

B. Der Quantensprung

*Wer von der Quantentheorie nicht
schockiert ist, hat sie nicht verstanden*

Niels Bohr

Der Quantenbegriff⁶

Bedenkt man, dass die Quantentheorie seit mehreren Jahrzehnten existiert, dann ist es bemerkenswert, wie lange es gedauert hat, bis ihre verblüffenden Ideen bis zum physikalischen Laien durchsickerten. Doch wächst das Bewusstsein, dass diese Theorie einige erstaunliche Einblicke vom Wesen des Geistes und der uns umgebenden Wirklichkeit bereithält und dass bei der Suche nach einem Verständnis Gottes und des Daseins die durch die Erkenntnisse der Quantentheorie ausgelöste Revolution physikalischen Denkens ganz und gar einbezogen werden muss. Zahlreiche moderne Autoren finden enge Parallelen zwischen den in der Quantentheorie verwendeten Begriffen und denen des fernöstlichen Mystizismus, wie sie im Zen-Buddhismus zu finden sind. Doch welcher religiösen Überzeugung man auch immer anhängt, der Quantenbegriff lässt sich nicht ignorieren.

Bevor wir uns näher mit diesen Fragen beschäftigen, muss klargemacht werden, dass die Quantentheorie in erster Linie ein in der Praxis bewährter Zweig der Physik ist und

⁶Nach: Paul Davies: «Gott und die moderne Physik» C. Berthelsmann Verlag 1986

als solcher auf glänzende Erfolge verweisen kann. Sie hat uns den Laser beschert, das Elektronenmikroskop, den Transistor, den Supraleiter und die Kernkraft.

Obwohl sich nur wenige Physiker Gedanken über die seltsamen philosophischen Konsequenzen der Quantentheorie machen, zeigte sich deren wahrhaft geheimnisvolle Natur schon bald, nachdem sie formuliert war. Sie entstand aus Überlegungen, das Verhalten von Atomen und ihrer Bestandteile verstehen zu können, sie befasst sich also in erster Linie mit der Welt der kleinsten Teilchen.

Physiker wussten schon seit einer Weile, dass gewisse Vorgänge, wie beispielweise der radioaktive Zerfall von Materie, willkürlich und unvorhersagbar zu sein scheinen. Während eine ganze Ansammlung radioaktiver Atome den Gesetzen der Statistik gehorcht, lässt sich der exakte Augenblick, in dem ein bestimmter Atomkern zerfällt, nicht voraussagen. Diese grundsätzliche Unbestimmtheit gilt für alle atomaren und subatomaren Phänomene und erfordert zu ihrer Erklärung eine grundlegende Überprüfung der auf dem Alltagsverstand gründenden Ansichten. Bevor man in den ersten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts diese Unbestimmtheit entdeckte, hatte man angenommen, dass sich alle materiellen Objekte streng gemäss den Gesetzen der Mechanik verhalten, und dies erklärt dann z.B., warum die Planeten ihrer Bahn folgen und Geschosse ihr Ziel erreichen. Die darauf gründende Annahme, das Atom sei eine Art verkleinerte Ausgabe des Sonnensystems und seine Bestandteile bewegten sich mit der Präzision des Chronometers, stellte sich als irrig heraus. In den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts entdeckte man, dass die Welt des Atoms voller Unordnung und dunkler Untiefen ist. Bei näherer Betrachtung zerfließt die Materie des täglich Erfahrenen in einem Mahlstrom ungenauer Geisterbilder.

Unbestimmtheit ist eine fundamentale Aussage der Quantentheorie. Sie führt auf geradem Weg zur *Unvoraussagbarkeit* eines Ereignisses. Hat jedes Ereignis eine Ursache? Nur wenige Menschen würden das leugnen. Der Quantenbegriff jedoch scheint die

Kette zu unterbrechen, indem er Wirkungen eintreten lässt, die allem Anschein nach keine Ursache haben.

Schon in den zwanziger Jahren tobte der Meinungsstreit über den Sinn, der hinter dem unvoraussagbaren Verhalten der Atome steckt. Ist die Natur ihrem Wesen nach sprunghaft und lässt sie Elektronen und andere Teilchen einfach zufällig irgendwo auftauchen, ohne Grund und Erklärung - Ereignisse ohne Ursache? Oder tanzen die Teilchen wie Korken auf einem unsichtbaren Ozean mikroskopisch geringer Kräfte hin und her?

Die Mehrheit der Naturwissenschaftler, allen voran der dänische Physiker Niels Bohr, bekannte sich zu der Ansicht, dass die Unbestimmtheit tatsächlich der Natur eigen ist: Die Regeln des Uhrwerkes mögen für vertraute Gegenstände wie Billiardkugeln gelten, aber wenn es um Atome geht, gelten eher Regeln wie beim Roulette. Eine andere Ansicht vertrat jemand, den man nicht gut überhören konnte, Albert Einstein. "Gott würfeln nicht", erklärte er. Der Meinungsstreit zwischen Einstein und Bohr betrifft keineswegs nur Einzelheiten, sondern die gesamte Begriffsstruktur der erfolgreichsten naturwissenschaftlichen Theorie. Zugrunde liegt ihr die nüchterne Frage: Ist ein Atom ein *Ding* oder einfach ein für die Erklärung einer Vielzahl von Beobachtungen nützliches abstraktes Gedankengebilde? Sofern ein Atom *wirklich* als unabhängige Grösse existiert, müsste ihm zumindest ein Ort und eine bestimmte Bewegung zuzuordnen sein. Gerade das bestreitet die Quantentheorie, denn ihr zufolge kann man nur das eine oder das andere haben, niemals aber beides zugleich. Darin besteht die Unschärfebeziehung Heisenbergs, der einer der Mitbegründer der Quantentheorie ist. Sie sagt aus, dass man nicht gleichzeitig wissen kann, an welchem Ort sich ein Atom, oder ein Elektron - oder was auch immer - befindet *und* wie es sich weiterbewegen wird. Nicht nur, dass man es nicht wissen kann, sondern auch die bloße Vorstellung eines Atoms mit gleichzeitig festgelegter Lage und festgelegtem Bewegungsablauf ist sinnlos. Lage und Bewegung sind bei diesen kleinsten Teilchen zwei sich gegenseitig ausschliessende Aspekte der

Wirklichkeit. Mit welchem Recht nennen wir ein Atom ein *Ding*, wenn es sich nicht irgendwo lokalisieren lässt oder eine sinnvolle Bewegung ausführt?

Bohr zufolge gewinnt diese verschwommene und nebelhafte Welt des Atoms erst dann konkrete Züge der Wirklichkeit, wenn man darin eine Beobachtung vornimmt. Ohne eine solche ist das Atom geisterhaft; es gewinnt nur Gestalt, wenn man Ausschau nach ihm hält. Man kann selbst entscheiden, was man sucht: Wer nach der Lage sucht, findet ein Atom an einem bestimmten Ort. Wer nach der Bewegung sucht, findet eines mit einer bestimmten Geschwindigkeit, nur beides zugleich kann man nicht haben. Die Wirklichkeit, die durch die Beobachtung scharf ins Blickfeld gerückt wird, lässt sich nicht vom Beobachter und der von ihm getroffenen Wahl des Messverfahrens ablösen.



Abb.14 Der Schöpfungsakt: Beobachtung

Wem all das zu paradox und verwirrend vorkommt, als dass er es einfach hinnehmen könnte, hat Einstein auf seiner Seite. Gewiss existiert die Welt da draussen unabhängig davon, ob wir sie beobachten oder nicht? Gewiss geschieht alles aus sich selbst heraus und nicht, weil jemand diesem Geschehen zusieht? Unsere Beobachtungen mögen die Wirklichkeit der atomaren Welt enthüllen, aber wie vermöchten sie sie zu *schaffen*?

Ein grosser Teil dessen, was an der Quantentheorie so verblüffend ist, lässt sich anhand einer seltsamen Dualität von *Wellen und Teilchen* verstehen. Dieser Vorstellung zufolge verhält sich ein mikroskopisch kleines Etwas, wie beispielweise ein Elektron oder Photon einmal wie ein Teilchen und dann wieder wie eine Welle; das hängt von der Art des gewählten Experiments ab. Ein Teilchen ist allerdings etwas gänzlich anderes als eine Welle: Es ist ein Klümpchen konzentrierten Materials, wohingegen eine Welle eine gestaltlose Störung darstellt, die sich in mehreren Richtungen ausbreiten und auflösen kann. Wie aber kann etwas beides sein?

Wieso kann ein Roman zugleich eine Erzählung und eine Ansammlung von Wörtern sein? Bei der Dualität von Welle und Teilchen geht es offensichtlich um eine Zweiteilung zwischen Hardware und Software, zwischen Maschine und Programm. Das Teilchen wäre dann die Hardware-Gestalt von Atomen - kleine Kügelchen, die hin und her kullern. Die Wellengestalt entspräche der Software, dem Geist oder der Information, denn die Quantenwelle ist anders als andere Wellen, denen man je begegnet ist: sie besteht nicht aus einer Substanz oder physikalischer Materie, sondern aus Wissen oder Information. Es ist eine Welle, die uns mitteilt, was man über das Atom wissen kann, aber keine Welle des Atoms selbst. Das heisst, dass sich ein Atom nicht in Form eines Wellenbergs ausbreiten könnte. Ausbreiten aber kann sich, was der Beobachter über das Atom zu wissen vermag. Wir alle kennen Verbrechenswellen; auch sie bestehen nicht aus einer Substanz, sondern es sind Wellen einer *Wahrscheinlichkeit*. Wo die

Verbrechenswelle ihre grösste Intensität hat, besteht die grösste Wahrscheinlichkeit für kriminelles Tun.

Auch die Quantenwelle ist eine Welle der Wahrscheinlichkeit. Sie sagt uns, wo man das Teilchen erwarten darf und welche Aussichten bestehen, dass es ein bestimmtes Merkmal wie beispielweise Rotation (Spin) oder Energie aufweist.

*Widerspreche ich mir selbst?
Na gut, dann widerspreche ich mir eben,
ich bin gross,
ich enthalte Mannigfaltigkeiten.*

Walt Whitman

Das Doppelspalt-Experiment⁷

Kein Experiment zeigt das Problem der Dualität von Wellen und Teilchen besser als das berühmte Doppelspalt-Experiment.

Das Experiment geht so: Denken Sie sich eine Quelle in einem gewissen Abstand hinter einer Barriere aufgebaut. Die Barriere weist zwei benachbarte Löcher (Spalten) auf und hinter der Barriere befindet sich ein Nachweisschirm. Wir betrachten eine Reihe von drei Versuchen mit Maschinengewehrkugeln, Wellen und Elektronen (Abb.15).

⁷Nach: H.R. Pagels «Cosmic Code (die Quantensprache der Natur)» Ullstein Verlag 1983

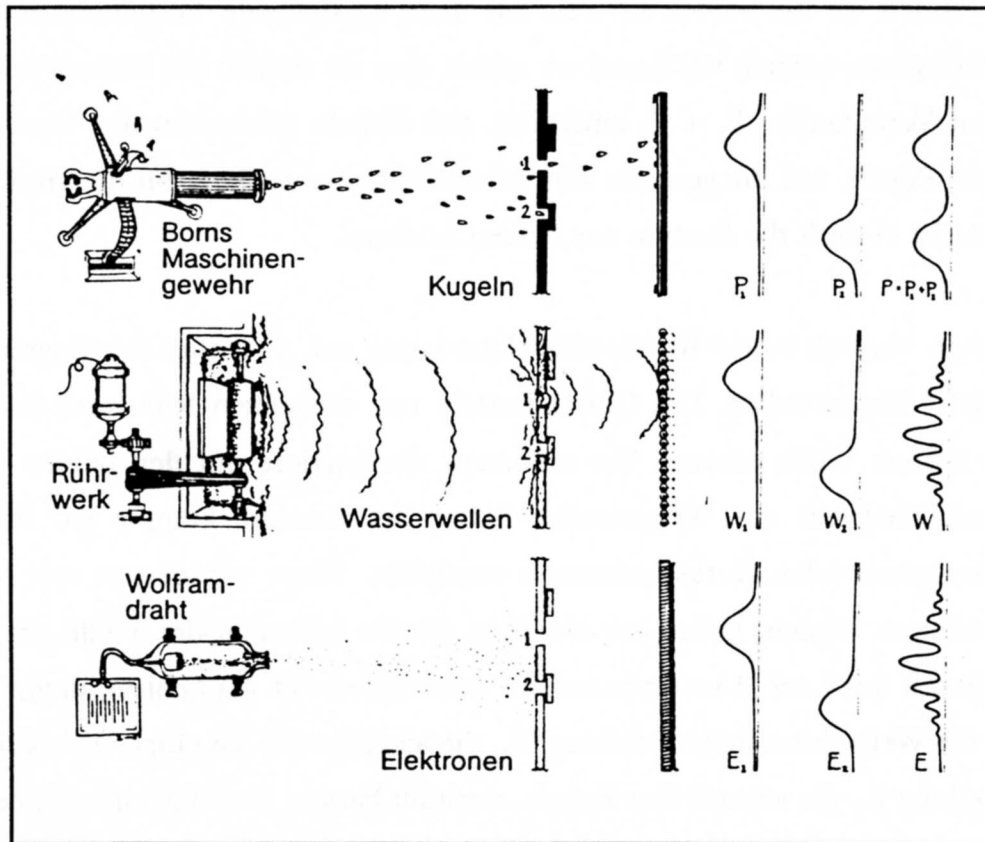


Abb.15 Die drei verschiedenen Varianten des Doppelspalt-Experimentes

Stellen wir uns zunächst vor, die Quelle besteht aus einem Maschinengewehr, das Kugeln auf eine Panzerplatte mit zwei kleinen Löchern abfeuert. Hinter der Panzerplatte steht eine dicke Holzplatte als Nachweisschirm und Kugelfänger. Die Löcher bezeichnen wir mit 1 und 2. Wir schliessen Loch 2 zu Beginn des Experiments, und dann schießen wir unsere Kugeln auf die Panzerplatte ab. Einige Kugeln gehen durch das Loch 2, und wir messen ihre Verteilung, wenn sie die Holzplatte treffen. Diese Teilchenverteilung nennen wir P_1 . Dasselbe machen wir dann, indem wir das Loch 1 schliessen und das Loch 2 aufmachen; hier finden wir eine ähnliche Verteilung P_2 . Als

nächstes öffnen wir die beiden Löcher. Die dann entstehende Verteilung der Kugeln auf der Holzplatte nennen wir P , und wir sehen, dass sie einfach der Summe der beiden vorherigen Verteilungen $P_1 + P_2$ entspricht. Die Kugeln gehorchen den Gesetzen der klassischen Physik, und die gesamte Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Treffer in der Holzplatte ist einfach die Summe aus beiden Löchern.

Im nächsten Versuch bauen wir dieselbe Anordnung auf, aber statt der Kugeln benutzen wir jetzt Wasserwellen. Die Quelle besteht nun aus einem Rührwerk im Wasser, das eine schöne Welle erzeugt, die wiederum die Barriere mit den beiden Löchern trifft. Zum Nachweis der Wasserwellen hinter der Barriere können wir uns einen Schirm aus ganz vielen Korkschwimmern vorstellen. Wenn wir messen, wie hoch die Korkschwimmer hüpfen, haben wir ein Mass für die Intensität der Welle am Schirm. Wir schliessen das Loch 2 und messen die Wellenintensität am Schirm; damit bekommen wir die Wellenintensitätsverteilung W_1 , die aussieht wie die obige Wahrscheinlichkeitsverteilung P_1 , die wir mit den Kugeln ermittelt hatten. Ein ähnliches Bild erhalten wir, wenn wir das Loch 1 schliessen und Loch 2 offen behalten.

Aber wenn wir jetzt beide Löcher, also 1 und 2, öffnen, sieht die entstehende Verteilung W überhaupt nicht mehr aus wie P , das wir mit den Maschinengewehr-kugeln bekommen hatten, denn sie ist nicht mehr einfach die Summe von $W_1 + W_2$. Statt dessen enthält sie alle möglichen Zacken als Folge der Überlagerung der Wellen aus den Löchern 1 und 2. Die Wellen aus den Löchern 1 und 2 können einander nämlich entweder auslöschen oder verstärken. Der Unterschied zwischen den beiden Experimenten liegt darin, dass Wellen einander überlagern können, Kugeln hingegen nicht.

Und schliesslich im letzten Versuch benutzen wir Elektronen als Geschosse; die Quelle ist ein erhitzter Wolframdraht, der Elektronen abgibt, die Barriere eine dünne Metallfolie mit zwei Löchern, der Schirm eine zweidimensionale Anordnung von Elektronendetektoren (Nachweisgeräten). Die Elektronen werden auf die Barriere geschossen, wobei zuerst das Loch 2 geschlossen ist und die gemessene Verteilung E_1 den obigen

Verteilungen P_1 und W_1 entspricht. Ähnlich lässt sich E_2 bestimmen und es entspricht P_2 und W_2 . Wenn nun beide Löcher 1 und 2 offen sind, sieht die entstehende Verteilung E aus wie W , die Verteilung der Wasserwellen. Aber welche Wellen? Wie bereits erwähnt, verhält sich ein Elektron nach der Quantentheorie nicht wie eine Wasserwelle oder eine Materiewelle. Was sich tatsächlich wie eine Welle verhält, ist die Wahrscheinlichkeit für das Auffinden von Elektronen; es handelt sich also um Wahrscheinlichkeitswellen.

Das ist jedoch noch nicht alles! Nehmen wir an, wir verringern bei dem letzten Versuch die Menge an Elektronen, bis jeweils nur noch *ein einziges* Elektron während einer bestimmten Zeit durch eines der beiden Löcher in der Barriere hindurchgeht. Dieses Elektron hinterlässt eine Spur irgendwo auf dem Nachweisschirm. Wenn dies mit weiteren einzelnen Elektronen wiederholt wird ...

FRAGEN

1. Wir lassen eine grosse Anzahl Elektronen *einzelnd und nacheinander* durch die Barriere mit zwei offenen Löchern hindurchgehen. Welche Verteilung werden wir auf dem Nachweisschirm registrieren?

Wenn dies mit weiteren einzelnen Elektronen wiederholt wird, bildet die Gesamtheit der Fleckchen auf dem Nachweisschirm wieder das Muster von hellen und dunklen Streifen, also die Verteilung E von vorhin. Wir können sogar in tausend verschiedenen Laboratorien dasselbe Experiment mit Elektronen durchführen und beim einzelnen Experiment jeweils nur ein Teilchen durchlassen, und wenn wir dann die tausend Einzelergebnisse zusammenzählen würden, erhielten wir eine Gesamtverteilung, ähnlich der Verteilung E von oben. Das einzelne Elektron verhält sich also auf seinem Weg durch eines der Löcher in der Barriere so, als ob es wüsste, ob das andere Loch offen ist oder nicht. Dies ist das eigentliche Rätsel, das zentrale Geheimnis der Quantenwelt.

Schrödingers Katze⁸

"Du findest mich dort", sagte die Katze und verschwand. Alice war darüber nicht weiter erstaunt, denn sie hatte sich allmählich an die vielen merkwürdigen Vorgänge gewöhnt.

Lewis Carol *«Alice im Wunderland»*

Die grössten Paradoxien der Quantentheorie stellen sich ein, wenn der Messvorgang, das Experiment, in die Überlegungen einbezogen wird. Nehmen wir an, ein Elektron prallt von einem Hindernis ab (Abb.16). Es kann dabei nach links oder rechts abweichen. Man bedient sich des Wellencharakters des Elektrons und berechnet die Aus-

⁸Nach: P. Davies *«Gott und die moderne Physik»* und J. Gribbin *«Auf der Suche nach Schrödingers Katze»* Piper Verlag 1987

breitungsrichtung der Wahrscheinlichkeitswelle. Sie wird am Hindernis auch abgelenkt und breitet sich beispielsweise gleich stark nach links wie nach rechts aus. Das bedeutet, dass es für den Beobachter eine gleich grosse Chance dafür gibt, das Elektron *entweder* links *oder* rechts zu finden. Man muss allerdings unbedingt daran denken, dass es, solange die Beobachtung nicht tatsächlich abgeschlossen ist, unmöglich ist zu sagen - oder sinnvoll darüber zu reden -, auf welcher Seite des Hindernisses sich das Elektron wirklich befindet. Das Elektron behält sich seine Entscheidung vor, bis man hinschaut. Beide Möglichkeiten koexistieren in einer Mischform, einer geisterhaften Überlagerung.

Wenn jetzt die Beobachtung durchgeführt wird und sich das Elektron beispielsweise links findet ...

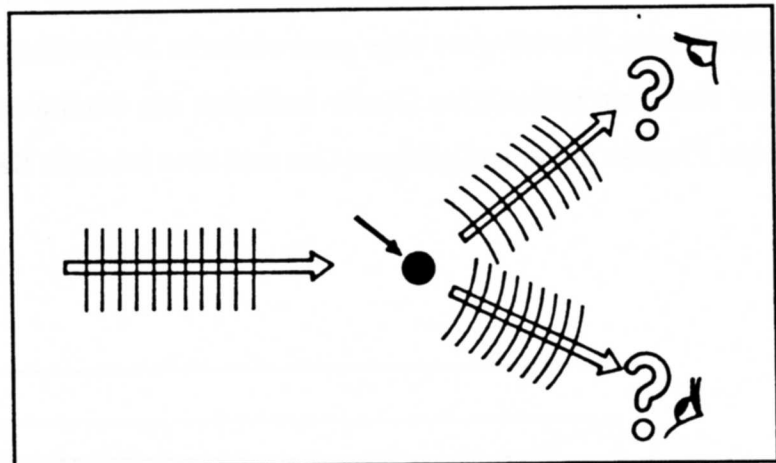


Abb.16 Ein Elektron prallt von einem Hindernis ab

FRAGEN

1. Was geschieht mit der Wahrscheinlichkeitswelle eines Elektrons im Augenblick der Beobachtung?

Wenn jetzt die Beobachtung durchgeführt wird und sich das Elektron beispielsweise links findet, verschwindet mit einem Schlag der "geisterhafte Doppelgänger" rechts. Die Welle bricht augenblicklich zusammen - sie verlagert sich mit einem Mal auf die links vom Hindernis liegende Seite, denn jetzt ist die Wahrscheinlichkeit, das Elektron auf der rechten Seite zu finden, plötzlich zu Null geworden.

Sich ein Elementarteilchen wie ein Elektron vorzustellen, das sich weder hier noch dort, sondern in einer Überlagerung von Geisterzuständen befindet, ist eine Sache; sehr viel schwerer fällt es, sich eine vertraute Sache wie eine Katze vorzustellen, die sich in einer solchen Art von Zustand befindet. Dabei steckt hinter dem berühmten Gedankenexperiment Schrödingers eine ganz einfache Vorstellung. Man denke sich eine Kiste, in der sich eine radioaktive Quelle befindet, ein Nachweisgerät für radioaktive Strahlen, eine Flasche mit einem giftigen Gas und eine lebende Katze (Abb.17). Das Nachweisge-

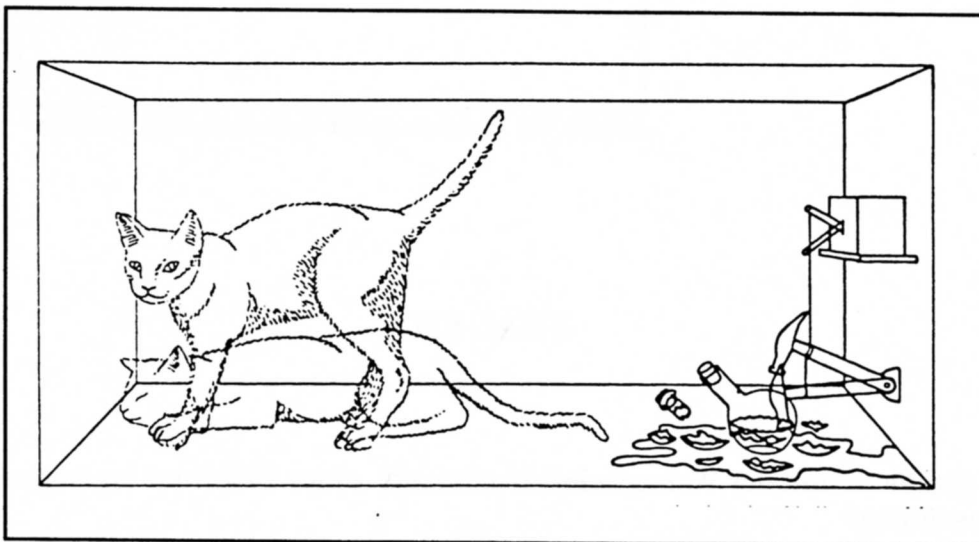


Abb.17 Das berühmte Gedankenexperiment von E. Schrödinger

rät ist gerade genug lang eingeschaltet, dass sich eine Chance von genau 50 Prozent dafür ergibt, dass eines der Atome des radioaktiven Materials zerfällt und das Nachweisgerät anspricht. Spricht das Nachweisgerät tatsächlich an, so wird die Flasche mit dem Gift zertrümmert, und die Katze stirbt. Wenn das Nachweisgerät in der vorgegebenen Zeit keinen radioaktiven Zerfall registriert, lebt die Katze fröhlich weiter. Was bei diesem Experiment herauskommt, können wir erst wissen, wenn wir die Kiste öffnen und hineinschauen; der radioaktive Zerfall vollzieht sich ganz und gar zufällig und ist ausser in einem statistischen Sinne unvorhersagbar. So wie beim obigen Experiment eine gleiche Wahrscheinlichkeit dafür besteht, dass das Elektron an einem Hindernis entweder nach links oder nach rechts abgelenkt wird, und die beiden Möglichkeiten zu einer Überlagerung von Geisterzuständen führen, müsste sich auch hier aus den gleichen Wahrscheinlichkeiten für einen radioaktiven Zerfall und für keinen radioaktiven Zerfall eine Überlagerung von zwei Geisterzuständen ergeben. Diese Überlagerung einschliesslich der armen Katze bleibt nun solange bestehen, bis wir nachschauen, was aus dem Experiment geworden ist. Im Augenblick der Beobachtung bricht dann die Wahrscheinlichkeitsfunktion zu einem der beiden möglichen Zustände zusammen. Bevor wir nicht hinschauen, gibt es eine radioaktive Probe, die sowohl zerfallen als auch nicht zerfallen ist, eine Giftflasche, die weder zerbrochen noch unzerbrochen ist, und eine Katze, die sowohl tot als auch lebendig ist.

FRAGEN

1. Diskutieren Sie die folgenden Varianten des Schrödingerschen Experimentes, bei denen anstatt einer Katze die folgenden Lebewesen oder Gegenstände in die Kiste eingesperrt werden:

- a) ein Bakterium
- b) ein Mensch
- c) ein Computer