenbergs Unschärferrelation können wir weder von A noch von B gleichzeitig Ort und Impuls feststellen. Aufgrund des Gesetzes von Aktion und Reaktion (Impulserhaltung) können wir aus einer Messung des Impulses von B auf den Impuls von A schließen. Entsprechend hat A, infolge der Symmetrie, vom Explosionszentrum aus die gleiche Entfernung zurückgelegt wie B, eine Messung des Ortes von B gibt uns also Aufschluß über den Ort von A. Dem Beobachter von B steht es frei, entweder den Ort oder den Impuls von B zu beobachten. In der Folge davon wird er entweder den Ort oder den Impuls von A kennen, ganz wie er sich entschieden hat. Eine nachträgliche Beobachtung des Ortes oder des Impulses von A führt demnach zu *voraussehbaren Ergebnissen*. "Wenn wir, ohne ein System im geringsten zu stören; den Wert einer physikalischen Größe voraussagen können", argumentierte Einstein, "so hat diese physikalische Größe auch eine Entsprechung in der physikalischen Realität". Er folgerte deshalb, daß das Teilchen A in der beschriebenen Situation auch über einen wirklichen Ort oder einen wirklichen Impuls verfügen muß, je nach Wahl des Beobachters von B.

Worum es nun geht, ist folgendes: Wenn A und B eine sehr weite Strecke auseinandergefliegen sind, kann man nicht mehr ohne weiteres davon ausgehen, daß eine an B vorgenommene Messung einen Einfluß auf A hat. Mindestens kann A nicht augenblicklich direkt beeinflusst werden, denn nach der speziellen Relativitätstheorie ist kein Signal und keine Einwirkung schneller als das Licht. Das kann also nicht schneller, daß an B eine Messung vorgenommen wurde, als das Licht die Strecke zwischen beiden zurücklegt. Das kann im Prinzip Milliarden Jahre dauern!

Bohr verwarf Einsteins Überlegungen und verwies wieder auf seine Kopenhagener Deutung, wonach die Eigenschaften von Quantenteilchen im Bereich des Allerkleinsten nur im gesamten makroskopischen Zusammenhang verstanden werden können. In diesem Fall ist ein entferntes Teilchen, das in Wechselbeziehung mit einem anderen steht, an dem eine Messung vorgenommen wird, kein getrennter Teil des Quantensystems. Auch wenn zwischen A und B also kein direktes Signal ausgetauscht oder Einfluß wirksam wird, bedeutet das nach Bohr nicht, daß man die an B durchgeführten Messungen bei der Untersuchung von A außer Acht lassen kann. Auch wenn keine physikalische Kraft zwischen A und B wirksam ist, scheinen sie dennoch wie in geheimer Verabredung ihr Verhalten aufeinander abgestimmt zu haben.

Für Einstein war der Gedanke, daß zwei entfernte Teilchen die Ergebnisse der an ihnen einzeln vorgenommenen Messungen miteinander abstimmen, einfach zu abenteuerlich; sportlich sprach er deshalb von einer . Seiner Vorstellung nach sollte die objektive Realität in jedem Teilchen ihren Ort haben, und eben diese brachte ihn schließlich in Gegensatz zur Quantenmechanik. Was fehlte, war ein experimenteller Beweis, zwischen den Auffassungen von Bohr und Einstein entschied er das Geheimnis jener Kollaboration oder löste. Aber diese Entwicklung ließ noch ein halbes Jahrhundert auf sich warten. (...)



Lehnen Sie sich zurück und lassen Sie das Gelesene Revue passieren. Halten Sie bitte in Stichworten auf drei Zeilen fest, was Ihnen am Wichtigsten erscheint.

Text 4

P. C. W. Davies und J.R. Brown (1988):

Der Geist im Atom - Bells Theorem

Die Natur der Realität

Der Geist im Atom p. 32

Bei dem eben beschriebenen Versuch geht es um sehr viel mehr als um die Klärung irgendeiner technischen Frage zwischen zwei konkurrierenden Theorien über die Welt des Allerkleinsten. Zur Debatte steht unser Bild vom Universum und von der Natur der Realität.

Bis zum Zeitalter der Quantenmechanik gingen die meisten abendländischen Wissenschaftler davon aus, daß der Welt um uns herum eine unabhängige Existenz zukommt; daß sie, mit anderen Worten, aus Gegenständen, wie Tischen, Stühlen, Sternen und Atomen besteht, die vorhanden sind, ob wir sie beobachten oder nicht. Nach dieser Auffassung ist das Universum eine Ansammlung isolierter Gegenstände, die zusammen die Totalität allen Seins darstellen. Natürlich haben wir aber berücksichtigen, daß jede Beobachtung eines Objekts zu einer Wechselwirkung mit diesem führt, daß es also zwangsläufig wird. Diese Situation wird lediglich als eine nebensächliche Irritation seiner Existenz aufgefaßt, die im übrigen

eindeutig bestimmt und wohldefiniert ist. Die mit einer Messung immer verbundene Störung könnte im Prinzip beliebig klein gehalten und in jedem Fall bis ins einzelne berechnet werden, so daß wir nach Beendigung der Messung genau wüßten, wie das beobachtete Objekt beeinflusst worden ist. Liegen die Dinge wirklich so, sollten wir nicht zögern, dem Objekt alle Eigenschaften wie Ort, Impuls, Spin und Ladung zuzuschreiben, sowohl vor als auch nach unserer Beobachtung. Atome und Elektronen wären dann nichts als, die sich von wie Billardkugeln nur im Maßstab unterscheiden. Darüber hinaus gäbe es keinen wesentlichen Unterschied, was ihren Realitätscharakter betrifft.

Die ~~Bild~~ unserer Welt ist deshalb von so zwingender Überzeugungskraft, weil es nahtlos mit unserer alltäglichen Erfahrung der Natur übereinstimmt. Einstein nannte es, weil der Realitätscharakter ~~Gegenstände~~ der Außenwelt nicht von den Beobachtungen eines bewußten Individuums abhängt. (Man vergleiche dies mit den Gegenständen unserer Träume, die Teile einer subjektiven Realität sind.) Aber gerade dieses Alltagsverständnis von der Wirklichkeit attackierte Bohr mit seiner Philosophie der Kopenhagener Interpretation.

Nach Bohrs Auffassung hat es, wie schon erwähnt, keinen Sinn, einem Quantenteilchen, noch bevor eine Messung an ihm vorgenommen worden ist, einen vollständigen Satz von Eigenschaften zuzuschreiben. Denn wir können ja, etwa bei einem Versuch zur Polarisierung von Photonen, einfach nicht sagen, in welchem Polarisationszustand sich ein Photon vor dem Meßvorgang befunden hat. Nach dem Meßvorgang sind wir schon eher zu einer Aussage über einen bestimmten Polarisationszustand des Photons in der Lage. Stehen wir vor der Wahl, Ort oder Impuls eines Teilchens zu messen, können wir vor der Messung ebenfalls keine bestimmte Werte für diese Größen angeben. Entscheiden wir uns, den Ort zu messen, so ist das Ergebnis ein . Messen wir stattdessen den Impuls, so erhalten wir das . Im ersten Fall hat das Teilchen, wenn der Meßvorgang abgeschlossen ist, keinen Impuls, im zweiten Fall hat es keinen Ort.

Diese Überlegungen kann man sich am besten anhand eines einfachen Beispiels (siehe Abb. 8) veranschaulichen.

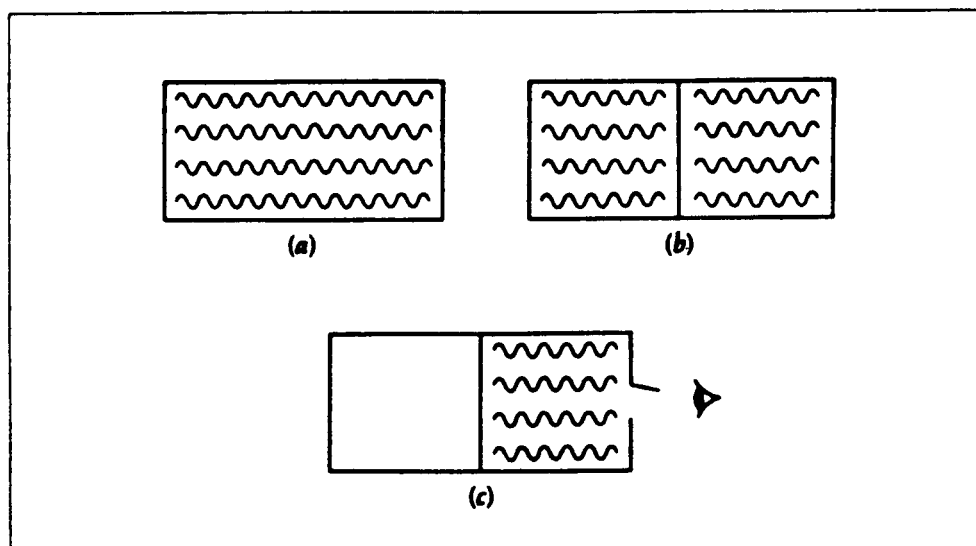


Abb. 8: Kollabieren einer Quantenwelle. (a) Ist ein einzelnes Quantenteilchen in einem Behälter eingeschlossen, so verbreitet sich die mit ihm verbundene Welle gleichmäßig im ganzen Innenraum. (b) Ein zwischengeschalteter Schirm teilt den Behälter in zwei getrennte Kammern. (c) Eine Beobachtung weist die Existenz des Teilchens in der rechten Kammer nach. Augenblicklich verschwindet in der anderen Kammer die Welle, die die Wahrscheinlichkeit verkörperte, das Teilchen dort zu finden.

Stellen wir uns einen Behälter vor, in dem sich ein einzelnes Elektron befindet. Nehmen wir keine Beobachtung vor, so befindet sich das Elektron mit gleicher Wahrscheinlichkeit überall in dem Behälter. Die quantenmechanische Welle, die dem Elektron entspricht, hat sich deshalb gleichmäßig in dem ganzen Behälter ausgebreitet. Stellen wir uns nun einen undurchdringlichen Schirm vor, der so in den Behälter eingeführt wird, daß er ihn in der Mitte in zwei Kammern teilt. Offensichtlich kann sich das Elektron nun entweder in der einen oder in der anderen Kammer befinden. Solange wir jedoch nicht nachsehen, in welcher, wird die Welle weiterhin in beiden Kammern sein. Bei Beobachtung wird zeigen, daß sich das Elektron in einer bestimmten Kammer befindet. Genau in diesem Augenblick verschwindet plötzlich die Welle (nach den Regeln der Quantenmechanik) aus der leeren Kammer, auch wenn diese vollkommen isoliert ist. Es ist als gäbe es vor der Beobachtung zwei nebulöse Geister-Elektronen, die sich in jeweiliger Kammer aufhalten und auf den Moment ihrer Beobachtung warten, die das eine in ein Elektron verwandelt und das andere vollkommen verschwinden läßt.

Dieses Beispiel führt uns auch gut die Nicht-lokalität der Quantenmechanik vor. Nehmen wir an, die beiden Kammern A und B werden getrennt und über eine große Distanz voneinander entfernt (sagen wir ein Lichtjahr). Ein Beobachter untersucht A und entdeckt darin das Teilchen. Augenblicklich verschwindet die Quantenwelle in B, obwohl sie ein Lichtjahr entfernt ist. (Es muß wiederholt werden, daß sich diese Anordnung aufgrund der unvorhersehbaren Natur jeder Beobachtung nicht eignet, Signale schneller als das Licht zu vermitteln.)

Allgemein befindet sich ein Quantensystem in einem Zustand, bei dem sich eine Anzahl (womöglich eine unendliche Zahl) von Quantenzuständen überlagern. Die beiden getrennten Wellenmuster in je einer Kammer, von denen wir soeben sprachen, sind ein einfaches Beispiel für eine solche Überlagerung. Typischer ist das Beispiel von Youngs Doppelspalt-Experiment, bei dem sich Wellen beider Öffnungen tatsächlich berschneiden und es zu Interferenzen kommt.

Schon bei der Diskussion polarisierten Lichts, das durch einen schräg gedrehten Polarisationsfilter fließt, sind wir auf diese Form der Überlagerung gestossen. Einfallendes Licht, dessen Polarisation um 45° gegenüber der Polarisationsrichtung des Filters gedreht ist, können wir uns, wie in Abb. 2 dargestellt, aus zwei gleich starken Wellen zusammengesetzt denken, deren Polarisations Ebenen senkrecht zueinander stehen. Die Welle, die parallel zum Polarisationsfilter schwingt, kann diesen ungehindert durchdringen, die andere wird aufgehalten. Den Quantenzustand eines Photons, dessen Polarisations Ebene in einem 45°-Winkel zum Polarisationsfilter steht, können wir also als eine Überlagerung von zwei - oder Photonen auffassen, eins mit parallel ausgerichteter Polarisations Ebene, das den Polarisationsfilter ungehindert durchdringen kann, das andere mit einer dazu senkrecht stehenden Polarisations Ebene, das infolgedessen blockiert wird. Wird schließlich eine Messung durchgeführt, wird einer dieser beiden zu einem Photon befördert, und das andere verschwindet. Nehmen wir an, der Meßvorgang zeigt uns, daß das Photon den Polarisationsfilter durchdringt. Folglich wird das, dessen Schwingungsebene parallel zum Polarisationsfilter liegt, zum Photon. Wir können jedoch nicht sagen, daß dieses Photon vor dem Meßvorgang existierte. Alles, was wir sagen können, ist, daß das System eine Überlagerung zweier Quantenzustände darstellte, von denen keiner bevorzugt war.



Lehnen Sie sich zurück und lassen Sie das Gelesene Revue passieren. Halten Sie bitte in Stichworten auf drei Zeilen fest, was Ihnen am Wichtigsten erscheint.

Der Geist im Atom p. 35:

Physiker John Wheeler erz hlt gerne eine h bsche Parabel die den eigent mlichen Status eines Quantenteilchens vor einer Messung sehr sch n veranschaulicht. Die Geschichte handelt von einer Spielart des :

"Dann war es an mir, den Raum zu verlassen, damit sich die anderen f nfzehn G ste von Lothar Nordheims Abendgesellschaft im geheimen beraten und auf ein schwieriges Wort einigen konnten. Ich mu ste unglaublich lange drau en bleiben. Als ich endlich wieder hereinkommen durfte, sah ich e lncheln auf jedem Gesicht, das entweder einen Spa s oder eine Art Versch w rung bedeutete. Gleichwohl begann ich mit meinen Versuchen, das Wort zu erraten. Diese Antworten kamen schnell. Dann dauerten die Antworten l nger. Es war seltsam. Alles was ich von meinen Freunden wollte, war ein einfaches Ja oder Nein. Aber der jeweils Befragte gr belte und gr belte, ja oder nein, nein oder ja, bevor er antwortete. Schließlich hatte ich das Gef hl, auf einer hei en Spur zu sein und da s das gesuchte Wort seink nnte. Ich wu ste, da s ich nur einmal raten durfte. Ich wagte es: , war die Antwort, und brä nchen in Gel chter aus. Sie erkl rten mir, da s es gar kein Wort gegeben h tte. Sie hatten sich gema ugt, sich nicht auf ein Wort zu einigen. Jeder, der gefragt wurde, konnte antworten, wie er wollte - er mu ste nur selbst ein Wort im Kopf haben, auf das seine Antwort und alle zuvor gegebenen Antworten zutrafen. H tte ich es darauf ankommen lassen, h tte er andernfalls verloren. Deshalb war diese berraschende Abart des f r meine Mitspieler ebenso schwierig wie f r mich.

Wo liegt die Symbolik dieser Geschichte? Die Welt, von der wir einmal annahmen, da s sie unabh ngig von jeder Beobachtung existiert, das Elektron des Atoms von dem wir einmal glaubten, da s es zu jedem Zeitpunkt einen bestimmten Ort und einen bestimmten Impuls h tte; ich, der ich annahm, es g be ein Wort in dem Raum, als ~~her~~ hereinkam, - in Wirklichkeit entstand dieses Wort Schritt f r Schritt durch die Fragen, die ich stellte, genauso wie die Information ber das Elektron im Verlauf des Experiments entsteht, f r das sich der Beobachter entschieden hat; anders gesagt, durch die Art der Nachweise, die die verwendeten Ger te liefern. H tte ich andere Fragen gestellt oder dieselben Fragen in einer anderen Reihenfolge, w re ich am Ende auf ein anderes Wort gekommen, so wie entsprechend der Versuchsleiter eine andere Geschichte ber das Verhalten des Elektrons zu berichten h tte. Der Einflu s, den ich gerade auf die Entstehung des Wortes hatte, war jedoch nicht ungeteilt. Ein Gro steil der Wahl wurde durch die - und -Antworten der Mitspieler im Raum bestimmt. Genauso nimmt der Versuchsleiter durch die Wahl der Experimente und die , zwar einen wichtigen Einflu s auf die Geschichte des Elektrons; er wei s aber, da s eine gewisse Unvorhersehbarkeit darin liegt, wie seine Messungen ausfallen werden, welche , was also geschieht, wenn . Dieser Vergleich zwischen der Quantenwelt und der berraschungsversion des Spiels der zwanzig Fragen hinkt in mancher Hinsicht, aber er trifft das Wesentliche. In dem Spiel existiert solange kein Wort, bis es durch die gestellten Fragen und die gegebenen Antworten Wirklichkeit wird. In der Realit t der Quantenphysik ist ein Elementarteilchen solange kein Teilchen, als es kein nachgewiesenes Ph nomen ist."



Lehnen Sie sich zur ck und lassen Sie das Gelesene Revue passieren. Halten Sie bitte in Stichworten auf drei Zeilen fest, was Ihnen am Wichtigsten erscheint.

Das Kopenhagener Bild der Realität ist deshalb höchst sonderbar. Es bedeutet, daß ein Atom oder Elektron oder was auch immer aus sich selbst heraus keine Existenz im bloßen Sinn des Wortes hat. Das führt uns natürlich zu der Frage: Wenn es kein Ding ist, mit einer eigenen Existenzberechtigung, weshalb sprechen wir dann überhaupt wie selbstverständlich von Elektronen?

Bohrs Denken scheint Elektronen und andere Quanteneinheiten in eine eher abstrakte Daseinsweise zurückzusetzen. Wenn wir andererseits so verfahren wie bisher und die Regeln der Quantenmechanik anwenden, also ob das Elektron Wirklichkeit wäre, kommen wir anscheinend dennoch zu richtigen Ergebnissen; auf alle richtig gestellten Fragen, z.B. welche Energie ein atomares Elektron hat, können wir Antworten errechnen, die sich experimentell bestätigen.

Eine typische Quantenberechnung von Elektronen besteht darin, die Lebensdauer des Zustandes der Angeregtheit eines Atoms zu bestimmen. Wenn wir wissen, daß das Atom zum Zeitpunkt t_1 angeregt wird, können wir mit Hilfe der Quantenmechanik die Wahrscheinlichkeit errechnen, daß der Zustand des Angeregtheits nicht vor dem Zeitpunkt t_2 hinaus andauern wird. Die Quantenmechanik liefert uns also einen Algorithmus, um zwei Beobachtungen bei t_1 und t_2 aufeinander zu beziehen. Das sogenannte Spieltheater der Rolle eines Modells, so daß der Algorithmus ein bestimmtes Ergebnis voraussagen kann. Wir können das Atom während des Zerfallsprozesses niemals direkt beobachten. Was wir von ihm wissen, sind die Meßdaten über seine Energie zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 . Natürlich brauchen wir nicht mehr Annahmen über das Atom zu machen, als notwendig sind, um wirkliche Beobachtungen zuverlässig voraussagen zu können. Da wir mit der Vorstellung des Atoms in der Praxis immer nur dann zu tun haben, wenn wir es beobachten, könnte man sagen, daß Physiker sich um nichts weiter zu kümmern braucht, als die Beobachtungsergebnisse in einen sinnvollen Zusammenhang zu bringen. Das Atom braucht um dieses sinnvollen Zusammenhangs willen nicht als unabhängiges Objekt. Das Wort ist, in anderen Worten, nichts weiter als eine bequeme Sprachregelung für eine Reihe mathematischer Beziehungen, die verschiedene Beobachtungen miteinander verknüpfen.

Die Auffassung, daß die Realität der Welt in Beobachtungen wurzelt, ist dem logischen Positivismus verwandt. Sie erscheint vielleicht fremd, weil sich die Welt meistens so verhält, als käme ihr eine unabhängige Existenz zu. Unhaltbar wird diese Annahme in der Tat nur, wenn wir Quantenphänomene beobachten. Und selbst dann denken viele Physiker in ihrer praktischen Arbeit weiterhin in Kategorien des Alltags über die Mikrowelt.

Das liegt daran, daß einem viele der gebräuchlichen, rein abstrakten mathematischen Denkmodelle so vertraut werden, daß sie den Anschein einer eigenen Realität gewinnen. Das gilt auch für die klassische Physik. Nehmen wir nur den Begriff der Energie als Beispiel. Energie ist eine rein mathematische Größe, die als nützliches Modell zur Vereinfachung komplexer Berechnungen in die Physik Eingang fand. Energie kann man nicht sehen oder berühren, doch gehört das Wort inzwischen so sehr zu unserer täglichen Umgangssprache, daß Energie häufig für etwas Greifbares einer eigenen Existenz gehalten wird. In Wirklichkeit ist Energie lediglich Teil einer Reihe von mathematischen Beziehungen, die Beobachtungen mechanischer Vorgänge auf einfache Art miteinander verbinden. Was Bohrs Philosophie sagen will, ist, daß Begriffe wie Elektron, Photon oder Atom in der gleichen Weise verstanden werden sollten – als nützliche Denkmodelle, die in Wirklichkeit nur eine Reihe mathematischer Beziehungen zur Verknüpfung von Beobachtungsdaten darstellen und die in unserer Vorstellung gegenständliche Gestalt annehmen.



Lehnen Sie sich zurück und lassen Sie das Gelesene Revue passieren. Halten Sie bitte in Stichworten auf drei Zeilen fest, was Ihnen am Wichtigsten erscheint.

Das Paradox der Messung

Der Geist im Atom p. 39:

Bohrs sogenannte Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik ist, trotz ihrer seltsamen Anklänge, die eigentliche, Auffassung unter berufsmäßigen Physikern. In der praktischen Anwendung der Quantenphysik braucht sich der Physiker kaum mit irgendwelchen epistemologischen Fragen auseinanderzusetzen. Solange die Regeln der Quantentheorie systematisch angewendet werden, leistet die Theorie alles, was von ihr erwartet werden kann; das heißt, sie macht korrekte Voraussagen über die Ergebnisse von tatsächlich durchgeführten Messungen - worauf die Arbeit von Physikern ja im Grunde hinausläuft. Einige Physiker haben sich jedoch nicht damit begnügt, es dabei zu belassen, denn im Herzen der Kopenhagener Interpretation schlummert offenbar ein verheerendes Paradox.

Der zentrale Punkt von Bohrs Sichtweise ist, daß wir im allgemeinen sinnvoll von den physikalischen Eigenschaften eines Quantensystems sprechen können, nachdem eine spezifische Messung (oder Beobachtung) durchgeführt worden ist. Zweifelloserhält der Meßvorgang dadurch eine besondere und entscheidende Bedeutung. Wie wir gesehen haben, bedarf es besonderer Angaben über Art und Anordnung der Geräte, um den Kontext der Messung näher zu bestimmen. Das setzt stillschweigend voraus, daß wir uns alle über die Bedeutung von Aussagen einig sind, wie: Schwierig wird es, wenn wir fragen, wo die Grenzlinie zwischen einem Quantensystem und dem makroskopischen Meßgerät liegt. Geigerzähler bestehen schließlich selbst aus Atomen und unterliegen dem Quantenverhalten.

Nach den Regeln der Quantenmechanik kann sich ein Quantensystem in der zeitlichen Dimension auf zwei unterschiedliche Arten entwickeln. Solange das System als isoliert betrachtet werden kann, nennt man seine zeitliche Entwicklung mit einem mathematischen Ausdruck eine *Unitäre Entwicklung*. Die physikalische Entsprechung einer unitären Entwicklung können wir an einem System beobachten, das sich im Zustand der Überlagerung verschiedener Wellenmuster befindet. Die verschiedenen Wellen werden sich fortlaufend überlagern und ein komplexes, wechselndes Muster bilden, wie Wellen an der Oberfläche eines Teiches. Die Beschreibung dieser Quantenentwicklung ist der jedes beliebigen wellenförmigen Systems sehr ähnlich.

Nehmen wir nun im Unterschied dazu an, daß eine Messung durchgeführt wird. Die Wirkung ist dramatisch. Auf einmal verschwinden alle Wellen bis auf eine, und es bleibt nur ein einziges Wellenmuster übrig, das darstellt die Interferenzerscheinungen führen auf, und das nachfolgende Wellenmuster ist völlig verwandelt. Eine solche, durch Messung verursachte Evolution der Welle ist irreversibel. Wir können sie nicht rückgängig machen und das ursprüngliche, komplexe Wellenmuster wiederherstellen. Dieser Vorgang ist, mathematisch gesehen, *Kollaps*. (Dieser Prozess wird "Reduktion der Wellenfunktion" genannt - Anmerkung der Verfasser)

Wie können wir diese beiden völlig verschiedenen Verhaltensweisen in einem Quantensystem verstehen? Offensichtlich hat die plötzliche Veränderung bei einem Meßvorgang damit zu tun, daß das Quantensystem mit einem Meßgerät gekoppelt ist, und mit ihm Wechselwirkung tritt. Es ist nicht mehr isoliert. Der Mathematiker John von Neumann konnte anhand eines Modells beweisen, daß eine solche Koppelung tatsächlich die eben beschriebenen Auswirkungen hat. Hier stoßen wir jedoch wieder auf das grundlegende Paradox des Messens. Das Meßgerät besteht selbst aus Atomen und ist daher den Regeln des Quantenverhaltens unterworfen. In der Praxis können wir an makroskopischen Geräten keine Quanteneffekte feststellen, weil diese Effekte so gering sind. Wenn die Quantenmechanik aber eine in sich stimmige Theorie ist, dann muß es solche

Quanteneffekte geben, seien die Geräte noch so groß. In diesem Fall können wir die Koppelung von gemessenem Objekt und messender Apparatur als ein einziges großes Quantensystem betrachten. Nehmen wir nun an, daß das kombinierte System gegenüber wieder anderen Systemen als isoliert angesehen werden kann, so gelten dieselben Regeln der Quantenmechanik auch für die größeren Systeme, einschließlich der Regel unitärer Entwicklung.



Lehnen Sie sich zurück und lassen Sie das Gelesene Revue passieren. Halten Sie bitte in Stichworten auf drei Zeilen fest, was Ihnen am Wichtigsten erscheint.

Wie geht nun das Problem? Stellen wir uns das ursprüngliche Quantensystem als eine Überlagerung von zwei Zuständen vor. Erinnern wir uns zum Beispiel an das polarisierte Licht, das in einem Winkel von 45° auf den Polarisationsfilter trifft und eine Überlagerung von zwei möglichen Photonenzuständen darstellt, nämlich einmal parallel und einmal senkrecht zum Polarisationsfilter ausgerichtet. Durch die Messung soll festgestellt werden, ob das Photon vom Polarisationsfilter absorbiert wird oder ihn durchdringen kann. Den beiden Polarisationszuständen des Photons entsprechend, wird auch das Meßgerät zwei makroskopische Zustände aufweisen. Überträgt man die Gesetze der Quantenmechanik auf das kombinierte System, taucht das Problem auf, daß sich die Überlagerung von Zuständen auch auf das Meßgerät erstreckt. Gewiss, die Interferenzeffekte, die durch die Überlagerung (Interferenz) dieser beiden Zustände hervorgerufen werden, werden minimal sein, wenn das Gerät richtig konstruiert ist. Im Prinzip sind die Effekte jedoch vorhanden, und wir kommen nicht um die Schlussfolgerung herum, daß sich die Apparatur nun selbst in jenem Schwebezustand befindet, mit dem wir uns für Elektronen, Photonen usw. bereits abgefunden haben.

Die Meßapparatur einen irreversiblen Meßvorgang durchgeführt hat, so folgert von Neumann daraus, können wir erst sagen, wenn wir sie selbst einer Messung unterziehen und dadurch zwingen, (wenn wir dadurch - technisch gesagt - die Wellenfunktion in einen bestimmten <Eigenzustand> überführen). Jetzt geraten wir aber in einen infiniten Regress, denn diese zweite Messvorrichtung bedarf wieder eines weiteren Gerätes, um in einen Zustand konkreter Realität zu kollabieren" usw. Die geisterhafte Überlagerung von Quantenzuständen scheint durch die Koppelung eines Meßgerätes mit einem Quantenzustand das ganze Labor zu erobern! Dass wir makroskopische Gegenstände in einen quantenmechanischen Überlagerungszustand versetzen können, verdeutlicht das Besondere der Quantentheorie auf dramatische Weise.

Originaltext 5

Erwin Schrödinger (1935): Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik

Das Paradox von Schrödingers Katze- und Schlimmeres

Der Geist im Atom p. 41:

Erwin Schrödinger, einer der Väter der Quantenmechanik, hatte bereits 1935 erkannt, wie sich die philosophischen Probleme einer Quantenüberlagerung auf der makroskopischen Ebene bemerkbar machen könnten. Er veranschaulichte

das Thema, etwas auf Effekte bedacht, durch ein inzwischen berühmt gewordenes Gedankenexperiment mit einer Katze (Abb. 9):

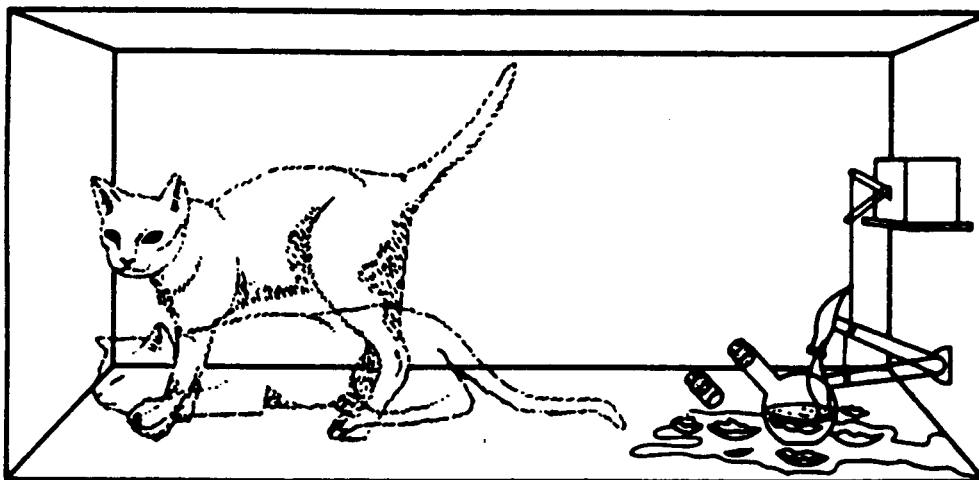


Abb. 9: Das Paradox von Schrödingers Katze. Die Anordnung mit dem Gift dient der Veranschaulichung einer Überlagerung von Quantenzuständen auf eine makroskopische Ebene, die, wie es scheint, eine paradoxe Koexistenz einer lebenden und einer toten Katze in sich birgt (Aus: S. B. Dewitt (1970), Quantum mechanics and Physics today 23,9.).

Eine Katze ist zusammen mit der folgenden diabolischen Vorrichtung (die vor Berührung durch die Katze gesichert sein muß) in einen Stahlbehälter eingeschlossen: In einem Geigerzähler befindet sich etwas radioaktives Material, aber nur so wenig, daß davon in einer Stunde vielleicht ein Atom zerfällt. Gleicher Wahrscheinlichkeit aber auch keins; zerfällt ein Atom, so entzündet sich das Zählrohr und setzt mittels eines Schalterseines Hammer in Bewegung, der eine kleine Flasche mit Blausäure zertrümmert. Dieses System für eine Stunde sich selbst, und zerfällt in dieser Zeit kein Atom, so ist die Katze am Leben. Das erste zerfallende Atom hätte sie vergiftet.

Für uns ist eindeutig, daß die Katze entweder lebendig oder tot ist. Nach den Regeln der Quantenmechanik haben wir es jedoch in dem Behälter mit einer Überlagerung von zwei Systemzuständen zu tun: mit der lebendigen und mit der toten Katze. Aber welches Sinn ergibt eine lebendig/tote Katze? Vermutlich weiß nur die Katze selbst, ob sie tot oder lebendig ist. Folgen wir jedoch dem von Neumann geäußerten Gedanken der Regression, so kommen wir zu dem Schluß, daß das unglückliche Tier so lange zwischen Leben und Tod schwebt, bis jemand den Behälter öffnet und nachsieht. In diesem Moment wird es entweder ins volle Leben projiziert oder augenblicklich ins Jenseits befördert!

Das Paradox spitzt sich noch zu, wenn die Katze durch einen Menschen ersetzt wird, denn der in dem Behälter eingesperrte Freund wird sich die ganze Zeit über bewußt sein, ob er gesund ist oder nicht. Öffnet der Versuchsleiter den Behälter und findet seinen Freund am Leben, so kann er fragen, wie er sich vor dieser anscheinend so entscheidenden Beobachtung gefühlt hat. Der Freund wird vermutlich antworten, daß er die ganze Zeit über zu 100 % lebendig war. Das jedoch läuft der Quantenmechanik vollkommen zuwider. Folgen wir ihr, so hat sich der Freund vor der Öffnung des Behälters im Zustand einer Überlagerung von Leben und Tod befunden.

Das Paradox mit der Katze macht jede etwa insgeheim gehegte Hoffnung zunichte, daß die Geisterhaftigkeit Quanten auf die zwielichtige Mikrowelt des Atoms begrenzt und die paradoxe Natur der Realität im atomaren Bereich für das tägliche Leben und die tägliche Erfahrung ohne Bedeutung sei. Betrachten wir die Quantenmechanik als zutreffende Beschreibung aller Materie, ist diese

Hoffnung gewiß fehl am Platz. Folgen wir der Logik der Quantentheorie bis in ihre letzten Konsequenzen, so verflüchtigt sich der größte physikalische Universums in ein Schattenreich der Phantasie.

Zu denen, die sich nie mit diesem logischen Extrem befreiten, gehörte Einstein. Er war es, der die Frage stellte: Ob der Mond auch existiert, wenn niemand ihn beobachtet. Der Gedanke, den Beobachter zum Angelpunkt der physikalischen Realität zu machen, steht im Gegensatz zu den Eigenschaften des Unpersönlichen und der Objektivität, die das Selbstverständnis der Wissenschaft ausmachen. Verkommt denn nicht alle Wissenschaft zu einem Spiel, zur bloßen Jagd nach Bildern, wenn es keine konkrete Welt, der wir Mutmaßungen anstellen und mit der wir experimentieren können?



Lehnen Sie sich zurück und lassen Sie das Gelesene Revue passieren. Halten Sie bitte in Stichworten auf drei Zeilen fest, was Ihnen am Wichtigsten erscheint.



Nehmen Sie nun bitte Ihre stichwortartigen Zusammenfassungen zur Hand und überfliegen Sie sie nochmals. Damit sind Sie gut für die folgende Bilanz vorbereitet.

A 2.2 Quantentheorie und Wirklichkeiten

Auf der Suche nach dem Wirklichen streiten sich die physikalischen Geister nicht etwa um ihre Physik, sondern um ihre Metaphysik. Die Frage "Was ist die Wirklichkeit?" liegt im Spannungsfeld von Denken, Erscheinung und Sein. Die Antwort fällt also gemäss der philosophischen Neigung aus - sofern die Physik, die ja die Erscheinungen beschreibt, nicht Hinweise gibt. Die experimentell "gesicherte" Nichtlokalität könnte ein solcher Hinweis sein.

Im folgenden sind drei verschiedene Auffassungen der Wirklichkeit kurz dargestellt. Auf so geringem Raum fallen natürlich die Feinheiten der philosophischen Erwägungen weg. Und trotz der Kürze dürfen Sie auch keine saubere Abgrenzungen und Definitionen erwarten:

- Die tägliche Erfahrung legt uns nahe, an die Existenz einer vom menschlichen Verstand unabhängige Wirklichkeit zu glauben. Der **physikalische Realismus** vertritt die Ansicht, diese Wirklichkeit könne mit physikalischen Begriffen wie Wellenfunktion und Kausalität durch die Wissenschaft beschrieben werden, und zwar so, *wie sie ist*. Da diese Wirklichkeit nicht von der Existenz eines menschlichen Beobachters abhängig ist, nannte sie Einstein .
- Ein Vertreter der **methodischen Positivismus** steht auf dem Standpunkt: "Nur dasjenige können wir wissen, was wir in unseren Beobachtungen und Handlungen wahrnehmen können. Über die Existenz einer unabhängigen Wirklichkeit zu sprechen ist sinnlos. Wovon man nicht sprechen kann - weil es keine wohldefinierten Begriffe gibt - darüber muss man schweigen." Die Physik solle sich nur darauf beschränken, die Ergebnisse von Experimenten in Begriffen unter allgemeinen Regeln zu ordnen. Diese "Wirklichkeit" ist zwar von den Sinneserfahrungen und Instrumenten des einzelnen Beobachters abhängig, soll aber für alle Beobachter dieselbe sein. - Damit ist sicher die strenge Objektivität verlorengegangen und durch eine intersubjektivität ersetzt worden.
- Die Idealisten glauben, dass im Anfang das schöpferische Ich, das Bewusstsein, steht. In der sich dadurch ergebenden Differenz von Geist und Materie betonen sie die Vorherrschaft des Geistes über die Materie, falls sie letztere überhaupt zulassen. Von diesem denkenden Ich aus wird das, was ist, erklärt. So schliesst der **Idealismus** zwar die Existenz einer äusseren Wirklichkeit nicht aus, diese ist aber geistiger Natur (z. B. Gott) und kann stark vom denkenden Subjekt geprägt sein. - Diese Andeutung muss leider hier genügen.

Diese verschiedenen philosophischen Positionen und die zugehörigen Auffassungen der Wirklichkeit finden ihren Widerschein in den antagonistischen Interpretationen der Quantentheorie. Die Realisten (Einstein, de Broglie, Schrödinger ...) versuchen durch das Aufzeigen von Paradoxa die Positivisten (Born, Bohr, Heisenberg, Pauli ...) zu überzeugen. Diese jedoch ziehen sich vom Wirklichkeitsanspruch der Realisten hinter ihre Experimente zurück und weigern sich, hinter dem, was sie beobachten, eine Ursache zu suchen. So ist die Sprache der Quantenmechanik vom Begriff der Wahrscheinlichkeit dominiert. Die statistische Interpretation ist der älteste Versuch, mit den Eigenarten der Quantentheorie fertig zu werden. Sie stammt von Max Born (1926).

A 2.2.1 Die statistische Interpretation

Jürgen Audretsch schildert die statistische Interpretation (Audretsch 90, Seite 26 ff) folgendermassen:

Was sich wellenförmig hinter dem Doppelspalt ausbreitet ist also nicht etwa eine Welle, die in einem Materiepudding schwingt oder die Ausbreitung irgend einer verschmierten Materie beschreibt, sondern eine zunächst ganz abstrakt aufzufassende Wahrscheinlichkeitswelle. Das heisst, wir führen rein rechnerisch Wellen ein, (...) um die Auftreffwahrscheinlichkeit des

Einzelobjekts ablesen zu können. (...) Fragen wir nun nach den Prognosen im Quantenbereich. Was kann in einer wohlbestimmten Versuchsanordnung nach einer wohlbestimmten Präparation der Anfangsbedingungen über den Ausgang des Experiments gesagt werden? (...) Es ist nach wie vor eine eindeutige Vorhersage möglich. Am Beispiel des Doppelspaltens bedeutet dies, dass sich stets das gleiche resultierende Schwärzungsbild ergibt unabhängig davon wie die Gesamtheit der Einzelmessungen produziert wird. Hier liegt also ein vollständig determiniertes Verhalten vor.

Das ändert sich entscheidend, wenn man zur Messung am Einzelobjekt übergeht. (...) Wir wollen im folgenden der Einfachheit halber von diesen stets auftretenden Messungenauigkeiten absehen und annehmen, dass die Einzelmessung jeweils ein scharfes Messergebnis liefert. Auf diese Weise soll verhindert werden, dass die für die Quantenmechanik im Gegensatz zur Klassischen Mechanik typischen Unbestimmtheiten mit den überall auftretenden Messfehlern verwechselt werden. (...) Im Fall der Messung am Einzelobjekt hatten wir gesehen, dass im Quantenbereich charakteristischerweise kein deterministisches Verhalten mehr vorliegt. Wir sind daher in der Quantenmechanik prinzipiell auf Wahrscheinlichkeitsaussagen angewiesen. Dieser Umstand beruht nicht auf unserer Unkenntnis der Anfangsbedingungen. Die Konsequenz ist unvermeidlich: im Quantenbereich gibt es den absoluten Zufall.

Hier wird wohl auf die Kausalität verzichtet. Doch bleibt der Begriff des "Einzelobjekts" mit zugehöriger existierender, aber doch zufällig-unbestimmter Bahn haften.

A 2.2.2 Die Kopenhagener Interpretation

Die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion bildet eine wichtige Grundlage der positivistischen Interpretation, als deren Protagonist wohl Niels Bohr bezeichnet werden kann. In den Jahren 1926/27 diskutierte er in Kopenhagen mit Werner Heisenberg und erweiterte dessen mathematisch ausformulierte Unschärferelation zum allgemeinen Prinzip der Komplementarität. Baumann und Sexl schreiben dazu (Baumann 84, Seite 16 ff):

Im Laufe der weiteren Diskussion stellt Bohr fest: "Nach der Quantentheorie kommt eben wegen der nicht zu vernachlässigenden Wechselwirkung mit dem Messmittel bei jeder Beobachtung ein ganz neues unkontrollierbares Element hinzu." Wir können also versuchen, Bohrs Meinung folgendermassen zu charakterisieren:

- 1. Raum-zeitliche Beschreibung eines Vorgangs erfordert Beobachtungen (beispielsweise einer Bahn).*
- 2. Beobachtungen bedingen unkontrollierbare Störungen des betrachteten Objekts.*
- 3. Unkontrollierbare Störungen machen das Kausalgesetz unanwendbar, da das weitere Verhalten des Objekts nicht vorhergesagt werden kann.*
- 4. Raum-zeitliche Beschreibung eines Vorgangs und die Forderung nach der Kausalität schliessen einander deshalb aus, sie sind zu einander "komplementär".*

Bohr schreibt dann, dass der Begriff "Komplementarität" geeignet sei,

"die typischen Züge der Individualität von Quantenphänomenen zu erfassen und gleichzeitig die besonderen Aspekte des Beobachtungsproblems innerhalb dieses Erfahrungsgebiets klarzulegen. Hierfür ist die Erkenntnis entscheidend, dass, wieweit auch die Phänomene den Bereich klassischer physikalischer Erklärung überschreiten mögen, die Darstellung aller Erfahrung in klassischen Begriffen erfolgen muss. (...) daraus folgt die Unmöglichkeit einer scharfen Trennung zwischen dem [quantenphysikalischen] Verhalten atomarer Objekte und der Wechselwirkung mit den [nach klassischer Physik funktionierenden] Messgeräten."

Da (1) die Wirklichkeit gemäss positivistischer Ansicht nur dasjenige ist, was durch die Experimente erfasst wird und die quantenphysikalische Erscheinung nicht isoliert von den Instrumenten beobachtet werden kann, und weil (2) diese makroskopischen Experimente mit unseren klassischen Begriffen beschrieben werden müssen, sind demnach die *nichtklassischen* Quantenphänomene mit den vom Experiment abhängigen Begriffen der *klassischen* Physik zu beschreiben. Die gesamte Spannung zwischen Quantenphänomenen, Experimentabhängigkeit und klassischen Begriffen wird im Wort **Komplementarität** zusammengefasst.

A 2.2.3 Realistische Interpretationen

Die - im klassischen Sinn - indeterministische Quantentheorie behagte Einstein ganz und gar nicht. "Der Gedanke, dass ein einem Strahl ausgesetztes Elektron aus freiem Entschluss den Augenblick und die Richtung wählt, in der es fortspringt, ist mir unerträglich. Wenn schon, dann möchte ich lieber Schuster (...) sein als Physiker." Sein Ziel war es, die klassische Kausalität in Einklang mit der Quantenwelt zu bringen. Kurz: "Gott würfelt nicht!" Ebenso störte es ihn, dass die starke Objektivität verlorengegangen war. Er und seine Anhänger versuchten, Interpretationen zu finden, die ohne prinzipielle Zwischenschaltung eines Instrumentes direkt auf die unabhängige Wirklichkeit Bezug nehmen.

Anhand des EPR-Paradoxons wollen wir Einsteins Argumentationsweise aufzeigen. Das Paradoxon entsteht, wenn man die folgenden 3 Voraussetzungen *zugleich* als gültig annimmt:

- Die Quantenmechanik ist richtig in dem Sinne, dass sie die Beobachtungen korrekt beschreibt.
- Die Quantenmechanik ist vollständig, d.h. die Wellenfunktion enthält alle Informationen, um die Phänomene korrekt zu beschreiben.
- Zwei Teilchen können so voneinander getrennt werden, dass eine Messung an einem Teilchen das andere nicht beeinflusst. Man nennt diese Eigenschaft "Lokalität" oder "Lokalisierbarkeit".

Um das Paradoxon aufzulösen, muss mindestens eine der drei Voraussetzungen fallengelassen werden. Überlegen wir uns, welche der Annahmen wir aufgeben wollen:

Wie Sie wissen, hat die Quantentheorie in diesem Jahrhundert einen unglaublichen Erfolg gehabt, indem sie eine grosse Vielfalt von Phänomenen korrekt beschreiben konnte. Wir dürfen also annehmen, dass die erste Voraussetzung zurecht getroffen worden sei.

Nun zur dritten Voraussetzung: Gemäss den Gesetzen der klassischen Physik nimmt die Wechselwirkung zwischen zwei Systemen (sei sie gravitationell oder elektromagnetisch) mit zunehmender Entfernung ab und wird für sehr grosse Distanzen vernachlässigbar klein. Eine Messung am weit entfernten System beeinflusst dann das andere System sicherlich nicht - und schon gar nicht sofort. Es ist also ganz natürlich, wenn auch die dritte Voraussetzung aufrecht erhalten bleibt.

Wir sind also zusammen mit Einstein gezwungen, die zweite Annahme zu anzuzweifeln (vgl. Text 2.3.3): die Quantenmechanik scheint nicht vollständig zu sein!

Genauer ausgedrückt heisst das, dass es mindestens ein Element der Wirklichkeit gibt, welches im Formalismus der Quantenmechanik kein Gegenstück enthält. Dieses uns noch unbekannte Element müssen wir neu in die Theorie einbringen. Das machen wir so, indem wir sagen, die Wellenfunktion wäre nicht nur eine Funktion von Ort und Zeit, sondern auch noch abhängig von einer Variablen λ . Dieses λ wird als "**verborgener Parameter**" bezeichnet, weil wir ihn mit den uns bekannten Mitteln nicht messen können.

Betrachten wir nochmals das Experiment, bei welchem Photonen einen Polarisationsfilter passieren. Der verborgene Parameter hat dann gemäss unserer Theorie die Werte ± 1 . Wenn nun ein Photon durch den Polarisationsfilter hindurchfliegt, war der Parameterwert $+1$. Noch genauer: Das Photon konnte passieren, *weil* der Parameterwert $+1$ war. Nun haben wir ja eine Ursache, und keine blossе Wahrscheinlichkeit mehr: Die Kausalität ist gerettet!

Derartige Theorien mit verborgenen Variablen wurden mittlerweile entworfen. Allein experimentell konnte entschieden werden, wer Recht hatte. Ganz allgemeine, nur Mengentheorie und Logik benützende Überlegungen führen zusammen mit der dritten Voraussetzung, der Lokalität, für spezielle Teilchenpaare auf die sog. Bellschen Ungleichungen. Diese Ungleichungen liefern eine untere Grenze für bestimmte Messwerte: Wird sie unterschritten, dann ist die im letzten Abschnitt skizzierte Gedankenkette falsch und Theorien mit verborgenen Variablen sind unmöglich. Eine ganze Reihe von Experimenten zeigte, dass dem auch so ist! - Andererseits gibt es die Möglichkeit, die Messresultate mit Hilfe der Quantenmechanik zu berechnen. Dabei fand man Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment: eine weitere Bestätigung für die Voraussetzung (1). Will man also die Gültigkeit der einfachsten Logik auch in der Quantenwelt nicht aufgeben, so bleibt als einzige Möglichkeit, die dritte Voraussetzung fallen zu lassen (vgl. Text 2.3.4).

Die Quantenwelt ist nichtlokal!

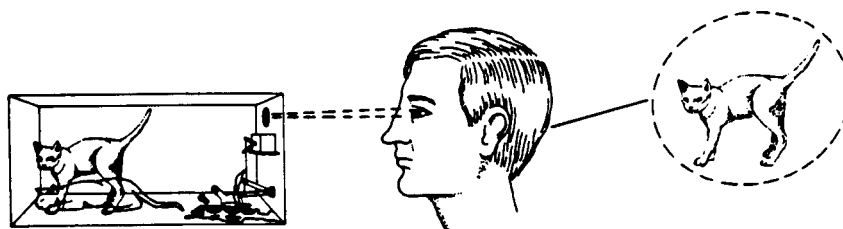
Was heisst das nun für den Realisten? Nicht alle Objekte können durch räumliches Entfernen voneinander getrennt werden. Damit ist der Traum einer lokalen Realität ausgeträumt - und zwar endgültig. Doch der Realismus ist, deswegen noch nicht gestorben: die Wirklichkeit muss jedoch eine irgendwie *nichtlokale Struktur* aufweisen. Es gibt zwei Wege, weiterzusuchen: (1) nichtlokale Theorien mit verborgenen Parametern oder (2) auf die verborgene Parameter verzichten und versuchen, andere nichtlokale Theorien, die die Kausalität retten, zu entwickeln.

Dieser Weg wurde von David Bohm und anderen um 1950 eingeschlagen: Um dem Problem zu entgehen, dass bei einem quantenphysikalischen System eine Messung sich mit Überlichtgeschwindigkeit an einer anderen Stelle bemerkbar machen kann, hat er das sogenannte *Quantenpotential* eingeführt. Es ist mit dem Gravitationspotential vergleichbar, besitzt aber eine viel kompliziertere Struktur: Es enthält in jedem Teilvolumen Informationen über entfernte Objekte, ebenso wie jeder Hologrammteil Informationen über den ganzen Gegenstand besitzt. Entfernte Veränderungen können demnach vom Quantenpotential sofort registriert werden.

A 2.2.4 Idealistische Interpretation

Um die "Reduktion der Wellenfunktion" erklären zu können, glaubt Eugene Wigner, dass das Bewusstsein die Wellenfunktion beeinflusst (Selleri 83, p 74):

Erst die Registrierung des Eindrucks [des Ergebnisses einer Beobachtung] in unserem Bewusstsein ändert die Wellenfunktion, da sie unsere Einschätzungen der Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Sinneseindrücke modifiziert, die wir in Zukunft erwarten. An dieser Stelle wird das Bewusstsein zu einem unvermeidbaren und unveränderbaren Teil der Theorie.



A 2.3 Fünf Originaltexte

A 2.3.1 Originaltext 1:

Werner Heisenberg (1927)

ber den Anschaulichen Inhalt der quantenmechanischen Kinematik und Mechanik

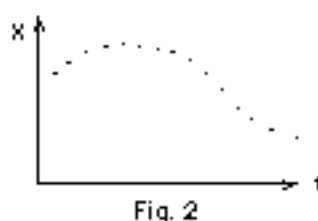
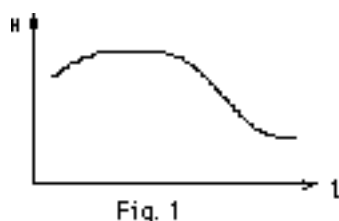
(Eingegangen am 23. März 1927)

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst exakte Definitionen der Worte: Ort, Geschwindigkeit, Energie usw. (z.B. des Elektrons) aufgestellt, die auch in der Quantenmechanik Gültigkeit behalten, und es wird gezeigt, dass kanonisch konjugierte Größen simultan nur mit einer charakteristischen Ungenauigkeit bestimmt werden können (/1). Diese Ungenauigkeit ist der eigentliche Grund für das Auftreten statistischer Zusammenhänge in Quantenmechanik. Ihre mathematische Formulierung gelingt mittels der Dirac-Jordanschen Theorie (/2). Von den so gewonnenen Grundsätzen ausgehend wird gezeigt, wie die makroskopischen Vorgänge aus der Quantenmechanik heraus verstanden werden können (/3). Zur Erläuterung der Theorie werden einige besondere Gedankenexperimente diskutiert (/4).

Eine physikalische Theorie glauben wir dann anschaulich zu verstehen, wenn wir uns in allen einfachen Fällen die experimentelle Konsequenzen dieser Theorie qualitativ denken können, und wenn wir gleichzeitig erkannt haben, dass die Anwendung der Theorie niemals innere Widersprüche enthält. Zum Beispiel glauben wir die Einsteinsche Vorstellung vom geschlossenen dreidimensionalen Raum anschaulich zu verstehen, weil für uns die experimentellen Konsequenzen dieser Vorstellung widerspruchsfrei denkbar sind. Freilich widersprechen diese Konsequenzen unseren gewohnten anschaulichen Raum-Zeitbegriffen. Wir können uns aber davon überzeugen, daß die Möglichkeit der Anwendung dieser gewohnten Raum-Zeitbegriffe auf sehr große Räume weder aus unseren Denkgesetzen noch aus der Erfahrung gefolgert werden kann. Die anschauliche Deutung der Quantenmechanik ist bisher noch voll innerer Widersprüche, die sich im Kampf Meinungen um Diskontinuums- und Kontinuums-theorie, Korpuskeln und Wellenauswirken. Schon daraus möchte man schließen, daß eine Deutung der Quantenmechanik mit den gewohnten kinematischen und mechanischen Begriffen jedenfalls nicht möglich ist. Die Quantenmechanik war ja gerade aus dem Versuch entstanden, mit jenen gewohnten kinematischen Begriffen zu brechen und an ihre Stelle Beziehungen zwischen konkreten experimentell gegebenen Zahlen zu setzen. Da dies gelungen scheint, wird andererseits das mathematische Schema der Quantenmechanik auch keiner Revision bedürfen. Ebensowenig wird eine Revision der Raum-Zeitgeometrie für kleine Räume und Zeiten notwendig sein, da wir durch Wahl hinreichend schwerer Massen die quantenmechanischen Gesetze den klassischen beliebig annähern können, auch wenn es sich um noch so kleine Räume und Zeiten handelt. Aber daß eine Revision der kinematischen und mechanischen Begriffe notwendig ist, scheint aus den Grundgleichungen der Quantenmechanik unmittelbar zu folgen.

Wenn eine bestimmte Masse m gegeben ist, hat es in unserer gewohnten Anschauung einen einfach verständlichen Sinn, vom Ort und der Geschwindig-

keit des Schwerpunkts dieser Masse m sprechen. In der Quantenmechanik aber soll eine Relation $\hat{p}\hat{q} - \hat{q}\hat{p} = \hbar/2\pi i$ ¹ zwischen Masse, Ort und Geschwindigkeit bestehen. Wir haben also guten Grund, gegen die kritiklose Anwendung jener Worte "Ort" und "Geschwindigkeit" Verdacht zu schöpfen. Wenn man zugibt, daß für Vorgänge in sehr kleinen Räumen und Zeiten Diskontinuitäten irgendwie typisch sind, so ist ein Versagen ebender Begriffe "Ort" und "Geschwindigkeit" sogar unmittelbar plausibel: Denkt man z.B. an die eindimensionale Bewegung eines Massenpunktes, so wird man in einer Kontinuumsstheorie eine Bahnkurve $x(t)$ für die Bahn des Teilchens (genauer: dessen Schwerpunktes) zeichnen können (Fig.1), die Tangente gibt jeweils die Geschwindigkeit. In einer Diskontinuumsstheorie dagegen wird etwa an Stelle dieser Kurve eine Reihe von Punkten endlichen Abstandes treten (Fig.2). In diesem Falle ist es offenbar sinnlos, von der Geschwindigkeit an einem bestimmten Orte zu sprechen, weil die Geschwindigkeit erst durch zwei Orte definiert werden kann und weil folglich umgekehrt zu jedem Punkt je zwei verschiedene Geschwindigkeiten gehören.



¹ Diese Gleichung ist eine abstrakte Darstellung der Unschärferelation für Ort und Impuls: \hat{p} bedeutet "Impulsoperator", \hat{q} bedeutet "Ortsoperator". \hat{p} und \hat{q} sind also nicht (komplexe) Zahlen, denn für sie würde das Kommutativgesetz gelten und die Differenz hätte den Wert 0. Operatoren sind mathematische Objekte, die auf Funktionen wirken. Beispielsweise kann die Bildung der ersten Ableitung als Wirkung eines "Ableitungsoperators" interpretiert werden. Operatoren stehen in der Quantenphysik anstelle der Werte klassischer Größen, beispielsweise anstelle von Ort und Impuls.

A 2.3.2 Originaltext 2: ✌

Anton Zeilinger

Fundamentale Experimente mit Materiewellen und deren Interpretation

5 Das Doppelspaltexperiment

Zur Durchführung des Doppelspaltexperimentes wurde zwischen die beiden absorbierenden Glasbacken eines breiten Einzelspaltes ein Bordraht von $104\text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser montiert. Bor ist ebenfalls ein sehr starker Neutronenabsorber. Die dadurch entstandene Anordnung (Abb. 4) besteht aus zwei Spalten, jeweils $22\text{ }\mu\text{m}$ und $23\text{ }\mu\text{m}$ breit, wobei die Spaltmitten voneinander einen Abstand von $127\text{ }\mu\text{m}$ besitzen. Der Detektor wurde wieder in Stufen an der Bildebene entlanggeführt und an jedem Punkt diesmal 125 Minuten lang gehalten. Vor allem ist auch hier die wichtige Feststellung zu treffen, daß die Neutronen nach wie vor einzeln auftreten. Das heißt, wieder wird nur von Zeit zu Zeit (alle paar Sekunden) ein Neutron im Detektor registriert. Die insgesamt an jedem Punkt gehaltenen Neutronen sind in Abb. 5 gegen die Position des Meßspaltes aufgetragen. Man erkennt ganz klar das Interferenzbild der Beugung am Doppelspalt.

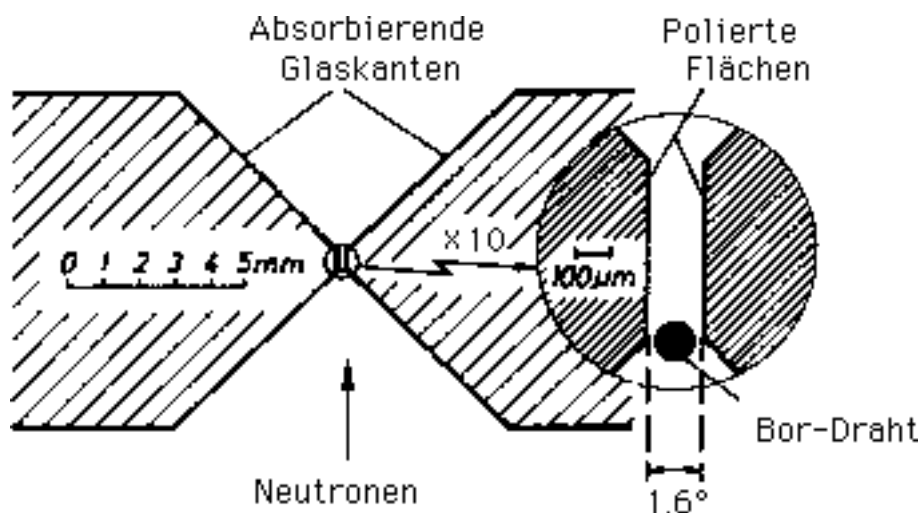


Abbildung 4 Der im Neutronenexperiment verwendete Doppelspalt im Querschnitt.

Diese Intensitätsverteilung hat viele interessante Eigenschaften. Die interessanteste ist wohl die, daß es Stellen gibt, an denen weniger Neutronen ankommen als dann, wenn nur ein Spalt offen ist. Öffnen des zweiten Spaltes verringert an manchen Orten die Zahl der dort ankommenden Neutronen! Dies wird oft so ausgedrückt, daß offenbar jedes einzelne Neutron Information darüber haben muß, ob beide Spalten offen sind. In anderen Worten, die Wellenfunktion ist nicht nur dem gesamten Ensemble der Neutronen zuzuordnen, sondern jedem einzelnen Neutron. Selbstverständlich ist es absolut unmöglich, die gemessene Intensitätsverteilung als Summe der Intensitätsverteilungen mit jeweils einem offenen Spalt zu verstehen. Dies wäre auch nur möglich, wenn wir etwa sagen könnten, das Neutron sei entweder durch den Spalt 1 oder durch den Spalt 2

hindurchgetreten. Wir haben jedoch im Gegenteil keinerlei Wissen darüber, welchen Spalt das Neutron passiert hat. Ja, wir können nicht einmal behaupten, daß wir wissen, das Neutron sei mit Sicherheit durch einen der beiden Spalte oder durch beide Spalte gleichzeitig gegangen! Es ist das prinzipiell Neue und überraschende an der Quantenmechanik, daß aus diesem grundsätzlichen Nicht-Wissen, wie ein Vorgang im Detail abgelaufen ist, etwas qualitativ Neues folgt, nämlich die Interferenz der Wellen entlang aller möglichen Wege (bzw. Pfade). In voller Analogie zur Lichtoptik kommt es genau dann zur Auslöschung der Materiewellen, wenn der entsprechende Wegunterschied gerade eine halbe Wellenlänge beträgt und es kommt zu konstruktiver Interferenz, wenn der entsprechende Wegunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist.

Die durchgezogene Kurve in Abb. 5 ist wieder die nach der Quantenmechanik unter Berücksichtigung aller experimentellen Parameter, wie Wellenlängenverteilung, Geometrie etc., berechnete.

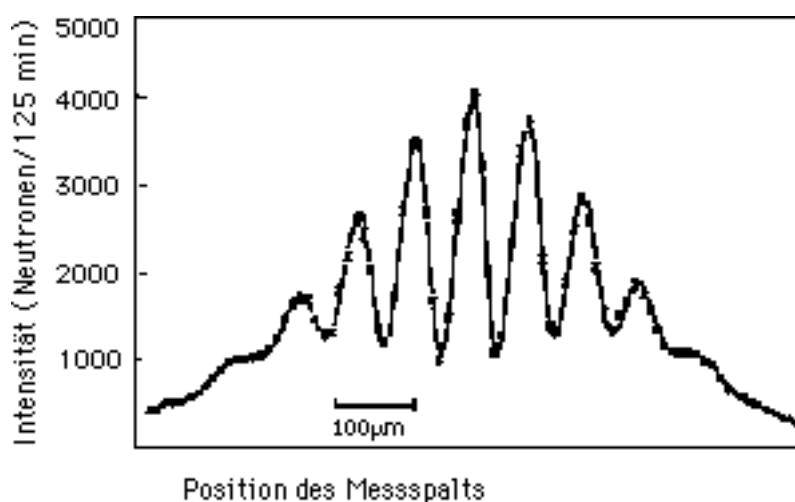


Abbildung 5 Intensitätsverteilung der Neutronen nach der Beugung am Doppelspalt. An den gemessenen Punkten ist, wie in der Experimentalphysik üblich, der unvermeidliche statistische Messfehler mit eingezeichnet. Die durchgezogene Kurve stellt wieder die unter Verwendung der de Broglie Wellenlänge berechnete theoretische Vorhersage dar.

(...)

10 Die Wellenlänge von Atomen

Eine interessante Frage ist die, wie groß Objekte sein können, für die es möglich ist, Welleneigenschaften zu beobachten. Grundsätzlich ist dazu zu bemerken, daß es keine prinzipielle Beschränkung der Gültigkeit der Quantenmechanik gibt. Es ist jedoch für den Experimentalphysiker eine faszinierende Herausforderung, optische Phänomene wie Beugung und Interferenz an immer größeren Objekten zu realisieren. Da heute die Wellennatur von Elementarteilchen wie Elektronen und Neutronen bereits routinemäßig im Experiment eingesetzt wird, ist es interessant, festzustellen, daß auch schon für Atome die de Broglie Welle nachgewiesen wurde. Schon sehr früh gab es Experimente zur Beugung am periodischen Gitterpotential von Kristalloberflächen und später an absorbierenden Kanten. Neuerdings wurde über sehr schöne Experimente zur Beugung an Transmissionsgittern und an stehenden Lichtwellen berichtet. Dieses letztere Experiment wollen wir hier diskutieren.

Quelle dient ein Ofen, aus dem Natriumatome mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 km/s austreten. Es wird isotopenreines Natrium verwendet. Der austretende Strahl wird kollimiert durch zwei 10 μm breite Spalte im Abstand von 90 cm. Dieser Strahl tritt dann durch einen Bereich, in dem ein stehendes Wellenfeld einer Laserlichtquelle herrscht. Das verwendete Laserlicht hatte eine Wellenlänge von $\lambda_{\text{Licht}} = 0.589 \mu\text{m}$. Die stehende Welle wird einfach durch Reflexion an einem Spiegel erzeugt (Abb. 11). Physikalisch gesehen ist die Wechselwirkung zwischen dem Laserlicht und den Natriumatomen zu beschreiben durch einen in den Natriumatomen induzierten elektrischen Dipol, der mit der elektrischen Feldstärke der Lichtwelle wechselwirkt. Da diese Wechselwirkung quadratisch mit der Feldstärke geht, hat das "Lichtgitter" für die Atome eine Gitterkonstante, die der halben Lichtwellenlänge entspricht, also $d_{\text{Licht}} = \lambda_{\text{Licht}}/2 = 0.295 \mu\text{m}$. Die endgültige Verteilung der Atome wird schließlich nach weiteren 1.2 m durch einen Hitzdrahtdetektor von 25 μm Durchmesser gemessen.

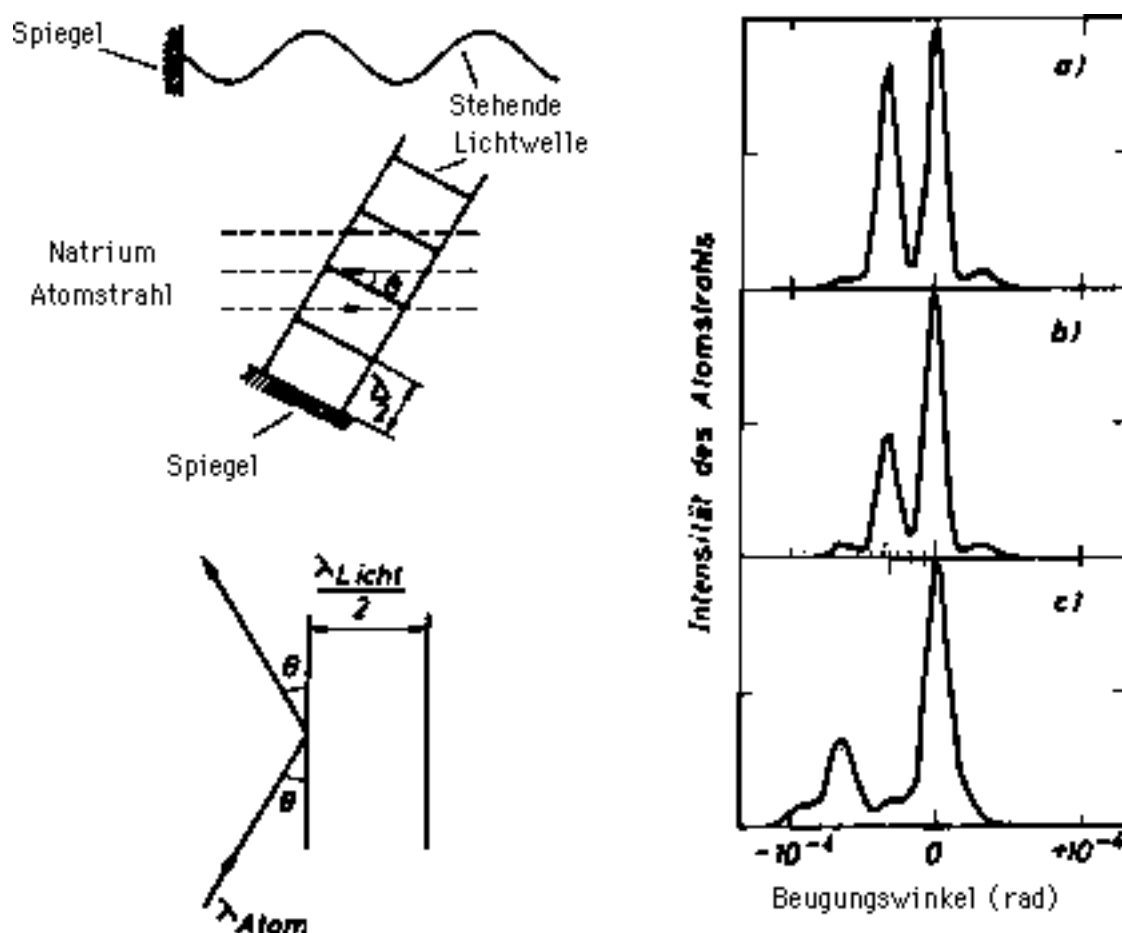


Abbildung 11 Diagramm des Bereichs der Wechselwirkung zwischen der durch Reflexion an einem Spiegel erzeugten stehenden Lichtwelle und dem Atomstrahl (links oben). Links unten sieht man das Prinzip der Bragg-Beugung der de Broglie-Welle des Atoms (λ_{Atom}) an der stehenden Lichtwelle. Rechts das experimentelle Ergebnis: a) und b) Beugung bei verschiedener Intensität der Lichtwelle, c) Beugung zweiter Ordnung. Die abgebeugten Atome werden jeweils das Beugungsmaximum links vom durchgehenden Strahl.

Vereinfacht man sich dieses Experiment auch vorstellen als die komplementäre Situation zur gewohnten Beugung von Licht an Gittern. Während

wir dort die Beugung von Lichtwellen an Atomgittern beobachten, ist es bei den neuen Experimenten die Beugung von Atomwellen an Lichtgittern. Für diese Beugung gilt dann genauso das Bragg-Gesetz (Abb. 11)

$$\lambda_{\text{Atom}} = 2d_{\text{Licht}} \sin\theta,$$

wobei λ_{Atom} die de Broglie-Wellenlänge der Natriumatome ist. In unserem Fall ergibt sich $\lambda_{\text{Atom}} = 0.2$ nm. Nach dem Bragg-Gesetz tritt unter dem Winkel 2θ ein gebeugter Strahl auf. Die in der Beobachtungsebene gemessene Verteilung der gebeugten Natriumatome entspricht dann tatsächlich der durch die Braggbeziehung vorhergesagten Ablenkung (Abb. 11).

Besonders bemerkenswert an diesem Experiment ist die Tatsache, daß hier die de Broglie-Wellenlänge der Atome (0.2 nm) bereits signifikant kleiner ist, als der Durchmesser der Atome (3.8 nm). Mit diesen Strahlen wird man sicherlich in nächster Zeit Interferometer ganz analog zu den Neutroneninterferometern realisieren. Abgesehen davon, daß dies vom Prinzip her gesehen interessant wäre, gibt es für solche Interferometer viele schöne Anwendungsmöglichkeiten.

11 Abschließende Bemerkungen

Es gibt also bis heute ~~ein~~ eine sehr genauer Verifikation der Wellennatur der Materie. Bei all diesen Experimenten gab es bisher keinerlei Anzeichen für vielleicht einmal irgendwo auftretende Grenzen der Gültigkeit der Quantenmechanik und es ist für den Experimentator, der schließlich einen sehr direkten operationellen Zugang zur Quantenmechanik hat, im allgemeinen nicht notwendig, die Interpretationsprobleme zu diskutieren. Die Theorie der Messung in der Quantenmechanik hat auch bis heute praktisch keine experimentellen Konsequenzen. Das einzige, was der Experimentator benötigt, ist die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation¹. Die meisten Physiker sehen die de Broglie-Welle konzeptiv als durchaus anschauliche, fast realistische Welle, die dann allerdings nur über die Wahrscheinlichkeitsverteilung individueller Teilchen beobachtbar ist. Dass eine solche realistische Wellenmaterie nicht haltbar ist, wird im allgemeinen nicht realisiert.

Es ist eine experimentell interessante Herausforderung, sich der Verifikation von Wellenphänomenen auf immer größere Objekte auszudehnen. Nachdem dies bis heute bereits für relativ schwere Atome gelang, liegt die Ausweitung auf Moleküle auf der Hand und dürfte auch keine unüberwindlichen Schwierigkeiten bereiten. Selbstverständlich wird man zuerst mit Molekülen mit möglichst wenig inneren Freiheitsgraden beginnen und allmählich zu immer größeren Makromolekülen übergehen. Ob man einmal auf eine Grenze für die Beobachtung von Beugung und Interferenz stoßen wird und wo diese Grenze liegen könnte, ist heute vollkommen offen. Schrödinger² hat sich aber gegenüber einer möglichen Verwendung in einem Interferenzexperiment noch recht sicher fühlen.

¹ Statistische Interpretation der Quantentheorie nach Max Born. Vgl. A 2.2.1

A 2.3.3 Originaltext 3:

Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen
(1935)

Kann man die quantenmechanische Beschreibung der physikalischen Wirklichkeit als vollständig betrachten?

In einer vollständigen Theorie gibt es zu jedem Element der Realität stets ein entsprechendes Element. Eine hinreichende Bedingung für die Realität einer physikalischen Größe ist die Möglichkeit, sie mit Sicherheit vorherzusagen, ohne das System zu stören. In der Quantenmechanik schließt man sich von zwei physikalischen Größen, die durch nicht-kommutierende Operatoren beschrieben werden, das Wissen von der einen das Wissen von der anderen aus. Dann ist entweder (1) die Beschreibung der Realität, die durch die Wellenfunktion in der Quantenmechanik gegeben wird, nicht vollständig oder (2) diesen beiden Größen kann nicht gleichzeitig Realität zukommen. Die Betrachtung des Problems, Vorhersagen bezüglich eines Systems auf der Grundlage von Messungen zu machen, die an einem anderen System, das zuvor mit dem ersten in Wechselwirkung stand, ausgeführt wurden, führen auf das Ergebnis, daß wenn (1) falsch ist, dann auch (2) falsch ist. Man wird so zu dem Schluß geführt, daß die Beschreibung der Realität, wie sie von der Wellenfunktion geleistet wird, nicht vollständig ist.

1.

Jede ernsthafte Betrachtung einer physikalischen Theorie muß dem Unterschied zwischen objektiver Realität, die unabhängig von der Theorie ist, und den physikalischen Begriffen, mit denen die Theorie arbeitet, Rechnung tragen. Diese Begriffe sind dazu bestimmt, der objektiven Realität entsprechen, und mit Hilfe dieser Begriffe machen wir uns Vorstellungen von dieser Realität.

Um zu versuchen, den Erfolg einer physikalischen Theorie zu beurteilen, können wir uns zwei Fragen vorlegen:

(1) "Ist die Theorie korrekt?" und (2) "Ist die von der Theorie geleistete Beschreibung vollständig?"

Nur wenn beide Fragen positiv beantwortet werden können, kann die Theorie als befriedigend bezeichnet werden. Die Korrektheit der Theorie wird aus dem Grad der Übereinstimmung zwischen den Schlußfolgerungen der Theorie und der menschlichen Erfahrung beurteilt. Diese Erfahrung, die uns allein befähigt, auf die Wirklichkeit zu schließen, nimmt in der Physik die Gestalt von Experiment und Messung an. Der zweiten Frage wollen wir hier in bezug auf die Quantenmechanik nachgehen.

Welche Bedeutung man auch immer dem Ausdruck *vollständig* beimißt, folgende Forderung an eine vollständige Theorie scheint unumgänglich zu sein: *jedes Element der physikalischen Realität muß seine Entsprechung in der physikalischen Theorie haben*. Wir werden dies die *Bedingung der Vollständigkeit* nennen. Die zweite Frage ist daher leicht zu beantworten, sobald wir in der Lage sind zu entscheiden, welche die Elemente der physikalischen Realität sind.

Die Elemente der physikalischen Realität können nicht durch a priori philosophische Überlegungen bestimmt, sondern müssen durch Berufung auf Ergebnisse von Experimenten und Messungen gefunden werden. Eine umfassende

Definition von Realität jedoch ist unser Zielumsetzung. Wir werden uns mit dem folgenden Kriterium begnügen, das wir für vernünftig halten. Wenn wir, ohne auf irgendeine Weise ein System zu stören, den Wert einer physikalischen Größe mit Sicherheit (d.h. mit der Wahrscheinlichkeit gleich eins) vorhersagen können, dann gibt es ein Element der physikalischen Realität, das dieser physikalischen Größe entspricht. Obwohl dieses Kriterium bei weitem nicht alle Möglichkeiten, eine physikalische Realität zu betrachten, ausschließt, scheint es uns zumindest eine solche Möglichkeit zu bieten, wenn die in ihm festgelegten Bedingungen eintreten. Nicht als notwendige, sondern nur als hinreichende Bedingung betrachtet, steht dieses Kriterium im Einklang sowohl mit den klassischen als auch mit den quantenmechanischen Realitätsvorstellungen.

Um solche Vorstellungen zu veranschaulichen, wollen wir die quantenmechanische Beschreibung des Verhaltens eines Teilchens mit einem einzigen Freiheitsgrad betrachten.

(...)

Ergänzung:

In einer neuen Nummer des *American Journal of Physics* (Am. J. Phys. **62** (2), February 1994, 109) findet man einen stark mathematischen Artikel, der folgendermassen angekündigt wird:

Bell's theorem and quantum mechanics

Nathan Rosen

Department of Physics, Technion, Haifa 32000, Israel

(Received 9 August 1993; accepted 1 October 1993)

Bell showed that assuming locality leads to a disagreement with quantum mechanics. Here the nature of the nonlocality that follows from quantum mechanics is investigated.

Note by the editor - Readers will recognise Professor Rosen, author of this paper, as one of the co-authors of the famous EPR paper, Albert Einstein, Boris Podolsky, and Nathan Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be considered Complete?"

A 2.3.4 Text 4:

P.C.W. Davies und J.R. Brown

Der Geist im Atom

Bells Theorem

Als John Bell 1965 an dem Problem von aus zwei Teilchen bestehenden Quantensystemen arbeitete, gelang es ihm, ein grundlegendes mathematisches Theorem zu beweisen, das, wie sich zeigte, für eine praktische Versuchsanordnung von entscheidender Bedeutung war. Die Theorie beschließt sich nicht mit der Natur der Teilchen oder der auf sie einwirkenden Kräfte, sondern bezieht sich nur auf logische Regeln, denen alles vorgelegt unterworfen sind. So könnte, um dafür ein praktisches Beispiel zu geben, eine Volkszählung in England wohl kaum zu dem Ergebnis kommen, daß die Zahl aller Schwarzen größer ist als die Zahl der schwarzen Männer plus die Zahl der Frauen aller Rassen.

Bell forschte die Korrelationen, die zwischen den Ereignissen von an zwei Teilchen gleichzeitig durchgeführten Messungen bestehen konnten. Ob es sich dabei um Impuls, Spin, Polarisierung oder andere dynamische Eigenschaften von Teilchen handelte, spielte keine Rolle. Viele Forscher haben die Polarisierung als geeignetes Beispiel für die Untersuchung von EPR-Korrelationen gewählt. Wenn ein Teilchen mit einem Drehimpuls null in zwei Photonen A und B zerfällt, so müssen aufgrund von Erhaltungssätzen beide Photonen die gleiche Polarisierung aufweisen. Messungen in einer bestimmten gemeinsamen Richtung, sagen wir, durch senkrecht zu den Teilchenbahnen angebrachte Polarisationsmeßgeräte, bestätigen dies. Hat das Teilchen A den Polarisator passiert, hat dies immer auch das Teilchen B getan - das kann man in der Tat feststellen. Wir sprechen hier von Korrelation von 100 %. Stehen im umgekehrten Fall die Polarisationsfilter senkrecht zueinander, wird B jedesmal blockiert, wenn A passieren konnte. In diesem Fall liegt eine negative Korrelation von 100 % vor. Daran ist nichts Geheimnisvolles, es entspricht vollkommen der klassischen Mechanik.

Zum entscheidenden Versuch kommen wir, wenn die Polarisationsfilter in beliebigem Winkel zueinander stehen. Hier rechnen wir mit Ergebnissen, die irgendwo zwischen vollständiger Korrelation und völliger negativer Korrelation liegen, je nach dem gewählten Winkel. Die Winkel können einer Messung zur nächsten ganz willkürlich zwischen der parallelen und der senkrechten Position gewechselt werden.

Bell forschte nun, bis zu welchen theoretischen Grenzen solche Meßergebnisse korrelieren können. Nehmen wir zum Beispiel an, Einstein hätte im Grunde recht gehabt, und das Verhalten der Quantenteilchen wäre wirklich auf einen Urgrund chaotisch wirkender klassischer Kräfte zurückzuführen, und nehmen wir weiter an, daß eine Signalübertragung nichtlichtgeschwindigkeit gemäß den Regeln der Relativitätstheorie ausgeschlossen ist. Die erste Annahme entspricht, genau gesagt, dem, was wir für gewöhnlich verstehen, denn sie besagt, daß Quantenteilchen in einem genau umrissenen Sinn all diese dynamischen Eigenschaften in jedem Zeitpunkt wirklich besitzen. Die zweite Annahme wird genannt, zuweilen auch, weil sie ausschließt, daß Objekte Augenblicklich gegenseitig physisch beeinflussen, wenn sie umeinander getrennt, d. h. nicht am gleichen Ort sind.

Unter der doppelten Voraussetzung und der Annahme, daß die herkömmlichen Regeln logischen Denkens nicht auf dem Feld der ungewissen Quantenwelt zerschellen, gelang es Bell, eine unüberwindliche Grenze für die mögliche Korrelation der Ergebnisse von an zwei Teilchen gleichzeitig vorgenommenen Messungen auszumachen. Der Witz der ganzen Sache besteht in

folgendem: sagt voraus, daß der Grad der bereinstimmung Bells Grenze unter bestimmten Bedingungen überschreitet. Das aber heißt, daß die konventionelle Betrachtung der Quantenmechanik von einem Grad des Zusammenwirkens (oder der Konspiration) zwischen getrennten Systemen ausgeht, der über das in jeder Theorie logisch Zulässige hinausgeht. Damit ebnet Bells Theorem den Weg zu einer unmittelbaren Prüfung der Grundlagen der Quantenmechanik und zu der endgültigen Entscheidung zwischen Einsteins Vorstellung einer Welt und Bohrs Entwurf einer geisterhaften Welt voller subatomarer Verschwörung.

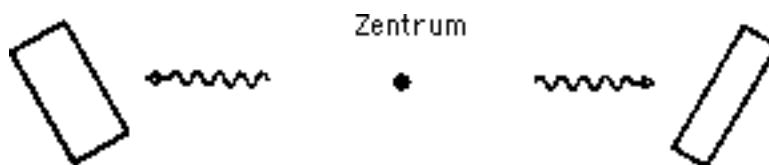


Abb. 6: Das Bellsche Theorem sagt für zwei Photonen, die von einem gemeinsamen Zentrum in entgegengesetzte Richtungen fliegen, eine Grenze der Korrelation vor, die an jedem von ihnen einzeln vorgenommenen Polarisationsmessungen voraus.



Das Experiment von Aspect

Zur Prüfung der Bellschen Ungleichung wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt. Über das bisher erfolgreichste haben A. Aspect, J. Dalibard und G. Roger im Dezember 1982 berichtet (Physical Review Letters, Bd. 49, S. 1804).

Bei diesem Experiment wurden Polarisationsmessungen an ~~einem~~ (korrelierter- A. d. .) Photonen durchgeführt, die gleichzeitig aber in entgegengesetzter Richtung aus einem einzigen Quantenübergang von Calciumatomen emittiert wurden. Die Versuchsanordnung ist in Abb. 7 dargestellt.

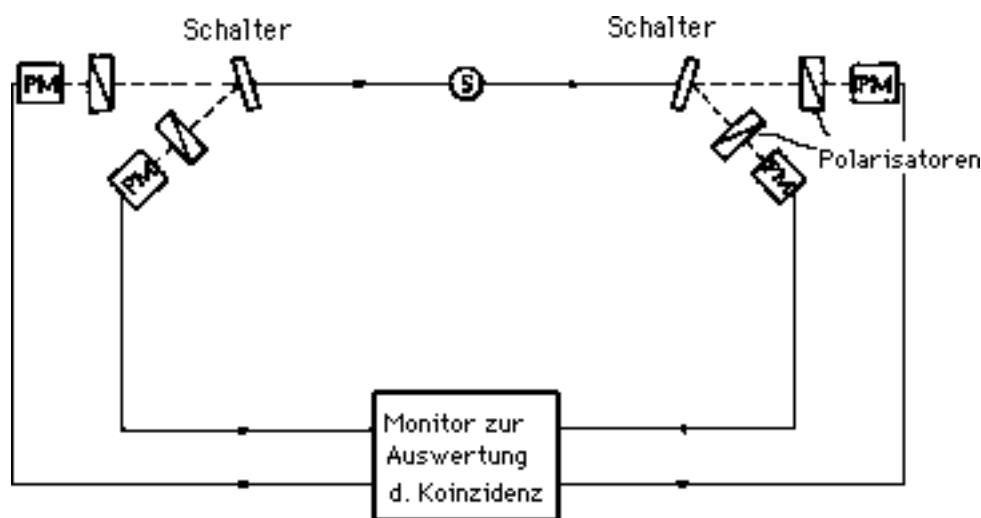


Abb. 7: Die Anordnung des Versuchs von Aspect. Aus der Quelle S emittierte Photonenpaare fliegen einige Meter in entgegengesetzte Richtungen auseinander, bevor sie auf die elektro-optischen Schalter treffen. Je nachdem, in welche Richtung sie durch die Schalter gelenkt werden, treffen sie auf je verschieden ausgerichtete Polarisationsfilter. Die Photonen werden durch Photomultiplier (PM) registriert. Die Koinzidenzen zwischen den verschiedenen Flugbahnen elektronisch ausgewertet.

Die Photonenquelle S besteht in diesem Schema aus ~~Strahlen~~ von Calcium-Atomen, die von einem Laserpaar (als durch Zweiphotonen-Anregung) angeregt wurden, bis sie den Zustand S erreichten, aus dem eine Rückkehr in den Grundzustand nur über eine Zweiphotonen- möglich ist. Ungefähr 6 m entfernt war zu beiden Seiten der Quelle ein elektrooptischer Schalter angebracht. Das Prinzip, nach dem diese Schalter funktionieren, beruht darauf, daß der Brechungsindex des Wassers sich mit dem Druck leicht verändert.

Mithilfe von entgegengesetzt ausgerichteten Umwandlern wurde in der Wasserföllung der Schalter eine stehende Ultraschallwelle von 25 MHz erzeugt. Ließ man die Photonen nahezu unter dem kritischen Winkel der Totalreflexion auf den Schalter auftreffen, konnte man bei jeder Halbperiode der Schallschwingung (also bei 50 MHz) von geradem Durchlaß auf Reflexion umschalten.

Die Photonen wurden entweder unbeeinflusst oder abgelenkt aus den Schaltern austretenden Photonen trafen danach auf Polarisatoren, von denen sie mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit entweder durchgelassen oder absorbiert wurden. Dabei waren die Polarisationsfilter gegenüber den Polarisationsrichtungen der Photonen in verschiedenen Winkeln eingestellt. Das Schicksal der Photonen wurde anschließend durch Photomultiplier registriert, die hinter den Polarisationsfiltern angebracht waren. Diese Anordnung war auf beiden Seiten der Emissionsquelle die gleiche.

Die eigentliche Messung bestand darin, jedes einzelne Photonenpaar elektronisch zu registrieren und seinen Korrelationsgrad zu ermitteln. Das Besondere und Entscheidende an diesem Experiment besteht in der Möglichkeit, nach dem Zufallsprinzip den weiteren Verlauf der Flugbahn der Photonen zu beeinflussen, d. h. in Richtung des einen oder anderen Polarisationsfilters zu lenken. Das aber ist gleichbedeutend mit einer derart kurzzeitigen Änderung in der Ausrichtung der Polarisationsfilter zu beiden Seiten der Emissionsquelle, daß in diesem Zeitraum kein Signal, selbst mit Lichtgeschwindigkeit, von einem Polarisationsfilter zum anderen hätte gelangen können.

Die Umschaltzeit betrug jeweils etwa 10 Nanosekunden ($ns = 10^{-8}$ sec.) gegenüber der Emissionsdauer der Photonenpaare (5 ns) und der relativ langen Flugdauer (40 ns). Tatsächlich erfolgte das Umschalten jedoch nicht streng nach dem Zufallsprinzip. Die stehenden Wellen wurden unabhängig voneinander bei verschiedenen Frequenzen erzeugt. Diese Abweichung gegenüber einer idealen Anwendung des Zufallsprinzips kann jedoch vernachlässigt werden, will man nicht von extrem ausgeklügelten -Theorien in Verbindung mit verborgenen Variablen ausgehen.

Wie die Autoren berichten, betrug die normale Versuchsdauer 12'000 Sekunden (also mehr als 3 Stunden) und verteilte sich gleichmäßig auf die eben beschriebene Versuchsanordnung, auf eine weitere ohne Polarisationsfilter und auf eine dritte, bei der ein Polarisationsfilter auf jeder Seite fehlte.

A 2.3.5 Originaltext 5:

Erwin Schrödinger (1935)

Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik

Inhaltsübersicht:

- / 1. Die Physik der Modelle.
- / 2. Die Statistik der Modellvariablen in der Quantenmechanik.
- / 3. Beispiele für Wahrscheinlichkeitsvoraussagen.
- / 4. Kann man der Theorie ideale Gesamtheiten unterlegen?
- / 5. Sind die Variablen wirklich verwaschen?
- / 6. Der bewusste Wechsel des erkenntnistheoretischen Standpunktes.
- / 7. Die Ψ -Funktion als Katalog der Erwartung.
- / 8. Theorie des Messens, erster Teil.
- / 9. Die Ψ -Funktion als Beschreibung des Zustandes.
- / 10. Theorie des Messens, zweiter Teil.
- / 11. Die Aufhebung der Verschränkung. Das Ergebnis abhängig vom Willen des Experimentators.
- / 12. Ein Beispiel
- / 13. Fortsetzung des Beispiels: alle möglichen Messungen sind eindeutig verschränkt.
- / 14. Die Änderung der Verschränkung mit der Zeit. Bedenken gegen die Sonderstellung der Zeit.
- / 15. Naturprinzip oder Rechenkunstgriff?

/ 1. Die Physik der Modelle.

In der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts war aus den großen Erfolgen der kinetischen Gastheorie und der mechanischen Theorie der Wärme ein Ideal der exakten Naturbeschreibung hervorgewachsen, das als Krönung jahrhundertelangen Forschens und Erfüllung jahrtausendealter Hoffnung einen Höhepunkt bildet und das klassische heißt. Dieses sind seine Züge.

Von Naturobjekten, deren beobachtetes Verhalten man erfassen möchte, bildet man, gestützt auf experimentellen Daten, die man besitzt, aber ohne der intuitiven Imagination zu weichen, eine Vorstellung, die in allen Details genau ausgearbeitet ist, viel genauer als irgendwelche Erfahrung in Ansehung ihres begrenzten Umfangs je verbergen kann. Die Vorstellung in ihrer absoluten Bestimmtheit gleicht einem mathematischen Gebilde oder einem geometrischen Figur, welche aus einer Anzahl von Bestimmungsstücken ganz und gar berechnet werden kann; wie z.B. an einem Dreieck eine Seite und die zwei ihr anliegenden Winkel, als Bestimmungsstücke, den dritten Winkel, die anderen zwei Seiten, die drei Höhen, den Radius des eingeschriebenen Kreises usw. mit bestimmen.

(...)

/ 5. Sind die Variablen wirklich verwaschen?

(...)

Man kann auch ganz burleske Figuren konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Hüllmaschine (die man gegen

den direkten Zugriff der Katze sichern muß): in einem Geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, daß im Lauf einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt ein Relais ein Hammerchen, das ein Kärtchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst berlassen, so wird man sich sagen, daß die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Zerfall ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiften haben. Die ψ -Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, daß in ihr die lebende und die tote Katze (s.w.u.) zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind.

Das Typische an diesen Fällen ist, daß sie ursprünglich auf den Atombereich beschränkte Unbestimmtheit sich in grobsinnliche Unbestimmtheit umsetzt, die sich dann durch direkte Beobachtung entscheiden läßt. Das hindert uns, in so naiver Weise ein "verwaschenes Modell" als Abbild der Wirklichkeit gelten zu lassen. An sich enthielte es nichts Unklares oder Widerspruchsvolles. Es ist ein Unterschied zwischen einer verwackelten oder unscharf eingestellten Photographie und einer Aufnahme von Wolken und Nebelschwaden.

/ 6. Der bewußte Wechsel des erkenntnistheoretischen Standpunkts

Im vierten Abschnitt hatten wir gesehen, daß es nicht möglich ist, Modelle glatt zu übernehmen und den jeweils unbekannten oder nicht genau bekannten Variablen doch auch bestimmte Werte zuzuschreiben, die wir bloß nicht kennen. Im / 5 sahen wir, daß die Unbestimmtheit auch eine wirkliche Verwaschenheit ist, denn es gibt jeden Fall, wo eine leicht aufführbare Beobachtung die fehlende Kenntnis verschafft. Was bleibt nun übrig? Aus diesem sehr schwierigen Dilemma hilft sich oder uns die herrschende Lehrmeinung durch Zuflucht zur Erkenntnistheorie. Man bedeutet uns, dass kein Unterschied zu machen sei zwischen dem wirklichen Zustand des Naturobjekts und dem, was ich darüber weiß, oder besser vielleicht *was*, ich darüber wissen kann, wenn ich mir Mühe gebe. *Wirklich* - so sagt man - sind ja eigentlich nur Wahrnehmung, Beobachtung, Messung. Habe ich mir durch sie in einem gegebenen Augenblick die bestmögliche Kenntnis vom Zustande des physikalischen Objekts verschafft, die naturgesetzlich erlangbar ist, so darf ich jede darüber hinausgehende Frage nach dem "wirklichen Zustand" als *gegenstandslos* abweisen, sofern *bezeugt* bin, daß keine weitere Beobachtung meine Kenntnis davon erweitern kann wenigstens nicht, ohne sie in anderer Hinsicht um ebensoviel zu schmälern (nämlich durch Veränderung des Zustandes, s.w.u.).

Dieser nun ein wenig Licht auf die Genesis der Behauptung, die ich am Ende von / 2 als etwas sehr weitgehend bezeichnete: daß alle Modellgrößen prinzipiell meßbar sind. Man kann dieses Glaubenssatzes kaum entraten, wenn man sich gezwungen sieht, den eben erwähnten philosophischen Grundsatz, dem als obersten Schirmherrn aller Empirie kein Verstandiger die Achtung versagen wird, als Diktator zu Hilfe zu rufen in den Neuen physikalischen Methodik.

Die Wirklichkeit widerstrebt der gedanklichen Nachbildung durch ein Modell. Man läßt darum den naiven Realismus fahren und stützt sich auf die unbezweifelbare These, daß *wirklich* (für den Physiker) letzten Endes nur die Beobachtung, die Messung ist. Dann hat hinfort all unser physikalisches Denken als einzige Basis und als einzigen Gegenstand die Ergebnisse prinzipiell ausführbarer Messungen, denn auf eine andere Art von Wirklichkeit auf ein Modell soll unser Denken sich ja jetzt ausdrücklich *nicht* mehr beziehen. Alle Zahlen, die in unseren physikalischen Berechnungen vorkommen, müssen für Maßzahlen erklärt werden. Da wir aber nicht frisch auf die Welt kommen und unsere Wissenschaft neu aufzubauen beginnen, sondern einen ganz bestimmten Rechenapparat in Gebrauch haben, von dem wir uns seit *großen* Erfolgen der Q.M. weniger denn je trennen möchten, sehen wir uns gezwungen, vom Schreibtisch aus zu diktieren, welche Messungen prinzipiell möglich sind, das

heißt möglich sein müssen, um unser Rechenschema ausreichend zu stützen. Dieses erlaubt einen scharfen Wert für jede Modellvariable einzeln (ja sogar für einen "halben Satz"), also muß jede einzeln beliebig genau meßbar sein. Wir dürfen uns nicht mit weniger begnügen, denn wir haben unsere naiv-realistische Unschuld verloren. Wir haben nichts als unser Rechenschema, um anzugeben, wo die Natur die Ignorabimus-Grenze zieht, d.h. was das bestmögliche Kenntnis vom Objekt ist. Und könnten wir das nicht, dann würde unsere Meßwirklichkeit doch etwa sehr vom Fleiß oder der Faulheit des Experimentators abhängen, wie viel Mühe er daran wendet, sich zu informieren. Wir müssen ihm also schon sagen, wie weit er kommen könnte, wenn er nur geschickt genug wäre. Sonst wäre ernstlich zu befürchten, daß es dort, wo wir das Weiterfragen verbieten, wohl doch noch einiges Wissenswerte zu fragen gibt.

(...)

40 Jahre später inspiriert dieser Bericht zur bekannten Figur

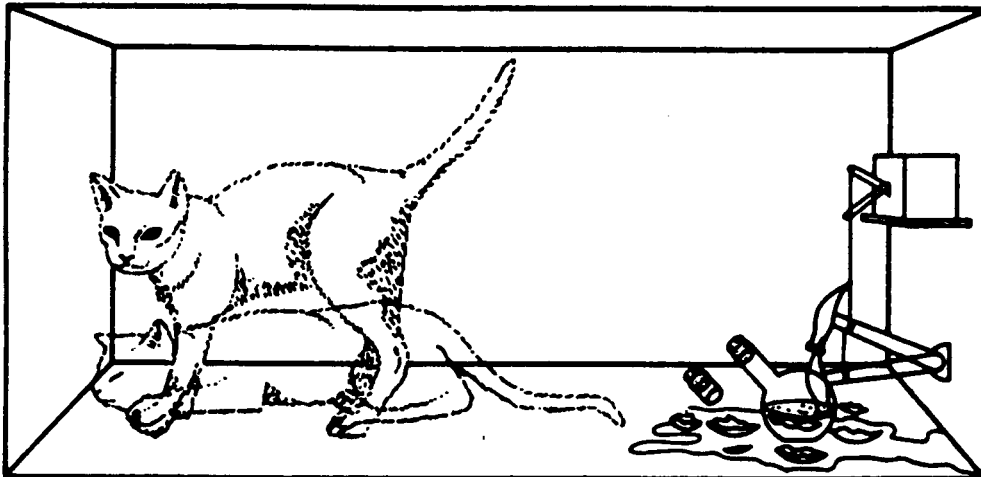


Abb. 9: Das Paradox von Schrödingers Katze. Die Anordnung mit dem Giftgerät zur Übertragung einer Überlagerung von Quantenzuständen auf eine makroskopische Ebene, die, wie es scheint, eine paradoxe Koexistenz einer lebenden und einer toten Katze in sich birgt (Aus: S. B. Dewitt (1970), Quantum mechanics and Physics today 23,9.).

Und noch heute ist die Geschichte nicht abgeschlossen ...

Lernkontrollen

Aufgabe A 2.1

Definition: "Der Laplacesche Dämon ist ein Geist, dem es dank seiner Kenntnis aller Naturgesetze (Kräfte...) und aller Anfangsbedingungen (d.h. Ort und Geschwindigkeit...) aller Teilchen im Universum gelingt, die Zukunft vorauszuberechnen." (Nach Pierre Simon Laplace, dem mathematischen Physiker, der Napoleon sagte, er habe Gott als Hypothese in seinem Weltbild nicht mehr nötig.)

Diskutieren Sie das in dieser Definition wichtige Thema "Voraussagbarkeit" anhand eines Polarisationsexperimentes mit Licht !

Reflektieren Sie in maximal zehn kurzen Sätzen zwei gegensätzliche Meinungen !

Aufgabe A 2.2

Wir wollen das Experiment von C. Alley et al. genauer anschauen. Suchen Sie dazu die Abbildung 4 aus dem Text A hervor.

Wenn der halbversilberte Spiegel B in den Strahlengang eingeschoben wird, gibt es zwei Situationen, die der Experimentator mit der Apparatur einstellen kann:

- Situation 0: keine Photonen bei Detektor 1, alle Photonen bei 2
- Situation 00: keine Photonen bei Detektor 2, alle Photonen bei 1

a) Geben Sie die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein einzelnes Photon bei Detektor 2 eintrifft: einerseits *ohne* Spiegel B, andererseits *mit* Spiegel B und Situation 0?

b) Betrachten Sie nun so ein Photon, das im Detektor 2 gemessen (werden) wird, in Gedanken. Der Spiegel B ist vorerst nicht zwischengeschaltet. Dieses Photon wird bei Spiegel A abgelenkt, und beim unteren M geradewegs in Richtung von Detektor 2 gespiegelt. Bevor aber das Photon den Kreuzungspunkt erreicht, entschliessen wir uns, den Spiegel B doch noch einzuschieben! Ist die Apparatur gemäss Situation 00 eingestellt, so wird das Photon nicht im Detektor 2, sondern im Detektor 1 registriert - und zwar mit 100 % Sicherheit. Das ist im Widerspruch zur Tatsache, dass das Photon nur mit 50 % Wahrscheinlichkeit bei einem halbdurchlässigen Spiegel abgelenkt wird! Wäre der Spiegel für die Situation 0 eingeschoben worden, so wäre dieses Photon 100 % sicherlich in 2 detektiert worden. Das Verhalten des Photons ist somit nicht nur von dem bestimmt, was innerhalb des Spiegels mit dem Photon passiert. Ob das Photon also mit 100 % Sicherheit gerade hindurch fliegt und in 2 oder mit 100 % Sicherheit abgelenkt und in 1 ankommt, weiss das Photon also schon, bevor der Spiegel B eingeschoben wird!

Wie erklären Sie im Sinne der Kopenhagener Interpretation diesen Widerspruch und das Verhalten des Photons?

Zur Beantwortung dieser Frage genügt es, zwei Aspekte, auf die die Kopenhagener Interpretation sich beruft, zu berücksichtigen; also höchstens sechs Sätze!

Aufgabe A 2.3

In Gedanken führen wir einige Male das EPR-Experiment durch und messen jedesmal den Ort des Teilchens. (Die genau gleichen Überlegungen gelten für den Impuls.)

Beantworten Sie Fragen a) bis d) ganz kurz in je ein, zwei Sätzen. Fragen e), f) und g) sollten ausführlicher behandelt werden, aber maximal je fünf kurze Sätze.

Beachten Sie, dass aus der Beobachtung des Teilchenortes zu einer bestimmten Zeit die Geschwindigkeit des Teilchens nicht berechnet werden kann, weil der Zeitpunkt des Zerfalls nicht genau bekannt ist.

- a) Messen wir das Teilchen jedesmal am selben Ort ?
- b) Was können wir also **vor** der Ortsbestimmung von Teilchen B über das Resultat der (später folgenden) Ortsmessung von Teilchen B aussagen ?
- c) Was können wir **vor** der Ortsbestimmung von Teilchen B über das Teilchen A aussagen ?
- d) Was können wir sofort **nach** der Ortsbestimmung von Teilchen B über das Teilchen A aussagen ?
- e) Was geschieht also während der Messung mit dem Teilchen A ? Was meint Einstein in bezug auf die Realität des Ortes von Teilchen A ?
- f) Was für eine Konsequenz bezüglich der physikalischen Realität des Ortes von Teilchen A kann aus der Tatsache geschlossen werden, dass Teilchen A im Zeitpunkt der Ortsmessung von B nicht kausal beeinflusst werden kann?
- g) Genau dieselben Überlegungen gelten nun für den Impuls von Teilchen A. Was bedeutet das für die Heisenbergsche Unschärferelation ?

Aufgabe A 2.4

Eine Dame und ein Herr besuchen in Monaco das Casino. Beide spielen Roulette, und zwar zusammen an einem Tisch dasselbe eine Spiel. Die Dame setzt auf Rouge, der Herr auf Noir; beide setzen je 100000 fFr. "Faites vos jeux ... les jeux sont faits !"

Nach dem Spiel verlassen beide in ihren eigenen Limousinen (mit schwarz getönten Scheiben) das Casino in verschiedenen Richtungen. Uns verrät man im Casino nur, dass die Kugel im betreffenden Spiel nicht auf Zero fiel.

Wie beim Gedankenexperiment von de Broglie (dasjenige mit den zwei Kammern und dem Elektron) wissen wir nicht, wo die 200000 fFr des Gewinners sind. Erst wenn wir einer der Limousinen nachfahren, sie stoppen und den Insassen befragen, erhalten wir Kenntnis darüber, ob das Geld in der gestoppten Limousine ist (oder nicht). Und *im selben Augenblick* erhalten wir auch Klarheit darüber, ob das Geld in der anderen Limousine nicht ist (oder doch ist). Dabei besteht eine Wahrscheinlichkeit von 50%, die 200000 fFr im gestoppten Wagen zu finden.

Was ist denn hier anders als beim Gedankenexperiment mit dem Elektron?

Antworten zu den Lernkontrollen

Aufgabe A 2.1

Betrachten wir einen polarisierten Lichtstrahl, der ein um 45 Grad geneigtes Polarisationsfilter passiert. Ob ein einzelnes Photon hindurchfliegt oder aufgehalten wird, kann im voraus nicht bestimmt werden; nur die Wahrscheinlichkeitsverteilung ist bekannt - nämlich 50 : 50. Gemäss der Kopenhagener Interpretation ist eine Voraussage also überhaupt nicht möglich.

In einer Theorie mit verborgenen Variablen allerdings würden die Grössen der Variablen bestimmen, ob das Photon durchgeht oder nicht. Damit wäre der Ausgang des Experimentes festgelegt. Wenn dem Laplaceschen Dämon nun diese verborgenen Variablen bekannt wären, könnte er voraussagen, ob ein Photon passieren wird oder nicht.

Aufgabe A 2.2

- a)
- b) Der Fehler, der zum Widerspruch führt, liegt in der Annahme. Wir können ohne Überprüfung dem Photon keine Bahn zuordnen. Die ganze experimentelle Anordnung muss mit einbezogen werden in die Beschreibung des Photons und damit auch der Interferenzeffekt für ein einzelnes Photon. Jede experimentelle Beobachtung des Photons im unteren Strahlengang würde die Interferenzerscheinung zerstören, so dass tatsächlich beim Spiegel B wieder 50% Ablenk Wahrscheinlichkeit auftreten würde.

Aufgabe A 2.3

- a) Nein. Es gibt eine Wahrscheinlichkeitsverteilung .
- b) Für jedes Messresultat besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit.
- c) Da wir aus dem Resultat der Ortsmessung von B auf den Ort von A schliessen können, besteht eine analoge Wahrscheinlichkeitsverteilung des Ortes von A.
- d) Die Ortsmessung von B reduziert die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Ortes von A *sofort* auf einen Punkt. Das Ergebnis einer Ortsbestimmung von A ist also voraussagbar.
- e) Im Moment der Messung von B reduzieren sich die verschiedenen Ortsmöglichkeiten von A genau auf eine. Die Sicherheit, mit welcher der Ort von A vorausgesagt werden kann, ist für Einstein *das* Argument dafür, dass der Ort von A physikalisch wirklich ist (oder eine Entsprechung in der Wirklichkeit findet) - und zwar **ohne** Messung von Teilchen A. Dies steht im Gegensatz zur Kopenhagener Interpretation, die eine beobachtungsunabhängige Realität verneint. Die physikalische Realität des Ortes von A stellt sich *sofort* bei der Messung von B ein.
- f) Da die Beobachtung von B das Teilchen A nicht sofort beeinflussen kann (keine Wirkung ist schneller als Licht - so die Relativitätstheorie) ist wohl der Ort von A schon **vor** der Messung von B physikalisch wirklich. Wir können den Gedanken weiterführen und dem Ort von A überhaupt **ohne** Ortsmessung von B eine Realität zukommen lassen - der Ort von A ist dann zwar unbekannt, aber objektiv wirklich.
- g) Das genau Gleiche gilt für den Impuls von Teilchen A: Auch er ist schon ohne Impulsmessung an B eine physikalische Realität. Wir könnten (Konjunktiv!) also den Impuls von B auf $\Delta p = h/2$ genau messen, d.h. der Impuls von A **ist** auf mindestens $\Delta p = h/2$ genau eine physikalische Realität. Oder wir könnten den Ort von B auf genau messen, so **ist** doch auch der Ort von A mindestens auf $\Delta x = h/2$ genau eine physikalische Realität. Also gilt in Wirklichkeit: $\Delta x \Delta p \ll h$, im krassen Widerspruch zur Heisenbergschen Unschärferelation!

Aufgabe A 2.4

Das Geld weist eine eindeutige objektive Resultat auf: entweder liegt es wohlverwahrt in der Limousine der Dame oder in derjenigen des Herrn. Dies bestätigt auch der Gewinner, dessen Hand die ganze Zeit auf der Geldtasche ruhte.

Das Elektron hingegen ist unberührbar, es enthält gemäss der Kopenhagener Interpretation seine Wirklichkeit in Raum und Zeit erst durch die existenzbestimmende Messung. Zuvor ist zwar etwas (das Elektron wird nicht aus dem Nichts erst geschaffen), aber dieses Etwas ist nicht an einem Ort. Vor einer Messung ist also das Elektron weder in der einen, noch in der anderen Kammer! Die positivistische Interpretation hält es für sinnlos, eine Aussage über das Elektron als etwas Wirklichem in Raum und Zeit vor einer Messung zu machen. Realistische Interpretatoren müssen zumindest akzeptieren, dass die "räumliche" Beschreibung einen nichtlokalen Charakter aufweist.

Glossar

Glossar

Liste mit Erläuterungen zu möglicherweise unbekannten Fachausdrücken.

kanonisch konjugierte Grössen

Beispiele: Ort und Impuls, Energie und Zeit, Drehimpuls und Drehwinkel.

Allgemein: zwei Variablen, deren Produkt die Dimension einer Wirkung (Js) besitzt.

Kanonisch konjugierte Grössen sind durch eine Unschärferealtion verbunden.

Ensemble

Gesamtheit, Menge von Quantenobjekten (Photonen, Elektronen, Neutronen, He-Atomen, ...), die gleich präpariert sind, d.h. die gleiche Verteilungen von Impuls, Polarisationsrichtung usw. aufweisen.

Wellenfunktion (auch: Zustandsfunktion)

Eine mathematische Funktion, die den Zustand eines Quantenobjekts beschreibt. Ihr Definitionsbereich ist oft der gewöhnliche, euklidische Raum; ihr Wertebereich ist zumeist mehrdimensional und sogar komplex. Das Quadrat der Wellenfunktion informiert über die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Quantenobjekts. Andere Terme mit der Wellenfunktion orientieren über weitere, experimentell messbaren Grössen, wie Impuls, Spin usw. Der Name Wellenfunktion kommt daher, dass für gewissen Situationen eine mathematische Analogie mit den Gleichungen für laufende oder stehende Wellen besteht (vergl. auch Additum 1).

a priori

von vorneherein

Korrelation

Beziehung zwischen (mindestens) zwei Grössen. Die Korrelation zwischen Mathematik- und Physiknoten ist üblicherweise sehr hoch; gar keine Korrelation besteht zwischen der Haarfarbe und der Physiknote. Eine negative Korrelation besteht zwischen dem Einkommen von Profifussballern und den Toren, die ihre Mannschaft kassiert hat.

2-Photonen-Kaskade

Ein Atom baut den Energieüberschuss in seiner Elektronenhülle dadurch ab, dass es zwei Photonen hintereinander aussendet.

Koinzidenz

Zusammenfallen. Raumzeitliche Koinzidenzen von Fahrzeugen auf der Strasse sind zu vermeiden ...