Das Interpretationsproblem der Quantentheorie

Gebhard Grübl
Institut für Theoretische Physik der Universität Innsbruck

July 3, 2001

Abstract

Transportiert der Kalkül der Quantentheorie das Bild einer Welt mit (scheinbar) eindeutig vorliegenden Sachverhalten? Nach 75 Jahren Diskussion gibt es immer noch keinen diesbezüglichen Konsens. Warum dies so ist, versuche ich dem Blick von außen darzustellen.[1]

[1] Vortrag, 22. November 2000, Arbeitskreis Wissenschaft und Verantwortlichkeit der Universität Innsbruck

Die Quantentheorie ist das moderne, mathematische Bild vom Verhalten der Materie. Sie entstand in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts als Reaktion auf das Versagen der klassischen Physik bei der Beschreibung von Atomen, Elektronen und Licht. Ihre Zuständigkeit konnte auf ein immer reichhaltiger werdendes Spektrum von Materiebausteinen ausgedehnt werden, und es zeigte sich auch, dass die Quantentheorie dort, wo ihre Konsequenzen verstanden sind, für viele Eigenschaften größerer, zusammengesetzter Systeme ein zutreffendes Bild liefert. Der wesentliche neue Zug im Verhalten mikroskopischer Materie ist, dass dieses nicht im Detail geregelt zu sein scheint. Nur die Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen lassen Regelhaftigkeit erkennen.

Ein mathematisches Bild der Wirklichkeit ist natürlich von den logischen Zusammenhängen zwischen den einzelnen Begriffen der Theorie stark geprägt. Darüberhinaus benötigt ein solches Bild aber auch Vorstellungen darüber, wie seine theoretischen Konzepte mit sinnlichen Erfahrungen in Zusammenhang zu bringen sind. Solche Vorstellungen - man nennt sie die Interpretation einer Theorie - machen erst eine mathematische Theorie zu einer physikalischen.

Im Fall der Quantentheorie ist nun für den wichtigen Begriff des Zustands umstritten, ob er für eine klare und widerspruchsfreie Interpretation der Theorie genügend reichhaltig ist. Diese Situation kam dadurch zustande, dass Zustände bei der Entwicklung der Quantentheorie nicht als primäre Objekte mit vorgegebener Rolle eingeführt wurden. Vielmehr drängten sich Zustände selbst im Schlepptau anderer Konzepte in die Theorie, was etwa folgendermaßen vor sich ging. Schrödinger bemerkte, dass einer bestimmten mathematischen Operation Zahlen zugeordnet sind, die mit den Frequenzen jenes Lichtes sehr genau übereinstimmen, das heißes, verdünntes Wasserstoffgas abstrahlt. Damit war klar, dass diese Operation einen wichtigen Zug von Wasserstoff richtig wiedergibt. Neben den genannten Zahlen sind Schrödingers Operation aber auch bestimmte Funktionen zugeordnet. Aus diesen "Wellenfunktionen" wurden schließlich auf Umwegen unsere heutigen Zustände. Sie sind also Bestandteil des Formalismus, waren aber eigentlich nicht bestellt.

Welche Rolle nehmen Zustände bei der Interpretation der Theorie ein? Die entscheidende Einsicht kam von Born. Er bemerkte, dass jeder Zustand einen unendlich großen Katalog von Wahrscheinlichkeiten[2] in sich trägt. Wahrscheinlichkeiten wovon? Wahrscheinlichkeiten von sinnlich wahrnehmbaren Zustandsänderungen großer Systeme, die dem Mikrosystem in den Weg gestellt sind, sogenannte Messwahrscheinlichkeiten sagt man heute meist. Solche Wahrscheinlichkeiten sind aber auch genau das, was reproduzierbar beobachtet werden kann. Damit war eine äußerst tragfähige Brücke zwischen Formalismus und Beobachtungen geschlagen. Aber eine unscharf formulierte Klassifizierung in große Systeme mit klassisch formulierten, wohldefinierten Eigenschaften und kleine Systeme ohne solche hat Eingang in die Interpretation der Theorie gefunden. Die darin verborgene Problematik, vor allem die Frage der logischen Konsistenz, ist das sogenannte Interpretationsproblem der Quantentheorie.

Die dominierende Interpretation der Quantentheorie, die Kopenhagener Interpretation, nimmt den minimalen Quantenformalismus beim Wort. Sie hält ihn für vollständig und nicht erweiterbar. Dies führt dazu, dass Begriffe, wie "Apparat", "Mes-

[2]Ein Zustand macht das Spektrum eines jeden s.a. Operators zum Wahrscheinlichkeitsraum.

sung" und "Beobachter" grundlegend für die Interpretation sind. Die prominentesten Verfechter dieser instrumentalistischen Auffassung waren Bohr, Born, Heisenberg und Pauli. Instrumentalisten halten das Interpretationsproblem solange für unwichtig, als es zu keinen Widersprüchen zwischen Bild und Wirklichkeit führt.

Prominente Kritiker des Kopenhagener Vollständigkeitsanspruches waren Einstein, Schrödinger, Dirac, Bohm und Bell. Viele der Zweifler können es nicht hinnehmen, dass mikroskopische Grundgesetze mittels unscharfer makroskopischer Begriffe interpretiert sind, und suchen nach einer Interpretation, die ohne "Beobachter", "Apparat" und "Messsung" auskommt. Sie nehmen das Interpretationsproblem ernst und werten es als Indiz dafür, dass etwas mit der Quantentheorie noch nicht ganz in Ordnung ist. Meist sehen sie seine Lösung nur im Zusammenhang mit einer Vervollständigung oder sogar substantiellen Abänderung der Theorie.

Ich will nun die Standardinterpretation der Quantenzustände am wohl einfachsten Fall, dem Fall eines Spin-1/2 Systems im Magnetfeld, etwas genauer beschreiben. Ein besonders aufschlussreiches Experiment wurde erstmals 1920 von Stern und Gerlach durchgeführt. Silberatome werden dabei entlang einer geraden Laufstrecke durch eine Region mit einem senkrecht zur Laufstrecke gerichteten und etwas ungewöhnlich geformten Magnetfeld geschossen. (Figur 1) Am Ende der Laufstrecke ist eine Photoplatte dem Atomstrahl in den Weg gestellt. Es zeigt sich, dass die Platte nur in zwei ziemlich eng begrenzten - in Figur 1 elliptisch angedeuteten - Zonen geschwärzt wird. Jedes Atom erzeugt einen schwarzen Punkt in einer der beiden Zonen. Es ist, als würde jedes Atom aus seiner anfänglichen Laufrichtung um einen ziemlich scharf festgelegten Winkel **entweder** in Richtung des Magnetfeldes **oder** entgegengesetzt dazu abgelenkt. Dieses Phänomen einer diskreten Auswahl aus einem Kontinuum denkbarer Optionen ist symptomatisch für die Mikrowelt. Auf das betonte, unverdächtige "entweder - oder" werde ich noch zurückkommen.

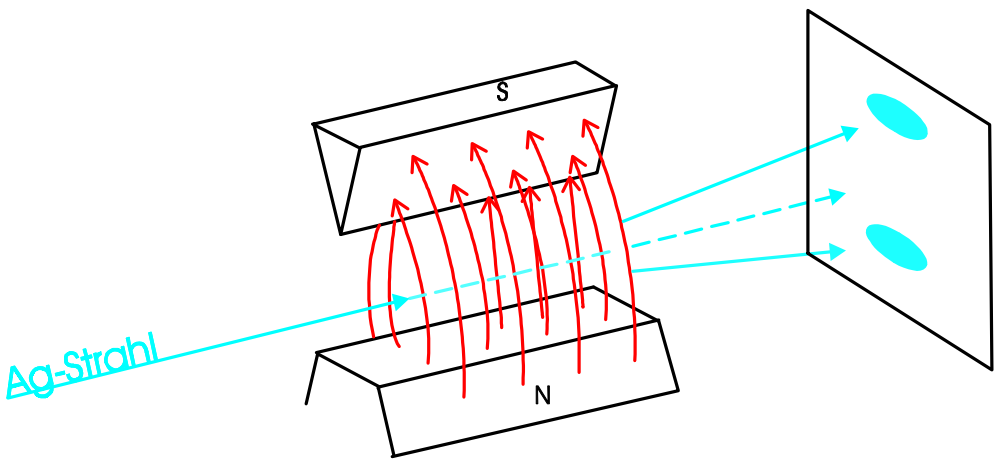

Fig.1: Aufspaltung eines Atomstrahls durch ein Magnetfeld

Die klassische Physik macht sich von diesem Vorgang das folgende Bild, das aber das tatsächliche Verhalten von Silberatomen in einigen wesentlichen Zügen völlig

falsch wiedergibt: Ein Silberatom ist ein winziger, elektrisch negativ geladener Kreisel, der rasch um eine Achse rotiert. (Figur 2) Wie eine Kompassnadel hat es ein magnetisches Moment, wenngleich ein winziges. Die Lage der Drehachse bleibt auch beim Durchgang durch das Magnetfeld (fast) unverändert. Die Ablenkung der Flugrichtung eines Kreisels im Magnetfeld ist durch seine Drehachse und Drehgeschwindigkeit bestimmt und ist proportional zum Cosinus des Winkels zwischen Drehachse und Magnetfeldrichtung. Es gibt also ein Kontinuum von Ablenkungen anstelle der nur zwei an den Silberatomen zu beobachtenden Möglichkeiten. Dass das Ausmaß der Ablenkung durch den Drehzustand des Kreisels determiniert ist, kann durch Hintereinandersetzen von Zonen unterschiedlich gerichteter Magnetfelder experimentell überprüft werden. (Figur 3) Dabei wird überdies klar, dass

- die Lage der Drehachse beim Durchlaufen der Zonen (fast) nicht geändert wird, und dass
- sich der Einfluss der Bahnbeobachtung auf den Verlauf der Bahn beliebig unbedeutend halten lässt.

Die Ablenkungen eines Kreisels durch drei unabhängig gerichtete Magnetfelder kann übrigens zur Bestimmung seiner Drehachse (und Drehgeschwindigkeit) genutzt werden. Auch hier besteht ein drastischer Unterschied zwischen dem Kreisel und einem Silberatom, denn an einem Silberatomen lässt sich keine Drehachse ermitteln. Und zwar aus folgendem Grund.

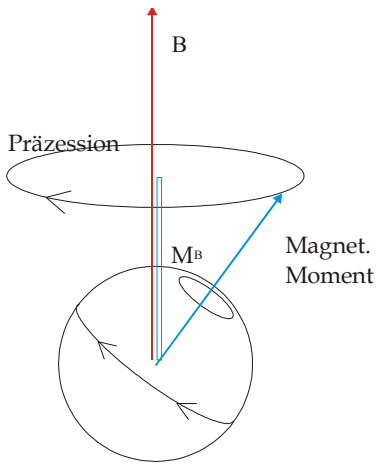

Fig. 2: Rotierende, negativ geladene Kugel als Magnet

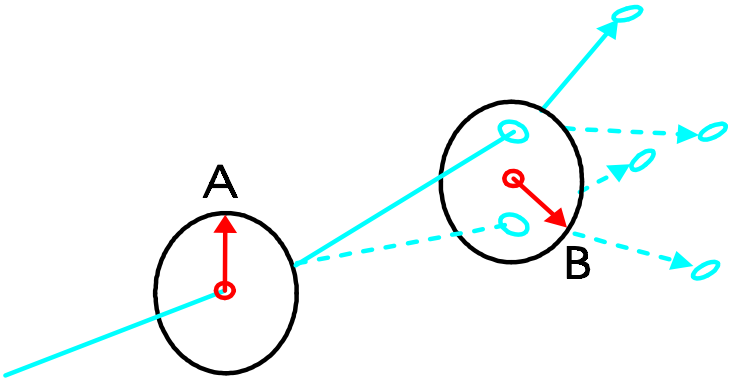

Fig. 3: Atomstrahl durch 2 Felder

Durchläuft ein Silberatom z.B. sukzessive drei Magnetfeldzonen mit jeweils nachgesetzten Detektoren zur Feststellung der Ablenkung, zuerst A, dann B und schließlich nochmals A, dann wird es in jeder Zone auf eine von nur zwei möglichen Weisen abgelenkt. Während der klassische Kreisel beim ersten und zweiten Durchtritt durch das Feld A in gleicher Weise abgelenkt wird, ist dies bei den Silberatomen normalerweise nicht der Fall (sofern A und B nicht parallel sind). Es ist, als hätte das Feld B das Atom vergessen lassen, wie es auf das Feld A beim ersten Durchtritt reagiert hatte.[3] Es tritt nur eine probabilistische Gesetzmäßigkeit zutage, die das "durchschnittliche" Verhalten eines Silberatoms regelt. Sie lautet so: Es bezeichne $W(A+ \mid B+)$ die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses "Das Silberatom wird vom Magnetfeld B in Feldrichtung abgelenkt, vorausgesetzt, dass es vorher beim Durchlaufen von A ebenfalls in Feldrichtung abgelenkt wurde". Analog bezeichne $W(A+ \mid B+; A-)$ die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses "Das Silberatom wird vom Magnetfeld B in Feldrichtung abgelenkt, und dann von A gegen die Feldrichtung abgelenkt, vorausgesetzt, dass es vor Durchlaufen von B vom Feld A in $+$ Richtung abgelenkt wurde. Dann gilt

$$W(A+ \mid B+; A-) = W(A+ \mid B+) \cdot W(B+ \mid A-) > 0.$$

Es ist, als hinge das jeweils momentane Atomverhalten nur vom letzten vorangehenden Frage - Antwortpaar ab. Dieses "vergessliche" Verhalten eines Atoms verhindert, dass eine Atomdrehachse ermittelt werden kann. Im Rahmen der Quantentheorie gibt es sie auch gar nicht im Fundus an Begriffen. Es gibt nur eine mittlere Drehachse.[4]

Stellen wir uns die möglichen Richtungen eines Stern Gerlach Magnetfeldes als Positionen des Stundenzeigers einer Uhr vor, dann ergibt sich das folgende Bild. Ein Blinder möchte von einem Sehenden - dem Silberatom - die Zeit erfragen. Der Sehende ist einsilbig und beantwortet Fragen nur mit "ja" oder "nein". Daher kann der Blinde nur Fragen des Typs "Zeigt deine Uhr N Uhr an?" stellen. Der Blinde erlebt z.B.

[3] Schrödinger benutzte die Metapher des nervösen Prüflings, der dieselbe Frage zu Beginn und am Ende einer Prüfung verschieden beantwortet, wenn er zwischendurch andere Fragen zu beantworten hat.

[4] In keinem Quantenzustand sind alle drei Drehimpulskomponenten streuungsfrei.

folgendes: Er erhält auf die Frage "Zeigt deine Uhr drei Uhr an?" die Antwort "ja". Sicherheitshalber fragt er sofort zur Kontrolle nach "Zeigt deine Uhr sechs Uhr an?". Zu seinem Erstaunen erhält er wieder die Antwort "ja". Nun fragt er nochmals "Zeigt deine Uhr drei Uhr an?" Nun erhält er die Antwort "nein". Der Sehende scheint zur Zeitauskunft unbrauchbar.

Die Quantentheorie beschreibt das Verhalten der Silberatome in Übereinstimmung mit den experimentellen Befunden folgendermaßen. Wenn ein Silberatom die Frage "Zeigt deine Uhr M Uhr?" mit "ja" beantwortet hat, dann hat es danach(!) einen Zustand, der durch den Pfeil v_M vom Zentrum des Ziffernblattes nach M hin dargestellt ist. Hat es mit "nein" geantwortet, dann hat es den Zustand zum entgegengesetzten Pfeil $-v_M$.[5] Wird ein Silberatom im Zustand v_M nach der Zeit N gefragt, so antwortet es mit einer Wahrscheinlichkeit $p(M,N)$ mit "ja". Es gilt

$$p(M,N) = \cos^2\left(\frac{\theta(M,N)}{2}\right) = \frac{1}{2}(1+\cos\left(\theta(M,N)\right),$$

wobei $\theta(M,N)$ der Winkel zwischen den beiden Pfeilen v_N und v_M ist. (Figur 4 zeigt die geometrische Bedeutung von $p(M,N)$. Die Zeiger M und N haben dabei die Länge 1.) Nur für $v_M = \pm v_N$ ist die Antwort auf die Frage M determiniert. In allen anderen Fällen gilt $0 < p(N,M) < 1$. Die Quantentheorie legt dann die Antwort im Einzelfall nicht fest, sondern lässt sie unbestimmt, und auch im Experiment ist keine Regelhaftigkeit, die über den Wert von $p(M,N)$ hinausgeht, zu erkennen.

Nach Beantwortung der Frage M hat das Silberatom - je nach Antwort - den Zustand v_M oder $-v_M$. Bei jeder neuen Frage nimmt das Atom einen der beiden zur gestellten Frage gehörigen neuen Zustände an und "vergisst" seine Vorgeschichte zur Gänze. Dieser Vorgang der Zustandsänderung durch "Vermessung" wird als "Quantensprung" oder "Zustandsreduktion" bezeichnet.

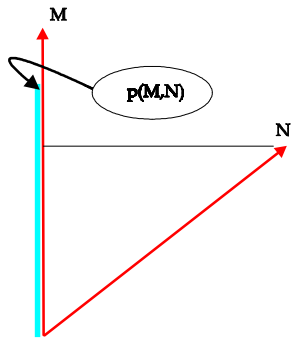

Fig. 4: p(M,N) ist die Länge des Balkens

Der durch einen Pfeil dargestellte Quantenzustand ist im Rahmen der Kopenhagener Interpretation nur ein verdichteter Katalog von Wahrscheinlichkeiten, mit denen makroskopische Detektionsereignisse nach Durchlaufen eines Stern Gerlach Magnetfeldes stattfinden. Darüber, was beim isolierten Atom der Fall ist, welche

[5] Dieser Vektor ist der Polarisationsvektor des Dichteoperators und nicht der Zustandsvektor im Hilbertraum des Modells!

Eigenschaften es in einer Welt hat, in der es alleine ist, darüber sagt der Zustand nichts aus. Und es wird von vielen als Tugend der Theorie aufgefasst, dass sie ohne solchen empirisch unzugänglichen Ballast auskommt. Wir werden jedoch sehen, dass derart radikale begriffliche Sparsamkeit auch Probleme mit sich bringt, wenn man glaubt, dass die Quantentheorie für alle Materie gilt. So entsteht dann z.B. das Problem, dass Schrödingers berüchtigte Katze weder lebt noch tot ist.

Auch die klassische Physik kennt Wahrscheinlichkeiten. Diese kommen jedoch ganz anders zustande als in der Quantentheorie. In der klassischen Physik hat jedes System einen Zustand, der für jede mögliche Systemeigenschaft eindeutig festlegt, ob diese vorliegt, oder nicht. (Ein Beispiel für eine solche Eigenschaft: Der Abstand zwischen zwei Massenpunkten ist größer als 1 Meter.) Solche Zustände heißen daher deterministisch - sie legen fest, was der Fall ist. Die in Frage kommenden Systemeigenschaften sind dabei für alle Zustände dieselben. Eine große Zahl von gleichen Systemen, deren (deterministische) Zustände voneinander verschieden sind, werden dann durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung am Zustandsraum der deterministischen Zustände beschrieben. Sie ergeben in der Folge z.B. die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Elektron in einem bestimmten Raumgebiet **ist**. Wahrscheinlichkeiten treten also nur in unvollkommen gleichförmigen Wiederholungen von Vorgängen in Erscheinung und sind keine unausweichliche Notwendigkeit. Vor allem sind sie kein Bestandteil der Grundgesetze einer klassischen Theorie.

Im minimalen Quantenformalismus hingegen gibt es keinen Raum von deterministischen Zuständen, auf dem eine Wahrscheinlichkeitsverteilung formuliert werden könnte. Es ist lediglich ein Zustandsbegriff eingeführt, der zu jeder möglichen makroskopischen Vermessung eine Wahrscheinlichkeitsverteilung auf der Menge der möglichen makroskopischen Reaktionsmöglichkeiten definiert. Deshalb wird z.B. formuliert "Dies ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Elektron in einem bestimmten Raumgebiet Δ einen Geigerzähler zum Knacken bringt" und nicht etwa "Dies ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Elektron in Δ befindet". Die Vorstellung nämlich, dass jedes Elektron zu jeder Zeit auch einen ganz bestimmten Ort hat, wird vom minimalen Formalismus nicht getragen. Vielfach wird sogar behauptet, dass der minimale Formalismus dieser Vorstellung widerspreche. Wir werden darauf zurückkommen. Damit drängen sich aber die folgenden Fragen auf:

- Lassen sich Quantenzustände als Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf bisher nicht eingeführten deterministischen Zuständen mit eindeutig definierten Eigenschaften auffassen? (Man nennt das eine klassische Simulation von Quantenzuständen.) Sind also die Wahrscheinlichkeiten der Quantentheorie Folge eines unvollständigen Zustandsbegriffs, und ist ein deterministischer Unterbau wie in der klassischen Physik **denkbar**? Einstein spitzte seine diesbezügliche Überzeugung zu auf die Formulierung "Gott würfelt nicht" und er drängte auf die Einführung verborgener Parameter zur Bildung von Zuständen mit systemimmanenten Eigenschaften.[6] Die Anhänger der Kopenhagener Interpretation halten die Wahrscheinlichkeit in der Quantentheorie für fundamental und auch bei Einzelsystemen für nicht eliminierbar. Sie bestehen darauf, dass es keine mit der

[6] Solche Eigenschaften nehmen keinen Bezug auf externe Messapparate und werden daher auch als objektiv bezeichnet.

Quantentheorie verträglichen Rezepturen geben könne, die einem Silberatom im Zustand v_M die Antworten auf alle möglichen Fragen vorgeben würden. Als Begründung werden bestimmte Quantenzustände angeführt, die einer klassischen Simulation äußerst merkwürdige Eigenschaften abverlangen.[7] So muss etwa eine instantane und abstandsunabhängige Fernwirkung[8] die hypothetischen deterministischen Vorgänge in Einzelsystemen steuern, wenn gewisse Mittelwerte der Quantentheorie klassisch simuliert werden sollen. Da solche Mechanismen aber der makroskopischen, relativistischen Physik fremd sind, werden sie auch im Bereich der Quanten vielfach für nutzlose Hirngespinste gehalten.

- Hat ein einzelnes Quantensystem einen Zustand oder hat nur eine große Zahl von Systemen einen Zustand? (Ensemble- oder Individualinterpretation) Die Ensembleinterpretation hat das Problem, dass eine große Zahl von Systemen als ein einziges großes System aufgefasst werden kann. Dieses hätte dann keinen Zustand.

- Allgemein wird heute unterstellt, dass die Quantentheorie auch für beliebig große, zusammengesetzte Systeme gültig ist. Und auch für solche Systeme formuliert die Quantentheorie keine Wahrscheinlichkeit dafür, dass dieses oder jenes der Fall ist, sondern dafür, dass erst bei einer "Beobachtung" von außen diese oder jene Ereignisse und somit eindeutige Faktenlagen eintreten. Was sagt dann die Quantentheorie über ein großes System, das alle Beobachter umfasst? Schrödinger karikierte diese Situation anhand einer Katze, deren Zustand die Vorstellung nicht rechtfertigt, dass sie entweder tot oder lebendig ist. Was ist in einem einzelnen, isolierten, unter Umständen makroskopischen Quantensystem eigentlich der Fall? Einstein fragte seinen Freund Born ungläubig: "Ist der Mond wirklich nicht da, wenn niemand schaut?" Die in der Theorie verankerte begriffliche Sparsamkeit macht eine Deduktion klassisch physikalischer Vorstellungen über alltägliche makroskopische Situationen bisher unmöglich.

Nun möchte ich auf das eingangs erwähnte "entweder - oder" zurückkommen. Es war die naheliegende Vorstellung, dass jedes Silberatom nach Verlassen des Magnetfeldes aber noch vor seinem Durchgang durch die Photoplatte **entweder** nach oben **oder** unten abgelenkt zu sein scheint. Ich werde schildern, welche Schwierigkeit der minimale Quantenformalismus mit dieser Vorstellung hat. Dazu eignet sich ein sogenanntes Interferometerexperiment. Derartige Experimente werden oft als empirischer "Beweis" dafür aufgefasst, dass wir den Ort mancher mikroskopischer Systeme nicht nur nicht kennen, sondern dass es ihn gar nicht gibt. Natürlich ist diese Deutung der Experimente theoriegeladen und nicht zwingend. (Die Bohmsche Mechanik z.B. gibt eine andere Deutung des Geschehens.) Jedenfalls sind die empirischen Befunde höchst überraschend und Feynman bezeichnete sie als das eigentliche und einzige Mysterium der Quantenphysik.

[7] Sätze von Bell und Kochen & Specker werden ins Treffen geführt.

[8] Diese fiktive "deterministische Nichtlokalität" fällt aus allen experimentell steuerbaren Mittelwerten heraus. Daher kann sie auch **nicht** zur Führung von Überlichtgeschwindigkeitstelefonaten genutzt werden und deshalb müssen wir uns bis auf weiteres mit den merkwürdigen Sprechpausen bei interkontinentalen TV-Interviews abfinden.

Mittels eines geeignet gewählten Magnetfeldes kann ein Silberatom, dessen Zustand auf 3 Uhr steht[9], um 90° aus seiner Laufrichtung nach oben abgelenkt werden. Ein Silberatom im Zustand 9 Uhr hingegen läuft geradeaus weiter. (Figur 5) Mithilfe von zusätzlichen Umlenkspiegeln kann die unten skizzierte Laufstrecke aufgebaut werden. (Figur 6) Ein drei Uhr Atom wählt mit Sicherheit den oberen Weg, während ein 9 Uhr Atom den unteren einschlägt. Dies kann mittels eines Kontrollpostens bei jeder Laufstrecke überprüft werden.

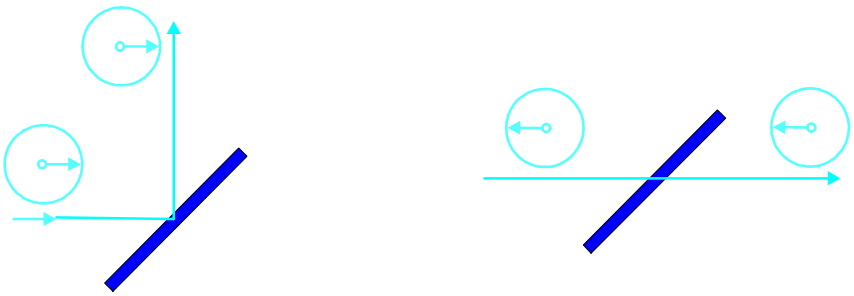

Fig. 5: Einstellung regelt Laufbahn

Nun wird ein 12 Uhr Atom durch die Apparatur mit den beiden Kontrollposten geschickt. Es registriert einer und nur einer der beiden Kontrollposten das Atom. Welcher der beiden Kontrollposten das Atom registriert, das kann die Quantentheorie nicht sagen. Sie sagt nur, dass jeder dies mit einer Wahrscheinlichkeit von 1/2 tut. Hinter dem Ausgang der Apparatur kann nochmals eine Zeitabfrage auf 3 Uhr errichtet sein. Sie bestätigt die Meldungen der Kontrollposten in folgender Weise. Registriert der Kontrollposten am 3 Uhr Weg das Atom, dann antwortet das Atom auf die Frage, ob es auf 3 Uhr steht, mit Sicherheit "ja", während ein vom 9 Uhr Posten registriertes Atom sicherlich "nein" antwortet. Wird die letzte Zeitabfrage aber auf eine Abfrage auf 12 Uhr abgeändert, so antworten die vom 3 Uhr Posten registrierten Atome mit Wahrscheinlichkeit 1/2 "ja". Dasselbe trifft für die vom 9 Uhr Posten registrierten Atome zu.

Nun werden die Kontrollposten abgezogen. Seltsamerweise hat dies eine drastische Auswirkung auf die Wahrscheinlichkeit der Antwort "ja" bei der Endabfrage auf 12 Uhr. Ein anfangs auf 12 Uhr gestelltes Atom antwortet nach Durchlaufen der Anordnung auf die 12 Uhr Frage nun "ja" mit der Wahrscheinlichkeit 1 anstelle der Wahrscheinlichkeit von 1/2 bei Anwesenheit der Kontrollposten. Eine schwache und vor allem kontinuierlich steuerbare Beeinflussung der Antwortwahrscheinlichkeit durch Kontrollposten ist ja durchaus plausibel, aber ein solch diskreter Alles oder Nichts Effekt ist überraschend. Im Formalismus der Theorie kommt dieser Effekt dadurch zustande, dass der Zustand eines 3(9) Uhr Atoms beim Durchlaufen der Anordnung ausschließlich am 3(9) Uhr Weg lokalisiert ist. Ein 12 Uhr Atomzustand

[9]D.h. das Atom wurde zuvor von einem Magnetfeld in 3 Uhr Richtung abgelenkt.

hingegen ist auf beiden Wegen lokalisiert. Ein 12 Uhr Zustand enthält in einem mathematisch einfach aber umgangssprachlich kaum zu beschreibenden Sinn sowohl den 3 Uhr als auch den 9 Uhr Zustand und er läuft auf beiden Wegen.

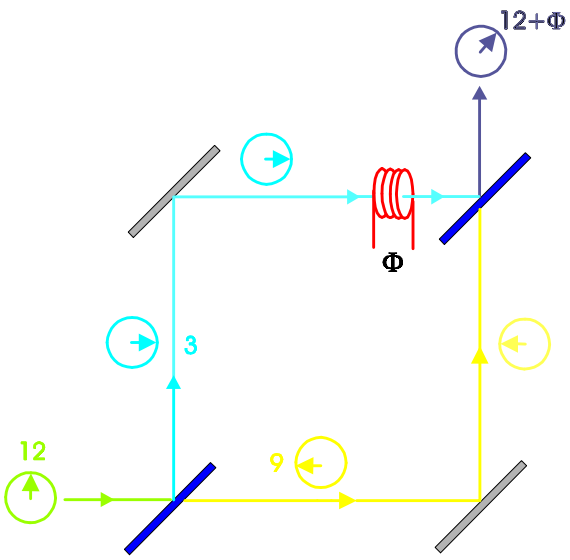

Fig. 6: Das 12 Uhr Atom nimmt beide Wege

Noch augenfälliger wird der Effekt durch Einfügen eines Magnetfeldes in 3 Uhr Richtung längs des 3 Uhr Weges. Es ist in Figur 6 durch eine Spule mit dem Namen Φ - wie Phasenschieber - angedeutet. Dieses Magnetfeld hat auf ein 3 Uhr Atom keine feststellbare Auswirkung und erst recht nicht auf ein 9 Uhr Atom, das ja gar nicht in die Nähe dieses Magnetfeldes kommt. Die Einstellung eines 12 Uhr Atoms jedoch wird von dem Magnetfeld, je nach Stärke des Feldes, z.B. auf 5 Uhr gestellt. Dies kann dann durch eine Abfrage auf 5 Uhr beim Interferometerausgang geprüft werden.

Wir sehen, dass der Zustand eines Atoms zwar auf einen makroskopischen Ortsbereich verteilt sein kann, dass das Atom aber trotzdem nicht gleichzeitig von zwei makroskopisch entfernten Kontrollposten registriert werden kann. Das Atom (oder auch Elektron etc.) scheint aus etwas Ausgedehnten und etwas Lokalisierten zu bestehen. Ausgedehnt ist das, was beide Wege durch das Interferometer nimmt, und lokalisiert ist das, was entweder den einen oder den anderen Zähler zum Knacken bringt.

Schrödinger versuchte die Unglaubwürdigkeit der Vorstellung, dass jedes 12 Uhr Atom tatsächlich auf beiden Wegen die Anordnung durchläuft, zu verdeutlichen. Um die Situation ins Absurde zu überhöhen, bediente er sich einer Katze, die er - natürlich nur in Gedanken - an einen Tötungsapparat koppelte, der vom Zustandsanteil des 12 Uhr Silberatoms am 3 Uhr Weg ausgelöst wird. Die arme Katze fungierte schlicht und einfach als Detektor. Die Ambivalenz des Atomzustands überträgt sich nach den

Regeln der Quantentheorie auf das gesamte System Atom plus Katze. Sie scheint zu sagen, dass die Katze sowohl tot als auch lebendig ist und nicht entweder tot oder lebendig. Der Quantensprung zum "entweder - oder" wird gemäß Kopenhagener Vorstellung erst durch externe Beobachtung herbeigeführt.

Welche Schwierigkeiten die klassisch physikalische Begriffswelt mit Interferometerexperimenten hat, das zeigt die folgende Analogie. Stellen Sie sich einen großen Saal mit zwei Eingängen und drei Stühlen in der Mitte des Saales vor. (Figur 7) Eine Versuchsperson wird gebeten, den Saal durch einen Eingang ihrer Wahl zu betreten und auf einem der Stühle Platz zu nehmen. Hat ein Proband Platz genommen, wird seine Platzwahl protokolliert, und er wird gebeten, den Saal zu verlassen. Dann wird die nächste Person zum Versuch aufgerufen. Zwischen den Versuchspersonen gibt es keine Kommunikation. Die Statistik der Torwahl bei einem Vorversuch hat gezeigt, dass von 1000 Personen 500 den linken und 500 Personen den rechten Eingang wählen. Nun wird das Experiment mit 1000 Personen hintereinander durchgeführt. Ohne dass die Versuchspersonen dies bemerken, wird ihre Torwahl beobachtet und protokolliert. Die Statistik zeigt, dass 250 Personen den linken, 250 Personen den rechten und 500 Personen den mittleren Stuhl wählen. Wird auf eine Beobachtung der Torwahl verzichtet, dann ändert sich die Platzwahlstatistik enorm. Es wählen 500 den linken, 500 den rechten und 0 Personen den mittleren Stuhl. **Offenbar beinflusst eine beliebig diskrete Beobachtung der Torwahl die durchschnittliche Platzwahl.**

Besonders grotesk erscheint die Lage, wenn die Beobachtung der Torwahl auf die folgende Weise automatisiert wird. In jedem Experiment ist nur eines der Tore geöffnet, ohne dass der Proband dies weiß. Die Tore sind durch Paravents so abgedeckt, dass man nur beim Duchgehen erkennen kann, ob ein Tor offen oder verschlossen ist. Versucht ein Proband den Saal durch ein geschlossenes Tor zu betreten, wird er aus dem Versuch genommen. Von 1000 Personen die bei geschlossenem rechten Tor am Versuch teilnehmen, scheiden 500 aus und die restlichen 500 betreten den Saal durch das linke Tor. Davon wählen 250 den linken, 250 den mittleren und 0 den rechten Stuhl. Von 1000 Personen die bei geschlossenem linken Tor am Versuch teilnehmen, betreten 500 den Saal durch das rechte Tor. 250 wählen den rechten, 250 den mittleren und 0 den linken Stuhl. Mittelung der beiden Fälle ergibt die Platzwahlwahrscheinlichkeiten

$$\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}.$$

Sind beide Tore geöffnet, und wird die Torwahl nicht beobachtet, dann sind die Platzwahlwahrscheinlichkeiten hingegen

$$\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}.$$

Offenbar beeinflusst das Offen- oder Geschlossensein des vom Probanden nicht benützten Tors seine durchschnittliche Platzwahl. Dieses Tor ist aber abgeschirmt und sein Öffnungszustand dem Probanden nicht bekannt. Wie kann dann seine Platzwahl vom Zustand des nicht benützten Tors abhängig sein? Eine wahrhaft gespenstische Fernwirkung. Sie ist der klassischen Physik (mit gutem Grund!) total fremd.

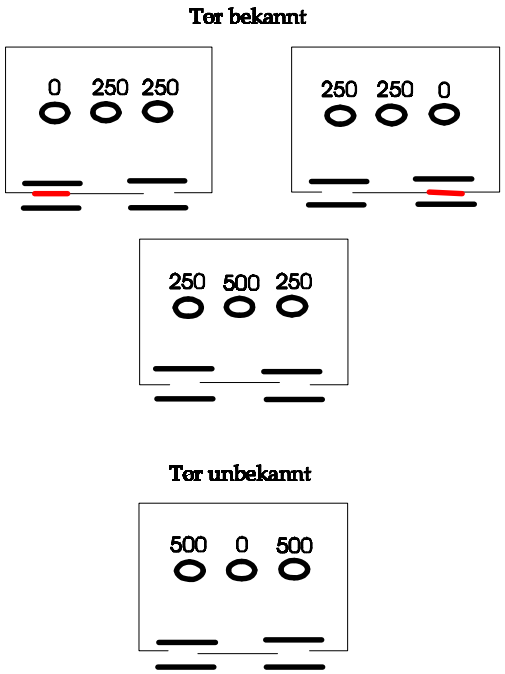

Fig. 7: Eine Platzwahlgroteske

Zwei allgemein verständliche, redliche Bücher zum Thema
D. Albert, Quantum Mechanics and Experience, Harvard Univ Press, 1992
D. Wick, The Infamous Boundary - Seven Decades of Controversy in Quantum Physics, Birkhäuser, 1995.

Herrn Dr. Peter Kügler, Institut für Philosophie der Universität Innsbruck, und meinem Institutskollegen Herrn Dr. Hans Embacher danke ich für ihre kritischen Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge zu einer ersten Version dieses Textes.