

3 Von geisterhaften Golfbällen, Fotos im Dunkeln und einer toten Katze, die lebt

Einführung in die rätselhafte Welt der Quantenphysik

»Wenn man das Unmögliche ausgeschlossen hat, muss geschehen sein, was dann noch übrig bleibt, wie unwahrscheinlich es auch zu sein scheint.«

Sherlock Holmes, Detektivfigur

»Sie können auch über Bande spielen«, sagt Friedemann Reinhard von der Universität Stuttgart in leicht gelangweiltem Ton auf die Frage des Spielers hin, ob das möglich sei. Der Spieler, den Minigolfschläger schlagbereit in den Händen, denkt ihm offenbar viel zu konventionell. Nur weil genau zwischen dem Abschlagspunkt und dem Loch ein kreisförmiges Hindernis den direkten Weg zum Ziel versperrt, muss man bei diesem Minigolf noch lange nicht über Bande spielen.

Der nächste Spieler spielt das Hindernis frontal an. Bei einem normalen Minigolf wäre das ziemlich töricht. Bei diesem Minigolf kommt man aber auch so um das Hindernis herum.

Im Audimax der Universität Stuttgart hat der Physiker freilich keine reale Minigolfbahn aufgebaut. Es ist ein auf den Boden projiziertes Computerspiel. Der Schläger trägt eine LED, deren Position von einer Kamera erfasst wird. So wird, ähnlich wie bei einer Wii-Konsole, der reale Schlag des Spielers in die virtuelle Welt übersetzt. Doch es gibt noch einen Unterschied zum Minigolf im Stadtpark: Der simulierte Minigolfball folgt den Gesetzen der Quantenphysik, daher der Name »Quantenminigolf«.

Spieler zwei hat offenbar ein Gespür dafür. Unmittelbar nach dem Schlag saust der Ball in Richtung Hindernis davon. Aber es ist gar kein Ball mehr. Er hat seine feste Kontur verloren und sich in ein kreisförmiges Streifenmuster verwandelt. Als er auf das Hindernis trifft, geschieht etwas Erstaunliches:

Es zerteilt den Ball in zwei Hälften, wie ein Schiffsbug, der durch die Wellen pflügt. Die eine Hälfte rast schräg nach oben und die andere schräg nach unten davon. Beide werden das Ziel verfehlen, denkt der Zuschauer.

Doch dann passiert wieder etwas Eindrucksvolles: Zwischen den beiden Streifenmustern entsteht ein weiteres, das geradewegs Kurs auf das Loch nimmt. Als es dort ankommt, gibt Spieler zwei das Kommando: »Jetzt!« Mitten in dem Kreis, der das Loch symbolisiert, materialisiert sich der blaue Ball. Der Schriftzug »You won« erscheint. »Ja!«, ruft Spieler zwei und reißt den Schläger in die Höhe. Er hat sich soeben die Gesetze der Quantenphysik zunutze gemacht. Er hat den Ball um ein Hindernis herumgelenkt, indem er es direkt anspielte.

Kontrollierbarer Quantenzauber

Das Hindernis direkt anspielen, um es zu umgehen? Klingt widersprüchlich. Ist es aber nicht, wie wir noch sehen werden. Es ist auch keine Zauberei. »Hinter der Quantenphysik steckt nichts Mystisches«, betont Anton Zeilinger. Die Quantenphysik gehorcht klaren, mathematisch beschreibbaren Regeln. Die daraus resultierenden Phänomene widersprechen zwar oft der Alltagserfahrung der Menschen. Doch die menschliche Wahrnehmung erfasst eben nur einen Teil der Realität. Das macht die Welt der kleinen Teilchen aber nicht weniger real und wirksam.

Da nichts Geheimnisvolles an der Quantenphysik ist, kann man durchaus verstehen, warum ein Quantencomputer bestimmte Probleme superschnell löst oder warum eine Quantenkamera auch im Dunkeln fotografieren könnte. Im Folgenden werde ich die Quantenphänomene erläutern, die Anwendungen wie dem Quantencomputer zugrunde liegen. Dadurch sollen Sie ein gewisses Verständnis und eine gewisse Intuition für die Quantenphysik entwickeln, sodass Ihnen die Leistungen der Quantentechnik nicht so überirdisch vorkommen, wie sie oft in der Öffentlichkeit dargestellt werden.¹³

Die Faszination wird Ihnen dadurch aber nicht abhanden kommen. Es wird sein wie bei einer Reise in ein exotisches Land: Alles spielt sich auf dem Boden der Realität ab, aber trotzdem kommt man aus dem Staunen nicht heraus.

13 Oft wird die mystische Aura, welche die Quantenphysik umwabert, sogar für blanken Humbug und Bauernfängerei missbraucht, etwa beim »Quanten-Energiegenerator« oder bei der »Quantenheilung«.

Wechselbalge des Mikrokosmos

Eine erstaunliche Eigenschaft des Lichtes haben wir im ersten Kapitel kennengelernt: Es kommt als eine Horde von Teilchen daher. Diese Teilchen transportieren unterschiedlich große Energiepakete. Ein blaues Photon bringt mehr Energie mit sich als ein rotes.

Aber Moment mal: Hatte Maxwell nicht herausgefunden, Licht sei eine elektromagnetische Welle? Beweise dafür gibt es wie Sand am Meer, z. B. die Regenbogenfarben auf einer öligen Wasserpfütze (siehe Kasten: Der Regenbogen in der Pfütze: Wie geht Interferenz?) oder auf einer CD. Bewiesen ist aber auch die Tatsache, dass es ein Strom von Teilchen ist.

Wie kann Licht beides sein: Teilchen und Welle? Viel unterschiedlicher können zwei Vorstellungen doch nicht sein, oder? Ein Teilchen hat feste Grenzen, wie ein Minigolfball. Es folgt einer klaren Bahn, etwa vom Abschlagpunkt zum Loch. Stößt ein Ball auf einen anderen Ball, ändern sie in der Regel beide ihre Rollrichtung, etwa beim Billard.

Wellen hingegen durchdringen sich gegenseitig und überlagern sich dabei. Sie schaukeln sich gegenseitig auf oder löschen sich zu nichts aus. Ein Phänomen, das man als Interferenz bezeichnet. Wellen breiten sich aus, ändern also ihre Grenzen, z. B. nachdem man einen Stein ins Wasser geworfen hat. Eine Welle kann sogar »um die Ecke« laufen wie etwa eine Schallwelle um einen Baum: Man kann jemanden, der sich hinter einem Baum versteckt, reden hören. Die Schallwelle läuft dabei gleichzeitig links und rechts um den Baum herum.

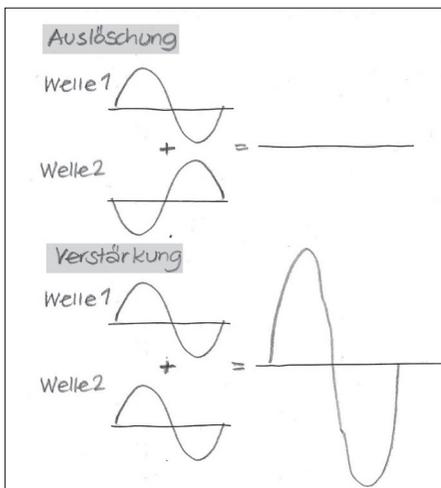


Abb. 3.1 Veranschaulichung der Interferenz. Zwei Wellen, die einander Spiegelbild sind, neutralisieren sich gegenseitig (Auslöschung), während zwei identische Wellen sich zur doppelten Höhe aufschaukeln (Verstärkung)

Der Regenbogen in der Pfütze: Wie geht Interferenz?

»Geteiltes Leid ist halbes Leid und geteilte Freude ist doppelte Freude«, sagt der Volksmund. Im Leben gibt's Auf's und Abs. Zu zweit sind aber die Abs nicht so schlimm, während die Auf's sich verdoppeln.

Bei Wellen ist das ähnlich: es gibt Wellenberge und Wellentäler. Die beiden Wellen können gegeneinander verschoben sein, sodass Wellenberge auf Wellenberge und Wellentäler auf Wellentäler treffen. Dann verstärken sich beide Wellen. Wenn hingegen Wellentäler auf Wellenberge treffen, dann löschen sich die Wellen zu nichts aus. Dieses Phänomen nennt sich Interferenz.

Im Alltag begegnen Sie der Interferenz oft in Form einer Wasserpfütze, die in allen Regenbogenfarben leuchtet. Der Grund ist ein dünner Ölfilm auf dem Wasser. Das Tageslicht wird zweimal reflektiert: auf der Oberfläche des Ölfilms sowie auf der darunterliegenden Wasseroberfläche. Die beiden Reflexionen erzeugen zwei Wellen, die sich überlagern. Aus einem bestimmten Winkel betrachtet haben die beiden Wellen nun einen bestimmten Wegunterschied. Nun gibt es zwei Möglichkeiten: Der Wegunterschied ist so groß wie die Wellenlänge: dann verstärkt sich die Welle. Oder er ist halb so groß wie die Wellenlänge: dann löscht sich die Welle aus.

Das Tageslicht besteht aus allen Farben. Und Farben sind nichts anderes als Licht unterschiedlicher Wellenlänge. Wenn Sie die Pfütze anblicken, dann fallen Lichtwellen vom Ölfilm aus leicht unterschiedlichen Winkeln in Ihr Auge. Die Winkel entsprechen unterschiedlichen Wegunterschieden des Lichtes. Damit entsprechen sie auch unterschiedlichen Wellenlängen, die verstärkt bzw. ausgelöscht werden. Die Folge: Sie sehen einen Regenbogen.

Das Licht schlüpft in beide gegensätzliche Formen, Welle und Teilchen, wie ein Gestaltwandler. Der Wechselbalg Odo aus der Science-Fiction-Serie »Deep Space Nine« sieht normalerweise aus wie ein Mensch. Er kann sich aber verflüssigen und, wenn Gefahr in Verzug ist, durch Türritzen schlüpfen. Welche Form er sich gibt, hängt von der Situation ab. Auch die Form, in der Licht erscheint, hängt von der Situation ab, sprich: von dem Experiment, das man durchführt.

Ein wichtiges Experiment sieht so aus: Strahlt man Licht auf einen Schirm mit zwei schmalen parallelen Spalten, dann zeigt es Interferenz. Der Doppelspalt teilt die Welle in zwei Teilwellen, die sich hinter dem Schirm überlagern. In einigen Richtungen verstärken sie sich, in anderen löschen sie sich aus. Auf

einem zweiten Schirm hinter dem Doppelspalt ergibt sich daher ein Muster aus parallelen Lichtstreifen und dunklen Streifen dazwischen.

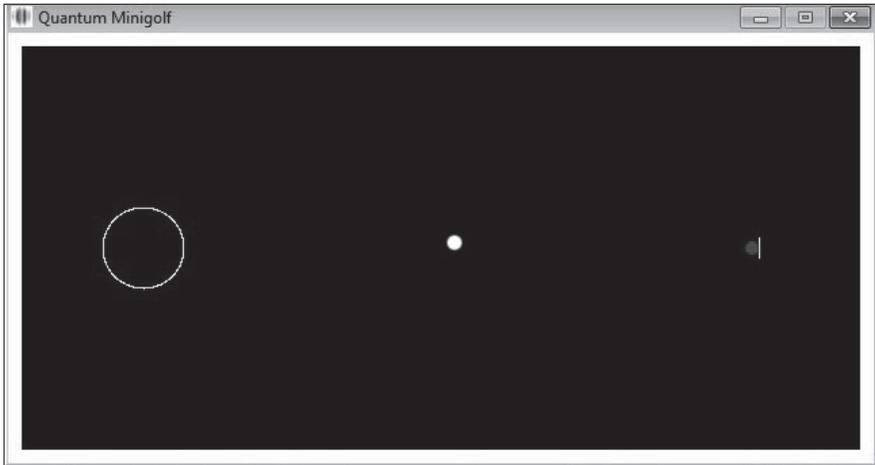
Beleuchtet man hingegen eine Metallplatte, benimmt Licht sich wie ein Teilchenstrom. Wie die Kugeln aus einer Schrotflinte Trümmer aus einem Ziel herausschlagen, schlägt es Elektronen aus dem Metall. Es gibt noch andere Experimente, wo sich Licht als Teilchenstrom präsentiert: Lichtteilchen lassen sich tatsächlich mit Detektoren zählen, ein weiterer Beweis ihrer Existenz. Physiker können inzwischen einzelne Photonen erzeugen und sie als Informationsträger benutzen, wie wir noch sehen werden.

Physiker nennen die Wandlungsfähigkeit Welle-Teilchen-Dualismus. Er zeigt, dass man sich von der naiven Vorstellung, Materie bestehe aus Bausteinen, die wie Legofiguren zu Planeten oder Lebewesen zusammengesteckt sind, verabschieden muss. Er ist ein erstes Beispiel dafür, dass die Begriffe unserer Alltagssprache die Quantenwelt nur unvollkommen beschreiben.

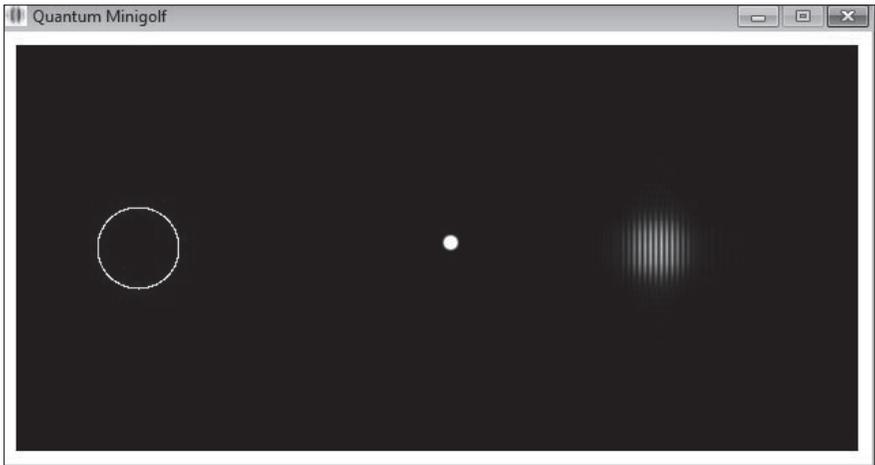
Wie im ersten Kapitel schon angesprochen, sind Photonen nicht die einzigen Wechselbälger der Quantenwelt. Der Welle-Teilchen-Dualismus ist vielmehr ein allgemeines Prinzip. Er gilt für alle Quantenobjekte: Elektronen, Protonen, Neutronen, ganze Atome oder Moleküle. Sie alle schlüpfen je nach Situation in die Wellen- oder in die Teilchenrolle. Physiker sprechen daher auch von Materiewellen.

Beliebig ist dieser Rollentausch indes nicht. Die Teilchen- und die Welleneigenschaften sind gekoppelt. Die Farbe von Photonen hängt mit ihrer Energie zusammen. Ähnlich hängt die Wellenlänge von anderen Quantenobjekten mit ihrer Masse und Geschwindigkeit zusammen. Je größer Masse und Geschwindigkeit, desto kürzer die Wellenlänge der Materiewelle.

Wir verstehen jetzt auch, was nach dem Abschlag beim Quantenminigolf passiert: Der Spieler gibt dem Ball eine bestimmte Geschwindigkeit. Damit einher geht eine bestimmte Materiewellenlänge. Der Ball verwandelt sich in eine Welle, deren Wellenlänge dem Abstand der Streifen entspricht (siehe Abb. 3.2).



A



B

Abb. 3.2 Vor dem Schlag (A) ist der Ball (Kreis am rechten Rand) noch ein Ball. Nach dem Schlag erhält er eine bestimmte Geschwindigkeit und verwandelt sich in eine entsprechende Welle (B).

Bis jetzt haben wir nur über den Mikrokosmos gesprochen, also über unsichtbar winzige Partikel. Können auch sichtbare Objekte als Gestaltwandler auftreten? Physiker haben noch keine obere Größengrenze für den Welle-Teilchen-Dualismus gefunden. Sogar Riesenmoleküle aus 800 Atomen verhalten sich wie Wellen, wie Wiener Physiker um Markus Arndt mit einem Interferenzexperiment 2013 zeigten.¹⁴ Die Moleküle haben eine Wellenlänge von 500 Femtometern. Ein Femtometer ist der Millionste Teil eines Milliardstel eines Meters. Der Durchmesser eines Atoms ist etwa 200 Mal größer als die Wellenlänge des Moleküls und der eines Haares rund 200 Millionen Mal.

Auch Ihr eigener Körper unterliegt dem Welle-Teilchen-Dualismus. Sie könnten im Prinzip also auch mal Welle sein. Doch weil Sie im Vergleich zu einem Elektron wahnsinnig schwer sind, wäre Ihre Wellenlänge verschwindend klein. Ein Femtometer wäre astronomisch dagegen. Das ist einer der Gründe, warum Ihre Wellennatur nicht zutage tritt.

Materiewellen: Wozu taugen sie?

Materie ist ein Gestaltwandler, der mal die Form von Teilchen, mal die von Wellen annimmt. Das klingt esoterisch, nach Yin und Yang, Erdstrahlen oder so was. Aber Materiewellen sind so real wie Radiowellen und lassen sich technisch nutzen. Nur zwei Beispiele von vielen:

Im *Elektronenmikroskop* lenken Magnetfelder, auch »Elektronenlinsen« genannt, die Elektronen auf ähnliche Bahnen, wie optische Linsen im herkömmlichen Mikroskop das Licht lenken. Prompt schlüpfen die Elektronen in das Gewand einer Welle und vergrößern Objekte. Die Elektronen werden durch eine Spannung stark beschleunigt, sodass ihre Materiewellenlänge so klein wird wie ein einzelnes Atom. Daher kann das Mikroskop tatsächlich Strukturen zeigen, die kaum größer sind als ein Atom, z. B. Nanopartikel. Es ist damit 1000-Mal präziser als ein Lichtmikroskop.

Ein Laser kann nicht nur mit Licht, sondern auch mit Atomen verwirklicht werden. Denn Atome bilden Materiewellen. Mit einem *Atomlaser* lassen sich, wie mit dem Lichtlaser, Hologramme erzeugen. Diese haben wegen der äußerst kleinen Materie-Wellenlänge eine extrem feine Auflösung. Eine Idee ist es, damit dreidimensionale Schaltpläne in Halbleiter zu schreiben, sodass Chips auf noch viel kleinerer Fläche noch deutlich mehr Rechenleistung erzielen als heute möglich.

14 Eibenberger, S. et al.: Phys. Chem. Chem. Phys., 2013, 15, 14696–14700, DOI: 10.1039/C3CP51500A

Wir verstehen jetzt einen weiteren Teil des Quantenminigolf: Das Hindernis teilt die Welle in zwei Teilwellen. Weil diese aus der gleichen Welle hervorgehen, können sie sich überlagern. Genau das tun sie hinter dem Hindernis, wie die waagrechten dunklen Streifen im Wellenmuster zeigen (siehe Abb. 3.3).

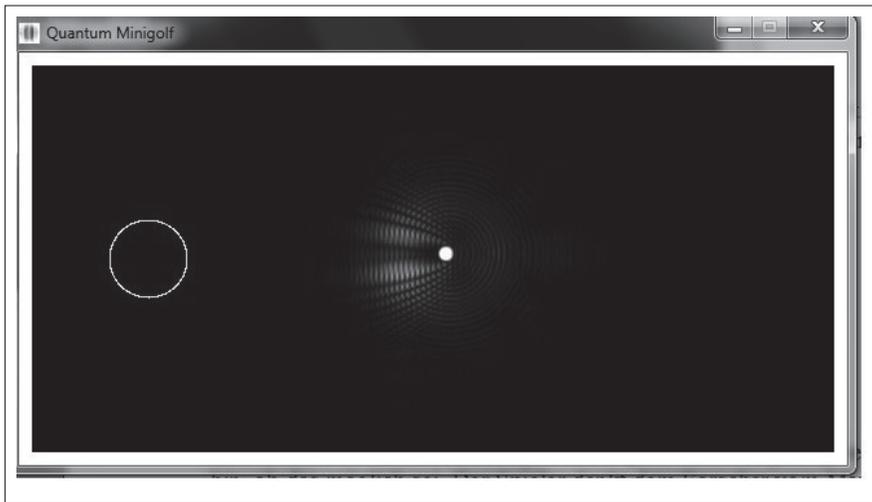


Abb. 3.3 Die Materiewelle des Quantenminigolfs wird vom Hindernis (weißer Kreis) geteilt. Da die beiden Hälften aus der gleichen Materiewelle hervorgehen, können sie interferieren. Das zeigt sich im waagrechten Streifenmuster der Welle. Man beachte, dass die Materiewelle sich auch direkt hinter dem Hindernis zeigt.

Welle und Teilchen unter einen Hut gebracht

Kein Wunder, dass der Welle-Teilchen-Dualismus den Physikern des frühen 20. Jahrhunderts ganz und gar nicht gefiel. Man würde im Supermarkt ja auch kein Fischschweineschnitzel oder eine Gurkenerdbeere kaufen. Daher versuchten sie, die beiden Konzepte unter einen Hut zu bringen. Zwar gelang ihnen das durch die Entwicklung der modernen Quantenphysik in den 1920er Jahren. Doch damit handelte man sich noch viel unbegreiflichere Konsequenzen ein, wie wir gleich sehen werden.

Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger stellte 1926 eine Formel auf, die die Ausbreitung von Materiewellen beschreibt. Sie war ein großer Durchbruch, weil mit ihr die Welt der Atome, Elektronen oder Photonen exakt berechenbar wurde. Mit der Schrödinger-Gleichung lässt sich für alle denkbaren Quantenobjekte die so genannte Wellenfunktion ausrechnen. Aus der Wellenfunktion ergeben sich zum Beispiel die aus dem Schulunterricht

bekannten Orbitale der Elektronen. Genau: diese Dinger, die an Keulen, Hanteln und Donuts erinnern. Sie beschreiben die Materiewellen von Elektronen, die von einem positiv geladenen Atomkern festgehalten werden. Die Wellen breiten sich dann nicht aus, sondern schwingen auf der Stelle auf und ab. Vergleichbar ist das mit einem Sprungseil, das an zwei Enden festgehalten wird und auf- und abschwingt, ohne sich fortzubewegen.

Auch die Wellenfunktion für ein Elektron, das ein Doppelspalt-Experiment durchfliegt, lässt sich ausrechnen. Interessant wird es, wenn man folgendes Experiment macht: Schwäche die Intensität der Elektronenquelle so weit ab, dass ein Elektron nach dem anderen die Anordnung durchquert. Zu jedem Zeitpunkt befindet sich also nur ein einziges Elektron in der Versuchsanordnung.

Die Photoplatte hinter dem Doppelspalt detektiert jedes einzelne eintreffende Elektron. Es erscheint ein Punkt nach dem anderen, zufällig auf der Platte verteilt, wie Hagelkörner. Doch nach und nach zeigt sich in der Zufallsverteilung ein Muster: helle und dunkle Streifen, die sich abwechseln (Abb. 3.4). Die einzelnen Elektronen landen also nicht willkürlich auf der Platte. Vielmehr gibt es für jedes Partikel Orte, an dem es wahrscheinlicher auftritt als an anderen.

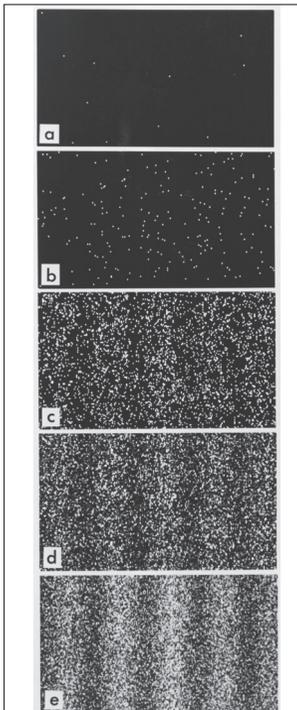


Abb. 3.4 Das Doppelspalt-Experiment mit Elektronen. Auf der Photoplatte zeichnen sich nach und nach einzelne Elektronen ab, die nach und nach ein immer deutlicher hervortretendes Interferenzmuster bilden.
(Quelle: Dr. Tonomura and Belsazar)

So kommen also Wellen- und Teilchenbild zusammen. Die einzelnen Elektronen verhalten sich wie Teilchen, aber im Kollektiv zeigen sie ein Verhalten, das für Wellen typisch ist: ein Interferenzmuster.

Ein »Kollektiv«, das sich wie eine Welle benimmt, ist schwer vorstellbar. Ich will eine Erklärung anhand des Kollektivs der Autofahrer in einer Stadt versuchen. Zu welchen Uhrzeiten eines Werktages sind die Durchgangstraßen am meisten verstopft? Zu den Stoßzeiten natürlich. Dazwischen ist deutlich weniger los, und mitten in der Nacht fast gar nichts mehr. Die Wahrscheinlichkeit, einen bestimmten Autofahrer in den Straßen zu finden, ist also zur Stoßzeit viel höher als mitten in der Nacht.

Hier taucht der Begriff der Wahrscheinlichkeit auf. Sie beschreibt, wann mit vielen Autos zu rechnen ist und wann mit wenigen. Ähnlich ist es mit den Elektronen, die auf die Photoplatte auftreffen. Es gibt für jedes Elektron eine Wahrscheinlichkeit, wo es sich wann aufhält. Der Clou: Diese Wahrscheinlichkeit breitet sich wie eine Welle aus. Etwas genauer gesagt, ist es ein mathematisches Konstrukt namens »Wellenfunktion«, das sich wellenförmig bewegt.¹⁵

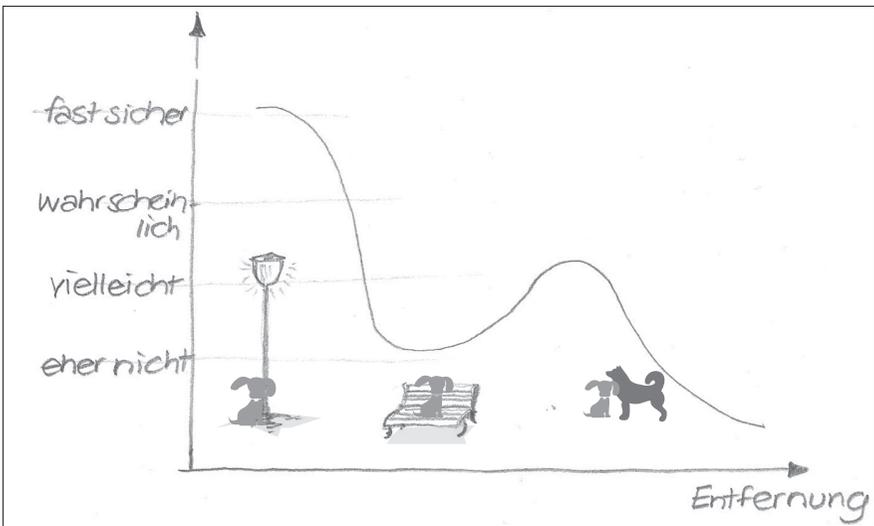


Abb. 3.5 Quanten-Waldis Wellenfunktion

15 Physiker mögen die Ungenauigkeit verzeihen. Die Wellenfunktion selbst gibt keine Wahrscheinlichkeiten an. Dafür muss sie sich noch einer Rechenprozedur unterziehen. Aber im Rahmen dieses Buches für Laien sei die Vereinfachung erlaubt.

Um sich besser vorstellen zu können, was eine quantenphysikalische Wellenfunktion ist, folgendes Bild: Sie gehen mit Ihrem Hund Waldi im Park Gassi, ausnahmsweise ohne Leine. Schließen Sie die Augen und warten ein paar Sekunden. Sie können nun nicht mehr mit Sicherheit sagen, wo sich Waldi gerade befindet. Mit einiger Wahrscheinlichkeit wird er sich nicht weiter als zehn Meter entfernt haben. Es ist zudem deutlich wahrscheinlicher, dass Waldi gerade an einen Laternenmast pinkelt, als dass er auf einer Parkbank hockt. Waldis »Wellenfunktion« sieht also in etwa wie in Abb. 3.5 aus.

Dieses Bild hat den Schönheitsfehler, dass Waldis Wellenfunktion sich nicht wie eine Welle ausbreitet. Es geht nur darum zu veranschaulichen, welche Art von Information eine Wellenfunktion enthält. Aus Kapitel 2 kennen wir schon den Begriff der »Amplitude«, der angibt, wie hoch die Wellenberge und wie tief die Wellentäler sind. Auch bei der quantenmechanischen Wellenfunktion wird dieser Begriff genutzt. Grob gesagt bedeutet eine hohe Amplitude der Wellenfunktion eine hohe Wahrscheinlichkeit für ein Messergebnis. Wir werden dem Begriff in den folgenden Kapiteln ein paar Mal begegnen.

Unbestechliche Würfel

Die Quantenphysik rührt auch an dem, was wir Schicksal oder Vorherbestimmung nennen, denn in ihr spielt der Zufall eine erstaunliche Rolle. Zufall ist in unserer Welt oft nur scheinbar. Bei welcher Aktivität Sie Waldi nach dem Öffnen Ihrer Augen erblicken, ob er nun an den Laternenpfahl pinkelt, ein Eichhörnchen jagt oder eine Hündin beschnuppert, erscheint Ihnen zufällig, Sie können es nicht mit Sicherheit vorhersagen.

In Wirklichkeit gibt es aber eine Vorgeschichte und somit eine Ursache für Waldis Verhalten. Sie kriegen Sie mit geschlossenen Augen nur nicht mit. Wenn die Hündin nicht des Weges gekommen wäre, würde Waldi vielleicht an den Laternenmast pinkeln. Wenn an dem Mast nicht die Duftspur eines anderen Hundes wäre, würde er es lassen usw. Nichts in Waldis Verhalten ist wirklich zufällig, also ohne Grund.

Doch in der Quantenwelt ist genau das der Fall. Niemand kann vorhersagen, wo genau das nächste Elektron auf der Photoplatte auftreffen wird. Trifft es 2,3 Zentimeter rechts von der Mitte und 5,1 Zentimeter unterhalb der Oberkante auf, dann gibt es dafür nicht die geringste Ursache.

Denn bis zur Messung war das Teilchen eine Wahrscheinlichkeitswelle. Es gibt keine Bahn, auf der es zu dem besagten Ort gereist wäre. Es materialisiert sich dort im Moment der Messung, genauso gut hätte es 5 Zentimeter