

Kapitel 6

Eigenschaften von Elektronen und der quantenmechanische Messprozess

6.1 Die Eigenschaft „Ort“ im Doppelspaltexperiment

In Abschnitt 3.4 wurde gezeigt, dass man einem Photon im Interferometer die Eigenschaft „Weg“ nicht zuschreiben kann. Versuchte man festzulegen, auf welchem der beiden Wege das Photon gegangen war, zeigten sich keine Interferenzstreifen mehr. Ein analoges Experiment kann man für Elektronen am Doppelspalt durchführen. Dabei wird die Eigenschaft „Ort in der Spaltebene“ untersucht, d. h. die Frage, ob man einem Elektron einen der beiden Spalte zuordnen kann, durch den es gegangen ist.

Für klassische Teilchen, z. B. für Farbtröpfchen, würde man das Doppelspaltexperiment folgendermaßen beschreiben: Etwa die Hälfte der Farbtröpfchen geht durch Spalt 1, die restlichen durch Spalt 2. Aufgrund der mangelnden experimentellen Auflösung lässt sich allerdings nicht angeben, durch welchen der beiden Spalte ein bestimmtes Farbtröpfchen gegangen ist. Das Farbtröpfchen ist also durch genau einen der beiden Spalte gegangen, wir wissen nur nicht, durch welchen.

Diese Darstellung trifft zwar für klassische Teilchen zu. Nach der Quantenmechanik ist sie für Elektronen aber *falsch*. Man kann einem Elektron keinen Spalt zuordnen, durch den es „in Wirklichkeit“ gegangen ist. Das Verhalten von Quantenobjekten weicht so radikal von den gewohnten klassischen Vorstellungen ab, dass selbst ein scheinbar so harmloses Bild wie das obige mit ihr in Konflikt gerät. Das kann man mit der folgenden Überlegung einsehen:

Nehmen wir an, in Wirklichkeit sei jedes der Elektronen sei durch einen bestimmten Spalt gegangen, den wir aber nicht kennen. Wenn diese Annahme stimmt, müsste das auf dem Schirm nachgewiesene Muster unverändert bleiben, wenn man die Elektronen „umsortiert“. Dazu lässt man zuerst alle diejenigen Elektronen den Doppelspalt passieren, die durch Spalt 1 gehen und erst danach die durch Spalt 2 gehenden.

Das Experiment, mit dem dieses „Umsortieren“ erreicht wird, haben wir als Experiment 5.6 schon durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 6.1 noch einmal dargestellt. Zuerst deckt man Spalt 2 ab, damit alle dort ankommenden Elektronen absorbiert werden und nur die bei Spalt 1 eintreffenden durchgelassen werden. Auf dem Schirm ergibt sich die in in (Abb. 6.1 (a)) gezeigte Verteilung, die mit $P_1(x)$ bezeichnet wird.

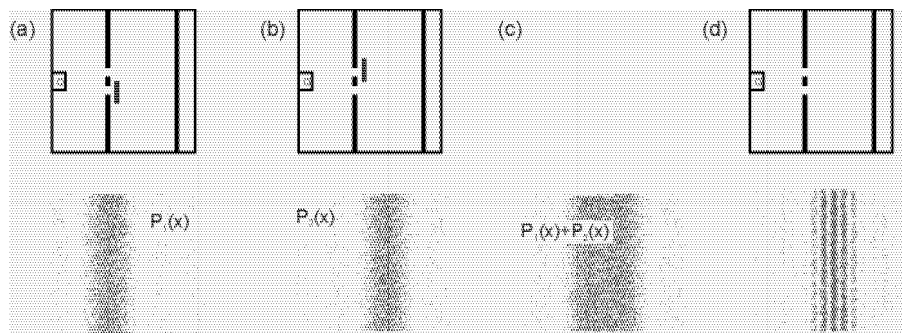


Abbildung 6.1: Ortseigenschaft im Doppelspaltexperiment

Nun wird Spalt 1 abgedeckt, damit umgekehrt nur Elektronen durchgelassen werden, die durch Spalt 2 gegangen sind. Diese Elektronen führen auf dem Schirm zur Verteilung $P_2(x)$ (Abb. 6.1 (b)). Beide Verteilungen zusammen ergeben

$$P(x) = P_1(x) + P_2(x). \quad (6.1)$$

Die Verteilung $P(x)$ ist in Abb. 6.1 (c) gezeigt. Sie entspricht gerade *nicht* der beim ursprünglichen Doppelspalt-Versuch gefundenen Verteilung, die zum Vergleich noch einmal in Abb. 6.1 (d) dargestellt ist.

Was bedeutet dieses Versuchsergebnis? Zu $P(x)$ tragen alle Elektronen bei, die durch Spalt 1 gehen und alle, die durch Spalt 2 gehen. Andere Möglichkeiten scheint es nicht zu geben. Und doch zeigt der Vergleich von Abb. 6.1 (c) und (d), dass die Annahme, dass jedes Elektron durch einen ganz bestimmten Spalt geht, das charakteristische Doppelspalt-Interferenzmuster nicht erklären kann.

Unsere Ausgangsannahme bei diesem Experiment war, dass jedes Elektron durch einen bestimmten, aber unbekanntem Spalt gegangen sei. In Anbetracht dieses Versuchsergebnisses scheint sie nicht mehr haltbar zu sein. Im Doppelspalt-Experiment ist es nicht möglich, die Elektronen in solche einzuteilen, die durch Spalt 1 gehen und in solche, die durch Spalt 2 gehen. Die klassische Vorstellung von Elektronen als lokalisierten Gebilden stößt hier an ihre Grenzen. Dies wird noch erstaunlicher, wenn man bedenkt, dass im analogen Experiment mit Atomen (Abschnitt 5.2) der Spaltabstand etwa 150 000 mal größer ist als der „typische Atomdurchmesser“.

Da die Zuordnung der Elektronen zu einem bestimmten Spalt nicht möglich ist, kann man auch nicht sagen, dass ein bestimmtes Elektron durch einen bestimmten Spalt gegangen ist. In der Quantenmechanik ist es *falsch* zu behaupten, das Elektron habe in der Spaltebene einen bestimmten Ort, den wir nur nicht kennen. Die Eigenschaft „Ort“ kann einem Elektron unter diesen Umständen nicht zugeschrieben werden. Dies ist ein grundlegender Zug der Quantenmechanik, der auch für andere Quantenobjekte (z. B. Atome) und andere Eigenschaften (z. B. Energie, Impuls) gilt:

In der Quantenmechanik ist es möglich, dass einem Quantenobjekt klassisch wohldefinierte Eigenschaften *nicht* zugeschrieben werden können. Zum Beispiel besitzt ein Elektron im Doppelspaltexperiment die Eigenschaft „Ort“ nicht.

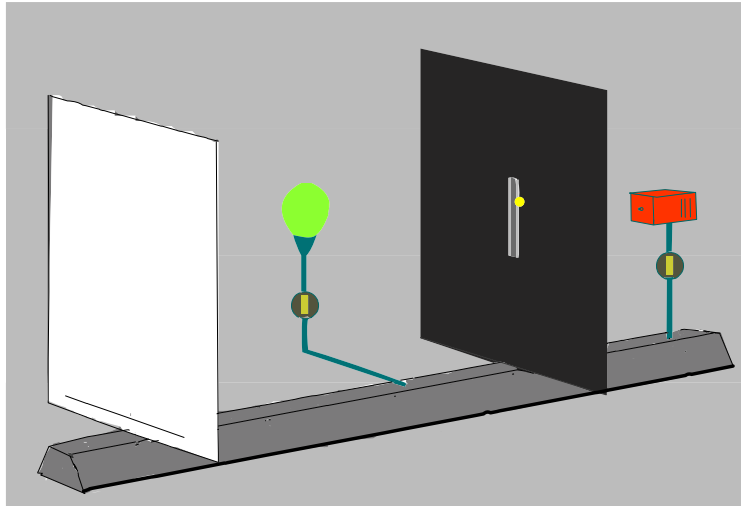


Abbildung 6.2: Ortsmessung der Elektronen durch Lichtstreuung

6.2 Messprozess und Komplementarität

Im letzten Abschnitt haben wir gesehen, daß man beim Doppelspaltversuch einem Elektron in der Spaltebene die Eigenschaft „Ort“ nicht zuschreiben kann. Ein naheliegender Einwand darauf ist, daß man den Ort der Elektronen in der Spaltebene doch *messen* kann.

Experiment 6.1 (Computersimulation): Im Simulationsprogramm sehen Sie zwischen Blende und Schirm eine Lampe, die wir bisher noch nicht benutzt haben (Abb 6.2). Schalten Sie sie nun ein. Schalten Sie auch die Quelle ein, damit Elektronen emittiert werden. Sie werden Lichtblitze hinter den Spalten erkennen. Die Elektronen streuen das Licht der Lampe. Der dadurch erzeugte Lichtblitz kann registriert werden. Man führt mit der Lichtquelle eine **Ortsmessung** durch.

Für jedes einzelne Elektron sieht man einen Lichtblitz an einer ganz bestimmten Stelle. Das bedeutet, daß man jedes Elektron bei der Ortsmessung an einem wohldefinierten Ort findet, und zwar mit hoher Wahrscheinlichkeit hinter einem der beiden Spalte. Hinter welchem Spalt man ein bestimmtes Elektron findet, läßt sich im voraus nicht sagen.

Hat man damit die Quantenmechanik „überlistet“ und jedem Elektron doch noch einen Spalt zugeordnet, durch den es gegangen ist? Nein, denn wenn sie etwas länger warten (oder die Taste „Speed“ drücken), werden Sie feststellen, daß bei dem so durchgeführten Versuch *kein Doppelspalt-Interferenzmuster* auftritt. Stattdessen findet man wieder die Summe der beiden Einzelspalt-Verteilungen $P_1(x) + P_2(x)$. Das bedeutet:

Ortseigenschaft und Interferenzmuster sind nicht gleichzeitig realisierbar, sondern schließen sich gegenseitig aus. Dies ist ein Spezialfall eines allgemeinen Prinzips, das man nach Niels Bohr *Komplementarität* nennt.

Das Konzept der Komplementarität war für Bohr ein ganz zentraler Begriff der Quantenmechanik. Versuchsanordnungen, in denen sich die Interferenz von Quantenobjekten zeigt sind komplementär zu sol-

chen, in denen die Quantenobjekte „teilchenhaft“, also mit einem bestimmten Ort, auftreten. Komplementäre Versuchsanordnungen sind nicht zugleich realisierbar. Sie geben nur gemeinsam Aufschluss über die Realität. Die Wirklichkeit ist nicht in einem einzigen anschaulichen Bild erfassbar.

Mit einem weiteren Experiment kann man die Komplementarität von Ortseigenschaft und Interferenzmuster noch deutlicher illustrieren:

Experiment 6.2 (Computersimulation): Klicken Sie auf den Schirm und wählen Sie „theoretische Verteilung“. Nun wird die Verteilung auf dem Schirm dargestellt, ohne dass wir jedesmal warten müssten, bis sich das Schirmbild aufgebaut hat. Klicken Sie jetzt auf die Lampe. Ein Fenster erscheint, in dem Sie die Intensität der Lampe verändern können. Wenn Sie die Intensität langsam von 100 % auf 0% verändern, können Sie beobachten, wie die strukturlose Verteilung nach und nach in das Interferenzmuster übergeht.

Eine schwächere Intensität der Lampe bedeutet, dass nicht mehr alle Elektronen nachgewiesen werden. Die nicht nachgewiesenen tragen zum Interferenzmuster bei. Im Gegensatz dazu kann man den nachgewiesenen Atomen die Eigenschaft „Ort“ zuschreiben. Sie tragen zur strukturlosen Verteilung bei. Mit dem Intensitätsregler der Lampe kann man den Übergang zwischen den komplementären Größen „Ortseigenschaft“ und „Interferenzmuster“ erforschen.

Noch ein anderer charakteristischer Zug der quantenmechanischen Messung läßt sich an dem Experiment ablesen: Schon die Veränderung eines kleinen Teils der Versuchsanordnung (hier das Einschalten der Lichtquelle) reicht unter Umständen aus, um das Versuchsergebnis qualitativ zu verändern (Auftreten des Interferenzmusters oder nicht). Auch dies war für Bohr ein wichtiges Merkmal der Quantenmechanik, das er als die **Ganzheitlichkeit der Quantenphänomene** bezeichnet hat.

Das Ergebnis von Experimenten hängt in der Quantenmechanik empfindlich von der Versuchsanordnung ab.

6.3 Messungen und Eigenschaften

Die gerade diskutierte Ortsmessung ist nur ein Beispiel für einen quantenmechanischen **Meßprozeß**. An ihr kann man die Besonderheiten illustrieren, die in der Quantenphysik mit dem Begriff der Messung verbunden sind. In der klassischen Physik bedeutet die Messung einer Größe einfach die Zurkenntnisnahme ihres vorher bereits wohldefinierten Wertes. Führt man eine Ortsmessung an einem klassischen Gegenstand (z. B. einem Stein oder Ball) durch, wird z. B. durch Anlegen eines Maßstabes festgestellt, wo sich der Gegenstand im Augenblick der Messung befindet. Das ist so einfach, daß man sich üblicherweise keine Rechenschaft darüber ablegt.

Mit unserem bisherigen Wissen über die Eigenschaften von Quantenobjekten können wir schon absehen, daß die Verhältnisse bei einer quantenphysikalischen Messung nicht mehr so unkompliziert sein werden. Wir haben bereits gesehen, daß ein Elektron in der Spaltebene die Eigenschaft „Ort“ gar nicht besitzt. Eine Ortsmessung kann daher nicht einfach darin bestehen, daß man rein passiv die bereits feststehende Ortskoordinate zur Kenntnis nimmt. A priori ist keineswegs klar, was es bedeutet, an einem Quantenobjekt eine Größe (wie den Ort) zu messen, wenn diese Größe dem betrachteten Objekt gar nicht zukommt. Die Frage ist: Wie reagieren Meßgeräte (deren Anzeige das Ergebnis ja bestimmt), wenn sie mit einem solchen Quantenobjekt in Kontakt gebracht werden? Wie unter diesen Umständen das Ergebnis einer Messung überhaupt aussehen kann, muß letzten Endes empirisch geklärt werden.

In den vorangegangenen Kapiteln wurden schon häufig Messungen an Quantenobjekten diskutiert, ohne daß dieser Sachverhalt bisher zum Problem geworden wäre. In allen Experimenten wurde ein eindeutiger Wert der gemessenen Größe gefunden. Auch im obigen Gedankenexperiment leuchtete bei der Ortsmessung hinter dem Doppelspalt nur an einer *einzigsten* Stelle ein Lichtblitz auf. Jedes Elektron wird also bei der Messung hinter einem der Spalte gefunden (obwohl es falsch wäre, zu sagen, daß es schon vorher die Eigenschaft „befindet sich hinter einem der Spalte“ besessen hat).

Von den möglichen Meßwerten (Spalt 1 oder Spalt 2) ist bei der Messung also genau *einer* ausgewählt worden. Führt man das gleiche Experiment mehrere Male hintereinander aus, wird man im allgemeinen verschiedene Ergebnisse erhalten. Im vorliegenden Beispiel wird man ein Elektron im Mittel genauso häufig hinter Spalt 1 wie hinter Spalt 2 finden.

Bei jeder Messung an einem Quantenobjekt wird aus dem Spektrum der möglichen Messwerte (hier Spalt 1 oder Spalt 2) ein einzelner realisiert. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein bestimmter Messwert gefunden wird, lässt sich aus der Wellenfunktion mit der Bornschen Wahrscheinlichkeitsformel (5.12) ermitteln.

Vor der Registrierung durch einen Detektor (z. B. die Lampe) kann man dem Elektron keine Ortseigenschaft zuschreiben. Es gibt keine „Bahn“ (also eine Abfolge von Orten), auf der sich das Elektron von der Quelle zum Schirm bewegt, sondern nur eine quantenmechanische Wellenfunktion, die sich nach Wellengesetzen ausbreitet. Erst im Messprozess wird eine der beiden Möglichkeiten realisiert (das Elektron wird entweder hinter Spalt 1 oder hinter Spalt 2 gefunden).

Dies illustriert noch einmal sehr deutlich, daß in der Quantenmechanik ein wesentlicher Unterschied darin besteht, ob ein Quantenobjekt eine Eigenschaft *besitzt* oder ob man an ihm eine Eigenschaft *mißt*. Wie wir gesehen haben, muß ein Quantenobjekt eine bestimmte Eigenschaft (wie den Ort) keineswegs besitzen. Führt man eine Messung durch findet man dagegen immer einen Meßwert. Aus der Tatsache, daß sich bei einer Messung des Ortes ein bestimmter Wert ergeben hat, darf man also keineswegs schließen, daß das Quantenobjekt diese Eigenschaft vorher aufgewiesen hat.

In der Quantenmechanik besteht ein Unterschied zwischen „eine Eigenschaft haben“ und „eine Eigenschaft messen“.
Zum Beispiel sind die beiden folgenden Aussagen *nicht* gleichbedeutend:
a) Bei einer Messung findet man das Elektron am Ort x .
b) Ein Elektron besitzt die Eigenschaft „Ort x “.

Hier liegt der Grund, warum es in der Quantenmechanik vorteilhaft ist, mit Ensembles von Quantenobjekten zu arbeiten statt mit den Einzelobjekten selbst. Betrachten wir die folgende Situation: Man führt an einem einzelnen Elektron in der Spaltebene eine Ortsmessung durch und erhält das Ergebnis „Spalt 1“. Nach dem oben Gesagten kann man sich nicht sicher sein, ob das Elektron die Eigenschaft „Ort“ wirklich besessen hat oder ob dieser Wert sich nur als Ergebnis der Messung eingestellt hat. Für eine einzelne Messung an einem einzelnen Quantenobjekt gibt es in der Quantenmechanik keine Methode, zwischen diesen beiden Alternativen zu entscheiden.

Ein Ausweg bietet sich, wenn man Ortsmessungen an einem ganzen *Ensemble* von identisch präparierten Quantenobjekten durchführt. Hier gibt es zwei Möglichkeiten

1. Die gemessenen Werte streuen, d. h. bei manchen Messungen findet man das Elektron hinter Spalt 1, bei anderen hinter Spalt 2. Dann besitzt das Ensemble hinter den Spalten *nicht* die Eigenschaft „Ort“.
2. Alle Messungen liefern denselben Ort (innerhalb eines gewissen Intervalls), z. B. „Spalt 1“. Dann besitzt das Ensemble die Eigenschaft „Ort“. In diesem (und nur in diesem) Fall kann man auch von jedem einzelnen Mitglied des Ensembles sagen, dass es die betreffende Eigenschaft besitzt.

Dynamische Eigenschaften von Quantenobjekten beziehen sich also (ebenso wie der Begriff der Präparation) immer auf ein ganzes Ensemble. Der Grund dafür ist, dass es in der Quantenmechanik einen Unterschied zwischen „eine Eigenschaft haben“ und „eine Eigenschaft messen“ gibt.

6.4 Zustandsreduktion

Jede physikalische Messung ist ein Vorgang, bei dem physikalische Meßinstrumente mit dem zu beobachtenden Objekt in Wechselwirkung treten. Wenn es keinen Einfluss vom gemessenen Objekt auf das Messgerät gäbe, könnte man am Messgerät auch keine Information über das Objekt ablesen.

Umgekehrt beeinflusst im allgemeinen auch jede Messung die am Objekt zu messende Größe. Will man z. B. die Temperatur in einem Wassergefäß messen, taucht man ein Thermometer in das Wasser ein. Durch das Eintauchen des Thermometers wird die Temperatur des Wassers aber verändert, so daß eine exakte Temperaturmessung nicht ohne weiteres möglich ist. In der klassischen Physik wird diese Rückwirkung entweder als vernachlässigbar angesehen (z. B. der Strahlungsdruck beim Durchlaufen einer Lichtschranke) oder es existiert eine Korrekturtheorie, die es erlaubt, die Wirkung des Meßgerätes zu berücksichtigen (der Einfluß des Thermometers kann berechnet werden, wenn seine Wärmekapazität bekannt ist).

In der Quantenphysik hat eine Messung keinen solch passiven Charakter mehr. Messungen stellen einen nicht zu vernachlässigenden Eingriff in den ungestörten Ablauf des Geschehens dar; sie verändern den Zustand des gemessenen Objekts. Ein Beispiel dafür haben wir schon kennengelernt: das im vorletzten Abschnitt behandelte Doppelspalt-Experiment mit Lichtquelle. Mit ausgeschalteter Lampe ergab sich auf dem Schirm das Interferenzmuster. Führt man dagegen eine Ortsmessung an den Elektronen durch, indem man die Lampe einschaltete, ergab sich kein Interferenzmuster.

Die Elektronen befinden sich nach der Messung also in einem anderen Zustand, in dem sie kein Interferenzmuster auf dem Schirm ausbilden. Die Messung hat also ihren Zustand verändert. Dies ist ein allgemeiner Zug von Messungen in der Quantenmechanik:

Anders als in der klassischen Physik verändert eine quantenmechanische Messung den Zustand des Systems, an dem die Messung vorgenommen wird.

Handelt es sich einfach um eine *Störung* der Elektronen durch die Lampe? Werden die Elektronen von den Photonen der Lampe ein wenig „geschubst“, so dass sie anschließend an einer anderen Stelle auf dem Schirm landen? Dies ist nicht die eigentliche Ursache für die Veränderung des Elektronenzustands, die eine Messung mit sich bringt. Man hätte das Experiment nämlich ebensogut durchführen können, indem man nur einen der beiden Spalte beleuchtet hätte. Hinter dem unbeleuchteten Spalt hätten die Elektronen dann gar keine Möglichkeit gehabt, mit Photonen zu wechselwirken. Trotzdem hätte man das gleiche Ergebnis erhalten: kein Interferenzmuster.

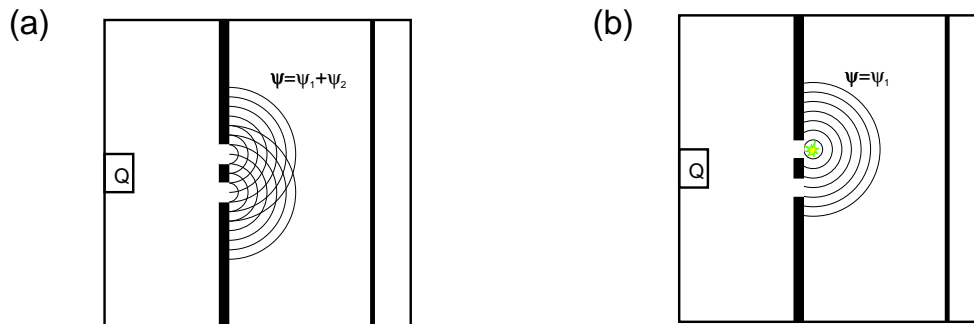


Abbildung 6.3: (a) Die Wellenfunktion der Elektronen bei ausgeschalteter Lampe ist ein Überlagerungszustand aus $\psi_1(x)$ und $\psi_2(x)$. (b) Nach einer Ortsmessung (Lichtblitz), bei der das gemessene Atom hinter Spalt 1 gefunden wurde, wird es durch die Wellenfunktion $\psi_1(x)$ beschrieben (Zustandsreduktion).

Es ist ein grundlegendes Phänomen, das der Zustandsveränderung bei einer Messung zugrundeliegt. Mit Hilfe der Wellenfunktion lässt es sich auch quantitativ diskutieren. In unserem Beispiel ist die Wellenfunktion des ungestörten Systems (also ohne Lampe) $\psi(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x)$ (vgl. Gleichung (5.14)). Es handelt sich um einen Überlagerungszustand aus den beiden Wellenfunktionen $\psi_1(x)$ und $\psi_2(x)$ (Abb. 6.3 (a)). Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Elektronen auf dem Schirm, ergibt sich – wie schon oben diskutiert – aus $|\psi(x)|^2 = |\psi_1(x) + \psi_2(x)|^2$. Man erhält das Interferenzmuster (Gleichung (5.15)). Die Wellenfunktion $\psi(x)$, die das durch den Doppelspalt präparierte Ensemble von Elektronen beschreibt, enthält die beiden möglichen Messwerte (Spalt 1 oder Spalt 2) gleichermaßen.

Durch die Messung wird eine der beiden Möglichkeiten ausgewählt. Nach der Messung ist nur noch sie in der Wellenfunktion vertreten. Die Elektronen, die man hinter Spalt 1 findet, werden durch die Einzelspalt-Wellenfunktion $\psi_1(x)$ beschrieben (Abb. 6.3 (b)). Ihr Beitrag zur Elektronenverteilung auf dem Schirm entspricht daher gerade der Einzelspalt-Verteilung $|\psi_1(x)|^2$. Umgekehrt werden die hinter Spalt 2 gefundenen Elektronen durch $\psi_2(x)$ beschrieben, mit der zugehörigen Verteilung $|\psi_2(x)|^2$. Das Muster, das sich schließlich auf dem Schirm herausbildet ist die Summe $P(x) = |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2$ der beiden Einzelspaltverteilungen; es ist durch die Abwesenheit der Interferenzstruktur gekennzeichnet.

Die Tatsache, man bei diesem Versuch kein Interferenzmuster erhält, wird also dadurch erklärt, daß die Elektronen nach der Messung durch eine *andere* Wellenfunktion beschrieben werden. Den Übergang von $\psi(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x)$ zu einer der beiden Möglichkeiten $\psi_1(x)$ oder $\psi_2(x)$ nennt man **Zustandsreduktion** oder „**Kollaps**“ der Wellenfunktion. Sie stellt eine abrupte Änderung der Wellenfunktion dar, die charakteristisch für eine Messung ist. Mit Heisenberg könnte man die Zustandsreduktion den „Übergang vom Möglichen zum Faktischen“ nennen.

Nur am Rande sei bemerkt, dass das Doppelspalt-Experiment noch ein anderes Beispiel für eine quantenmechanische Messung enthält: die Registrierung der Quantenobjekte auf dem Schirm. Wie wir oben gesehen haben, produziert ein einzelnes Elektron nur einen kleinen, nahezu punktförmigen „Fleck“ auf dem Schirm, obwohl sich die Wellenfunktion über einen wesentlich größeren Ortsbereich erstreckt. Der Nachweis auf dem Schirm stellt eine Ortsmessung dar, bei der nur eine der Möglichkeiten realisiert wird; d. h. nur an einem der möglichen Orte findet man einen Fleck. Die Zustandsreduktion besteht darin, daß das Elektron nur an einer ganz bestimmten Stelle die physikalischen und chemischen Reaktionen auslöst, die zu seinem Nachweis führen.

6.5 Schrödingers Katze, Messprozess und Dekohärenz

Bei den Phänomenen der Alltagswelt nimmt man nichts von dem merkwürdigen Quantenverhalten wahr, wie es z. B. Elektronen im Doppelspaltexperiment zeigen. Es stellt sich die Frage, ob man mit der Quantenmechanik erklären kann, wie die Welt ihre „klassische“ Erscheinungsform annimmt, wenn man von mikroskopischen zu makroskopischen Systemen übergeht. Besitzt die Quantenmechanik einen **klassischen Grenzfall**, in dem sie die Aussagen der klassischen Mechanik reproduziert?

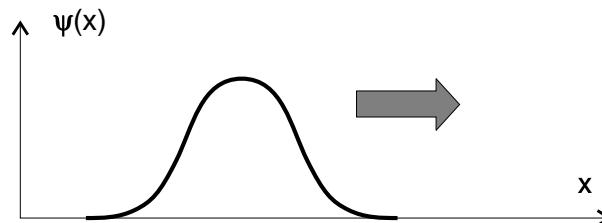


Abbildung 6.4: Wellenfunktion eines Wellenpakets

Elektronen in einer Elektronenstrahlröhre kann man z. B. durch ein sogenanntes „Wellenpaket“ beschreiben, d. h. durch eine Wellenfunktion mit begrenzter Ausdehnung, die sich wie ein Wellenpuls ausbreitet (Abb. 6.4). Schon früh wurde erkannt, dass der „Schwerpunkt“ eines Wellenpakets sich nach den Newtonschen Gesetzen bewegt, wenn das Wellenpaket nicht zu ausgedehnt ist, d. h. wenn die Ausdehnung des Wellenpakets klein ist gegenüber den Abständen, für die sich die potentielle Energie ändert. Ein solches Wellenpaket bewegt sich dann ähnlich wie ein klassisches Teilchen.

Schrödinger erkannte jedoch, dass das eigentliche Problem beim klassischen Grenzfall in den **Überlagerungszuständen** liegt. Er legte das anhand eines besonders drastischen Beispiels dar, das unter dem Namen „Schrödingers Katze“ Berühmtheit erlangte: In einem Kasten, in dem sich eine Vorrichtung zur Freisetzung eines Giftgases befindet, ist eine Katze eingesperrt (Abb. 6.5). Ein Zufallsereignis (radioaktiver Zerfall eines Atoms) bestimmt, ob das Gas freigesetzt wird oder nicht. Die Apparatur soll gerade soviel radioaktive Substanz enthalten, um in einer Stunde mit 50% Wahrscheinlichkeit einen Zerfall herbeizuführen, der nach Auslösung des Mechanismus die Katze vergiftet.

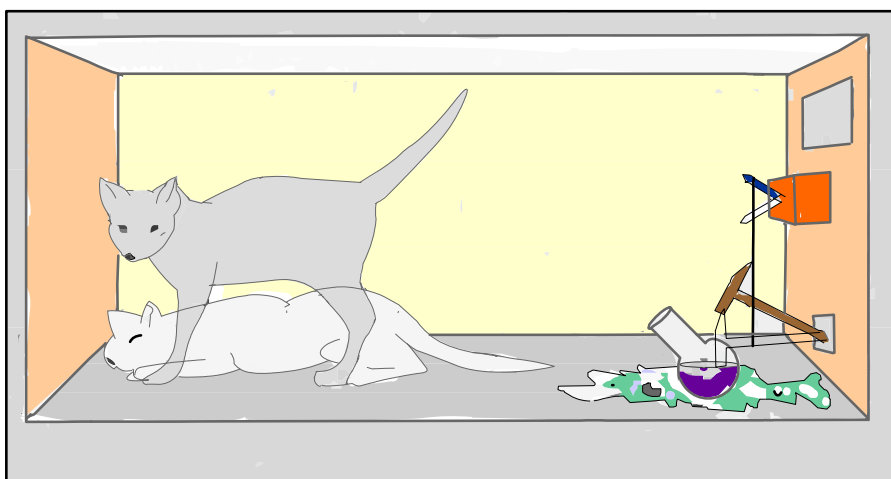


Abbildung 6.5: Schrödingers Katze

Die Wellenfunktion des Gesamtsystems (Kasten + Katze) hat nach dieser Zeit die Form eines *Überlagerungszustands zweier makroskopisch verschiedener Zustände*. Sie enthält die beiden Möglichkeiten „Katze tot“ und „Katze lebt“ in gleichem Maße:

$$\psi(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x), \quad (6.2)$$

wobei $\psi_1(x)$ den Zustand (Atom zerfallen + Katze tot) und $\psi_2(x)$ den Zustand (Atom nicht zerfallen + Katze lebt) bezeichnet. Die Wellenfunktion (6.2) hat die gleiche Gestalt wie die eines Atoms beim Doppelspaltexperiment (Gleichung (5.14)). Dort zeigte sich, dass man dem Atom keinen Spalt zuordnen konnte, durch den es gegangen war. Es besaß die Eigenschaft „Ort“ nicht. Überträgt man diese Erkenntnis auf den Fall der Katze, kommt man zu dem Schluss, dass die Katze in dem Überlagerungszustand (6.2) die Eigenschaften „tot“ oder „lebendig“ *nicht* besitzt.

Es ist wichtig zu betonen: Wie beim Atom hinter dem Doppelspalt handelt es sich bei (6.2) nicht um einen Zustand, in dem man nicht *weiß*, ob die Katze tot oder lebendig ist, sondern sie besitzt tatsächlich diese Eigenschaften nicht. Ähnlich wie beim Doppelspaltexperiment kann es beim Überlagerungszustand (6.2) zu Interferenzerscheinungen zwischen toter und lebendiger Katze kommen. Nun ist es eine evidente Erfahrungstatsache, dass in der Wirklichkeit solche Phänomene nicht vorkommen. Schrödinger ist es also mit diesem Beispiel gelungen, nachdrücklich deutlich zu machen, dass der Übergang von der Quantenmechanik zur klassischen Mechanik nicht ohne Schwierigkeiten zu bewältigen ist.

Schrödingers Katzenparadoxon weist eine enge Verbindung zur Frage auf, wie eine **quantenmechanische Messung** zu beschreiben sei: Anstelle der Katze kann man sich ein Messgerät denken, das den Zerfall eines Atoms in der radioaktiven Substanz durch das Aufleuchten einer Lampe anzeigen soll. Wie im Fall der Katze schließt man, dass sich das Messgerät nach Ablauf einer Stunde in einem Überlagerungszustand befindet, in dem die Lampe keine der Eigenschaften „leuchtet“ oder „leuchtet nicht“ besitzt. Die Quantenmechanik sagt also voraus, dass sich nach einer Messung das Messgerät in einem Zustand befindet, in dem es keinen eindeutigen Wert anzeigt. Dies steht im Widerspruch zu allen Erfahrungen mit Messgeräten.

Dieses Problem, das **quantenmechanische Messproblem**, beschäftigt die Physiker seit mehreren Jahrzehnten. Eine endgültige Lösung hat es bislang noch nicht gefunden. Um Übereinstimmung mit dem beobachteten Verhalten von Messgeräten zu erhalten, wurde „von Hand“ der abrupte Prozess der Zustandsreduktion (s. o.) eingeführt: Bei einer Messung wird die Wellenfunktion nach Zufallsgesetzen aus dem Überlagerungszustand auf eine der Möglichkeiten („Lampe leuchtet“/„Lampe leuchtet nicht“) „reduziert“. Eine Erklärung der Zustandsreduktion, die es erlaubt, sie aus den Grundgesetzen der Quantenmechanik zu verstehen, steht jedoch noch aus.

In den letzten Jahren zeichnet sich ein wissenschaftlicher Konsens ab, wie man dem Verständnis des Schrödingerschen Katzenproblems (und damit auch dem des quantenmechanischen Messprozesses) näher kommen könnte: über die Theorie der **Dekohärenz**. Die zentrale Idee dabei ist, dass man makroskopische Körper (wie die Katze) nicht isoliert betrachten kann. Sie müssen als mit der Außenwelt wechselwirkende **offene Systeme** aufgefasst werden. Sie besitzen immer eine **natürliche Umgebung**, mit der sie auf vielfältige Weise wechselwirken. Die Katze z. B. streut Licht, gibt Wärmestrahlung ab und beeinflusst die Luftmoleküle in der Umgebung.

Schon beim Doppelspaltexperiment konnte man sehen, dass kein Interferenzmuster auftrat, wenn man jedes Atom hinter einem der beiden Spalte durch Lichtstreuung nachwies (vgl. Abschnitt 6.2). Dieser Verlust der Interferenzfähigkeit ist unabhängig davon, ob das gestreute Photon von einem Beobachter registriert wurde oder nicht.

Ebenso zerstört die Lichtstreuung (und auch jede andere Wechselwirkung mit der Umgebung) das Kennzeichen des Überlagerungszustands (6.2): die Interferenzfähigkeit zwischen $\psi_1(x)$ und $\psi_2(x)$ (also zwischen toter und lebendiger Katze). Durch die Wechselwirkung mit ihrer Umgebung wird die Katze „ef-

fektiv klassisch“. Sie ist tot oder lebendig; Überlagerungen oder Interferenzerscheinungen können nicht nachgewiesen werden.

Schrödingers Frage, warum keine Überlagerungszustände bei makroskopischen Körpern auftreten, wird somit durch die Theorie der Dekohärenz beantwortet: Makroskopische Körper erscheinen klassisch, weil man sie nicht von ihrer Umgebung isolieren kann. Die Wechselwirkung mit der Umgebung zerstört die Interferenzfähigkeit. Es gibt jedoch auch besondere Fälle, wo die Isolierung von der Umgebung möglich ist. Dann findet keine Dekohärenz statt und es kommt zu makroskopischen Quantenphänomenen, wie Supraleitung, Suprafluidität und Bose-Einstein-Kondensation.

In jüngster Zeit wird auch der Übergangsbereich zwischen klassischer und Quantenphysik dem Experiment zugänglich. So gelang es 1996, ein Ion in einen Überlagerungszustand aus zwei räumlich um 80 nm getrennten Wellenpaketen zu bringen, deren Ausdehnung jeweils nur 7 nm betrug. Dies stellt eine Überlagerung zweier makroskopisch verschiedener Zustände dar. Die durch die Wechselwirkung mit der Umgebung verursachte Dekohärenz (der Verlust der Interferenzfähigkeit zwischen den beiden Wellenpaketen) konnte in dem Experiment im Detail verfolgt werden.