

### 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«, antwortet Friedemann Reinhard von der Universität Stuttgart in leicht gelangweiltem Ton auf die Frage des Spielers, 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. Hier jedoch 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 Golfball 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**

Auf das Hindernis zielen, um es zu umgehen? Klingt widersprüchlich. Ist es aber nicht. 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. 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 zugrundeliegen. So können Sie ein 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.<sup>8</sup>

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.

## Wechselbalge des Mikrokosmos

Eine bemerkenswerte Eigenschaft des Lichts 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 Abschlagspunkt zum Loch. Stößt ein Ball auf einen anderen Ball, ändern beide in der Regel 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.

### **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.

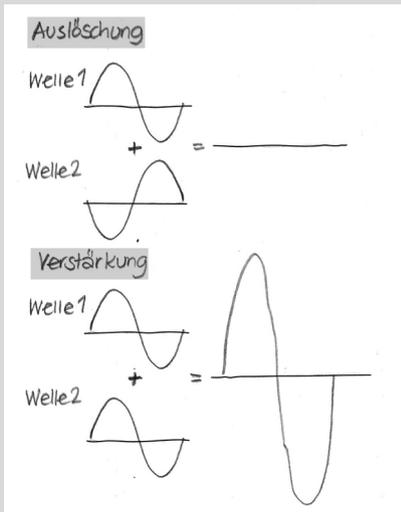
Bei Wellen ist das ähnlich: Es gibt Wellenberge und Wellentäler. Zwei Wellen können gegeneinander verschoben sein, sodass Wellentäler auf Wellenberge treffen. Dann löschen sich die Wellen zu nichts aus. Wenn hingegen Wellenberge auf Wellenberge und Wellentäler auf Wellentäler treffen, verstärken sich beide Wellen. 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 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 Lichts. Damit entsprechen sie auch unterschiedlichen Wellenlängen, die verstärkt bzw. ausgelöscht werden.



Die Folge: Sie sehen einen Regenbogen.



**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).

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 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, spricht: 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

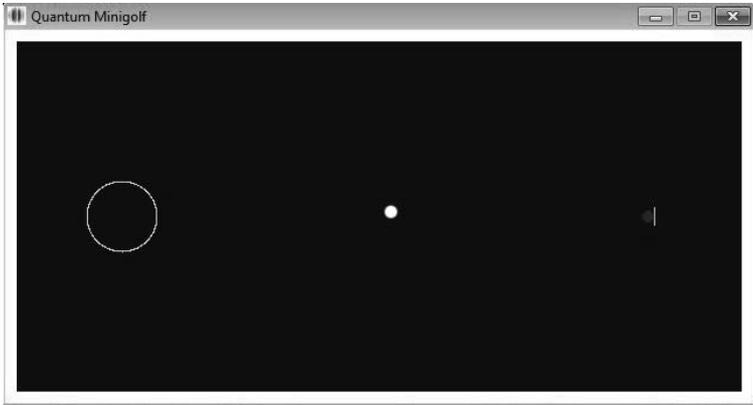
Trümmer aus einem Ziel herausschlagen, schlägt es Elektronen aus dem Metall. Es gibt noch andere Experimente, wo sich Licht als Teilchenstrom präsentiert: Lichtteilchen lassen sich tatsächlich mit Detektoren zählen, ein weiterer Beweis ihrer Existenz. Physiker können inzwischen einzelne Photonen erzeugen und sie als Informationsträger benutzen.

Physiker nennen die Wandlungsfähigkeit Welle-Teilchen-Dualismus. Dieser 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.

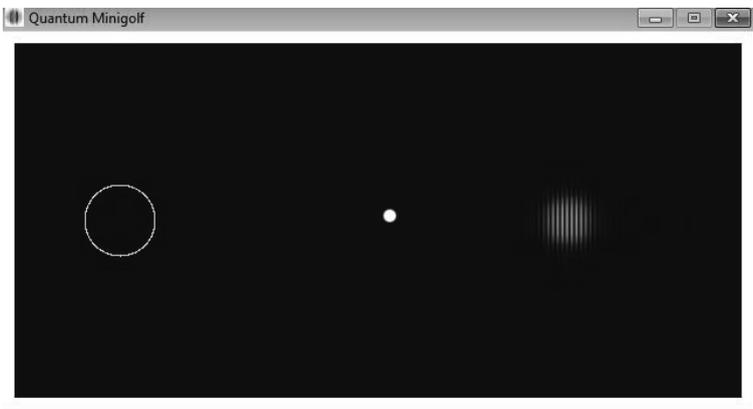
Wie im ersten Kapitel schon angesprochen, sind Photonen nicht die einzigen Wechselbälger der Quantenwelt. Der Welle-Teilchen-Dualismus ist vielmehr ein allgemeines Prinzip. Er gilt für alle Quantenobjekte: Elektronen, Protonen, Neutronen, ganze Atome oder Moleküle. Sie alle schlüpfen je nach Situation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

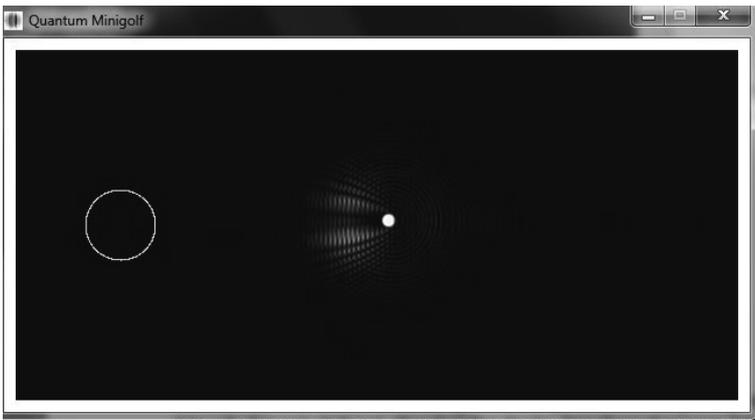
**Abb. 3-2** Vor dem Schlag (A) ist der Ball (Kugel am rechten Rand) noch ein Ball. Nach dem Schlag erhält er eine bestimmte Geschwindigkeit und verwandelt sich in eine entsprechende Welle (B).

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 fast 2000 Atomen verhalten sich wie Wellen,

wie Wiener Physiker um Markus Arndt mit einem Interferenzexperiment 2019 zeigten.<sup>9</sup> Die Moleküle haben eine Wellenlänge von 50 Femtometern. Ein Femtometer ist der Millionste Teil eines Milliardstel eines Meters. Der Durchmesser eines Atoms ist etwa 5000 Mal größer als die Wellenlänge des Moleküls und der eines Haares rund eine Milliarde 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.

Wir verstehen jetzt einen weiteren Teil des Quantenminigolfs: 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, wenn auch nur schwach (bitte genau hinsehen!).

## **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 Bahnen, ähnlich 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.

Zweites Beispiel: 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 Materiewellenlänge 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.

## **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.

## 7 Codeknacken, superschnelle Datensuche und sicheres Cloud-Computing

**Werden Quantencomputer einmal allgegenwärtige Superrechner sein oder ein Nischenprodukt für einige Spezialanwendungen?**

*»Die Technik zog sich Siebenmeilenstiefel an. Das Bewusstsein hat normale Schrittlänge.«*

*Heinrich Wiesner, Schweizer Schriftsteller*

Düsterer als das Magazin »Focus« kann man die Bedrohung »Quantencomputer« wohl kaum zeichnen: »US-Monsterrechner droht, die Welt ins Chaos zu stürzen«,<sup>57</sup> überschrieb das Blatt einen Artikel über die Absicht der NSA, einen Quantenrechner zu bauen. Himmelhoch jauchzend geht es aber auch, indem Journalisten, wie oft geschehen, vom »Wunderrechner« schreiben. In jedem Fall rückt mancher Journalist rechnende Quanten in die Nähe einer wahlweise zerstörerischen oder konstruktiven Allmacht.

Es geht aber auch in die andere Richtung. Mit Blick auf die bislang enttäuschende Quantentechnik der Firma D-Wave Systems ist oft von einem »Flop« die Rede.

Na, was denn nun? Kann einem denn niemand sagen, ob Quantencomputer die Welt umkrempeln oder eine Laborkuriosi-

tät bleiben werden? Genau das will ich in diesem Kapitel versuchen.

Es lässt sich bemäkeln, dass 20 Jahre nach den Entdeckungen des Shor- und des Grover-Algorithmus trotz intensiver Forschung kaum weitere »Partituren« für das Quantenorchester von vergleichbarer Schlagkraft komponiert wurden. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass die Grenzen des Quantencomputers sehr eng gesteckt sind. Doch Peter Shor selbst ist anderer Meinung, wie wir noch sehen werden.

Um einen »Wunderrechner« zu erfinden, muss man sich jedenfalls gewaltig ins Zeug legen, denn die Konkurrenz durch den klassischen Computer ist enorm. Das Konzept des Von-Neumann-Rechners kann im Prinzip alles, was *irgendeine Art von Computer* kann. Er ist eine Universalmaschine.

»Universell« bedeutet allerdings nicht, dass der klassische Rechner *alles* berechnen kann, er hat seine Grenzen, wie schon Alan Turing in den 1930er-Jahren bewies. Der britische Mathematiker fragte sich, was sich überhaupt berechnen lässt und was nicht. Vor dem so genannten Halteproblem muss jeder Computer kapitulieren, zeigte Turing. Demnach gibt es kein Computerprogramm, das ein anderes Programm daraufhin testet, ob dieses endlich oder unendlich lange braucht, bis es ein Ergebnis ausspuckt. Was akademisch klingt, begegnet vielen Menschen tagtäglich: abstürzende Software. Die Entwickler haben kein Testprogramm, das ihnen vorab sagt, ob neu entwickelte Software aufgrund eines Programmierfehlers in eine Endlosschleife geraten kann oder nicht. Das müssen die Nutzer leidvoll in der Praxis testen.

Einen Quantencomputer als »Wunderrechner« zu bezeichnen ist insofern irreführend, als er die gleichen Grenzen hat wie ein klassischer Computer. Zumindest, was die Art von Problemen angeht, die er lösen kann. Denn er ist eben auch nur ein Computer und kann nicht mehr können als eine universelle Maschine. Auch er wird am Halteproblem scheitern. Wer auf künftige Absturzsicherheit hofft, sei hiermit schon mal enttäuscht.

Es gibt allerdings Aufgaben, die normale Rechner zwar in einer endlich langen Zeitspanne *lösen* können, die aber *unakzeptabel* lang ist. Fünf Milliarden Jahre sind eben auch eine »endliche Zeitspanne«. Dies sind jene Probleme, die exponentiell mit ihrer Größe wachsen. Das Problem des Handlungsreisenden vervielfacht seine Komplexität mit jeder hinzukommenden Stadt. Und eine Zahl in ihre Primfaktoren zu zerlegen (was der RSA-Verschlüsselung zugrundeliegt) wird mit jeder zusätzlichen Dezimalstelle der Zahl um etwa den Faktor zehn zeitaufwendiger.

Um dieses Problems Herr zu werden, müsste man einen klassischen Rechner im gleichen Maß ausbauen, wofür man letztlich ganze Kontinente mit Prozessoren bedecken müsste. Diese Art Probleme sind also für klassische Rechner nicht handhabbar.

Der Quantencomputer unterscheidet sich wohltuend: Fügt man ein Qubit zu einem Quantenregister hinzu, passiert etwas Ähnliches wie beim Hinzufügen einer Stadt zum Problem des Handlungsreisenden: Die Zahl der parallel gespeicherten Werte verdoppelt sich. Die Rechenkapazität wächst somit genauso schnell wie die Komplexität des Problems, nämlich exponentiell. Der Quantencomputer sollte daher die hochkomplexen Aufgaben auch dann noch in wenigen Schritten lösen können, wenn ein normaler Rechner dafür Jahrtausende oder länger bräuchte.

So keimte nach Peter Shors Coup im Jahr 1994 die Hoffnung, der Quantencomputer würde *alle* diese aufsässigen Probleme handstreichartig niederstrecken. »Diese Hoffnung hielt ungefähr sechs Monate an«, kommentiert Seth Lloyd. Inzwischen ist eine deutliche Ernüchterung eingetreten.

Der Quantencomputer rechnet nicht *pauschal* schneller als ein normaler Rechner. »In der öffentlichen Wahrnehmung herrscht ein großes Missverständnis«, meint Scott Aaronson, der das Potenzial und die Grenzen von Quantencomputern erforscht. »Die Leute denken, dieser Rechner gehe durch eine Überlagerung aller möglichen Antworten und irgendwie schreie die korrekte Antwort laut über alle anderen hinweg, um sich bemerkbar zu machen«, sagt der Informatiker.

Im vorletzten Kapitel haben wir aber gelernt, dass vielmehr eine Orchestrierung nötig ist, um die richtige Antwort herauszufiltern. In Aaronsons Worten: »Die Antworten werden im Quantencomputer in Form von Wellen dargestellt und Wellen können sich gegenseitig auslöschen oder verstärken«, erklärt er. »Die Kunst ist, die Interferenz so zu steuern, dass sich die Wege, die zu den falschen Antworten führen, gegenseitig auslöschen und am Ende nur der Weg zur richtigen Antwort übrig bleibt.«

Ob das gelingt oder nicht, hängt von der Art des Problems ab. Es gibt sozusagen wohlorganisierte Profiorchester, bei denen sich der Dirigent leicht tut, den Musikern eine berührende Interpretation von Beethoven oder Tschaikowski zu entlocken. Das sind die für Quantencomputer lösbaren Aufgaben. Andererseits existieren Probleme, die eher einem frisch zusammengewürfelten Schülerorchester gleichen, aus dem selbst ein Daniel Barenboim keine sonderlich wohlklingende Symphonie herauskitzeln könnte.

Klingt abstrakt? O. K., sehen wir uns ein paar Beispiele für solche Orchestrierungen an. Fangen wir mit dem Grover-Algorithmus an, der in Datenbanken sucht.

## Shiva und der Hütchenspieler

Stellen Sie sich vor, Ihr Smartphone zeigt Ihnen die unbekanntete Nummer eines entgangenen Anrufs. Sie würden gerne wissen, wer da angerufen hat. Google schweigt sich aber darüber aus. Es bleibt nur das Telefonbuch. Wenn es sich um eine, sagen wir, Münchner Nummer handelt, haben Sie einen echten Scheißjob vor sich.

Denn eine bessere Methode, als Eintrag für Eintrag zu prüfen, gibt es nicht. Was dumm ist, wenn man sich entscheidet, von A bis Z Nummer für Nummer zu prüfen und sich schließlich herausstellt, dass die Person »Zwenger« heißt. Dann hat man eine Million Nummern gecheckt! Nur selten wird der Suchende dieses Pech haben, aber durchschnittlich fallen bei dieser mühseligen Methode immerhin 500.000 Prüfungen an.

Ein Quantencomputer hingegen würde, zumindest theoretisch, mit 1000 Rechenschritten auskommen, also 500 Mal weniger. Je größer die Datenbank ist, desto gewaltiger wird auch der Unterschied zwischen der Quantensuchmethode und dem herkömmlichen Abklappern. Bei zehn Milliarden Einträgen müsste ein klassischer Rechner im Schnitt fünf Milliarden davon prüfen, während ein Quantencomputer mit 100.000 Rechenschritten auskäme. Hier ist das Missverhältnis schon 50.000 : 1. Allgemeingültig ausgedrückt: Die Zahl der Anfragen steigt mit der klassischen Methode proportional zur Anzahl der Datenbankeinträge, mit dem Quantencomputer nur proportional zur Quadratwurzel dieser Anzahl.

Dass eine Google-Anfrage trotz riesiger Datenmengen nur Bruchteile von Sekunden dauert, liegt allerdings nicht etwa daran, dass im kalifornischen Mountainview schon Quantenserver stünden. Vielmehr gibt es ein mächtiges Hilfsmittel, um mit klassischen Suchmethoden schnell fündig zu werden: der so genannte Index. In unserem Szenario würde ein Index die Telefonnummern *in sortierter Reihenfolge* enthalten, sodass der Computer die Nummer schnell findet. Neben der Nummer stünde ein Verweis auf den Namen »Zwenger«.

Der Datenbankindex ähnelt dem Schlagwortregister am Ende eines Buchs.

Die Erstellung eines Index nimmt also bestimmte Suchanfragen vorweg, der Aufwand wird vorverlagert. Google liefert so fix, weil es schon zuvor Ressourcen in den Aufbau von Indizes gesteckt hat. Internet-Suchmaschinen erstellen laufend Indizes und verbrauchen damit immer mehr Energie und Speicherplatz.

Je mehr die Datenflut zu einem gewaltigen Daten-Tsunami anwächst, desto wünschenswerter wäre ein Computer, der auch in *unsortierten* Datenbanken schnell fündig wird, also ohne aufwendig erzeugte Indizes auskommt. Wie massiv die Datenberge anschwellen, sei hier nur anhand des größten Teilchenbeschleunigers der Welt, des Large Hadron Collider am europäischen Kernforschungszentrums CERN bei Genf, veranschaulicht. Dieser produ-

ziert jedes Jahr 15 Millionen Gigabytes an Messdaten, womit man mehrere Hunderttausend DVDs füllen könnte. Forscher durchsuchen die Daten nach hypothetischen und, falls existent, extrem seltenen Auffälligkeiten. Sie fahnden nach Abweichungen von der Regel, die auf neue Physik jenseits der Grenzen der bekannten Naturgesetze hinweisen.

Mit jeder neuen Datenquelle, jedem neuen Heuhaufen in der Welt, mit jeder darin versteckten Nadel wächst das Bedürfnis nach schnellen Suchmöglichkeiten.

Kann ein Quantencomputer die gewünschte Blitz-Suchmaschine liefern? Wir wissen: Er verarbeitet alle Lösungsmöglichkeiten parallel. Übertragen auf die Namenssuche: Er kann das Suchkriterium, die Telefonnummer, simultan mit allen Einträgen vergleichen. Der Quantenrechner ähnelt ein bisschen dem hinduistischen Gott Shiva mit seinen vielen Armen. Stellen wir uns vor, dass Shiva mit jedem seiner Arme in einer anderen Parallelwelt hantiert. Er könnte damit z.B. einen Hütchenspieler überlisten, indem er simultan unter alle drei Hütchen guckt. Doch jemandem, der sich Shiva zu Diensten machen will, bringt das nichts, solange der Gott ihm nicht mitteilt, unter welchem Hütchen die Nuss denn nun liegt.

Ein Quantencomputer ist ähnlich schweigsam. Das Quantenregister enthält zwar jede Menge Information, nämlich mit welchen Wahrscheinlichkeiten bei einer Messung welcher der vielen gespeicherten Werte herauskommt. Aber man kann eben immer nur *einen* dieser Werte auslesen, wobei die Information über die Wahrscheinlichkeit der anderen Messwerte verlorengeht.

Was fängt man aber mit einem Rechner an, der zwar »weiß«, unter welchem Hütchen das Ergebnis steckt, beim Messen aber *irgendein* Hütchen aufdeckt?

Man muss sich etwas einfallen lassen, um auf Anhieb das richtige Hütchen zu raten. Das gelingt, indem man die Wahrscheinlichkeiten geschickt manipuliert. Der indisch-amerikanische Physiker Lov Grover entwickelte 1996 an den Bell Labs in Murray Hill einen Algorithmus dafür, eben den Grover-Algorithmus. Dieser

zeigt auf einfache Weise, wie Quantencomputer einmal arbeiten sollen. Deshalb sehen wir uns das mal genauer an.

Stellen Sie sich ein Quantenregister mit zwei Qubits vor. Es speichert vier binäre Werte, nämlich 00, 01, 10 und 11.

Auf das Register wendet man das Hadamard-Gatter an, sodass eine Superposition der vier Zahlen entsteht. Jeder der Werte ist gleichberechtigt, das heißt, er würde bei einer Messung mit gleicher Wahrscheinlichkeit herauskommen wie die drei anderen, was in Abbildung 6–1 als gleich lange Striche dargestellt ist.

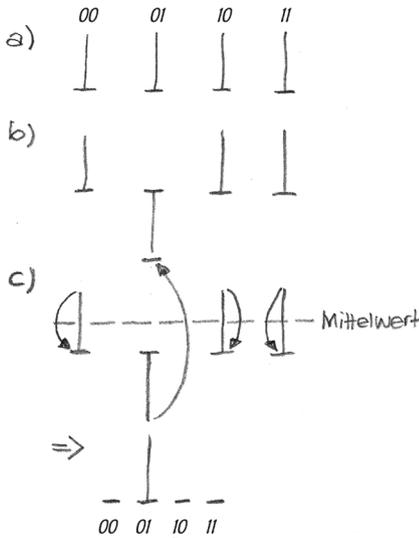
Das Ziel von Grovers Algorithmus ist es, die Messwahrscheinlichkeit für den richtigen Wert zu vergrößern und die aller anderen möglichst auf null zu reduzieren. Dann wird beim Auslesen der Richtige angezeigt.

Den gesuchten Wert findet man mit einem Suchfilter. Stellen wir uns diesen als eine Black Box vor, die die Phase um 180 Grad dreht, wenn sie den gesuchten Eintrag prüft, und bei falschen Einträgen nichts verändert. Das manipuliert die Superposition wie in Abbildung 6–1 b dargestellt. Der Witz ist, dass der Suchfilter alle vier Einträge gleichzeitig prüft, da diese in der Superposition ja parallel existieren. Es ist wie mit Shiva und dem Hütchenspieler. (Wie gesagt, kommt es uns hier nicht so sehr darauf an, wie die Suche selbst funktioniert, sondern wie der Quantencomputer uns das Suchergebnis mitteilt.)

Die Phase der Wellenfunktion des richtigen Werts, angenommen, es ist 01, wird also um 180 Grad gedreht, während alle anderen unangetastet bleiben. Allerdings ist damit noch nichts gewonnen. Die Operation ist vergleichbar mit einer Drehung des Pfeils in der Blochkugel aus Abbildung 3–7 entlang deren Äquator. An der Wahrscheinlichkeit, diesen Wert zu messen, ändert das erst einmal nichts. Nennen wir die Messwahrscheinlichkeit wie weiter oben »Amplitude«.

Doch Grover fand eine Operation, die auf einem Quantenregister durchführbar ist und das Problem im Handumdrehen löst: nämlich die einzelnen Amplituden am Mittelwert aller Amplituden zu spiegeln. Auch dies ist graphisch dargestellt (Abb. 6–1 c). Die

Spiegelung führt dazu, dass die Amplitude des Eintrags 01 auf den Wert 1 erhöht und die Amplituden der anderen Einträge jeweils auf den Wert 0 reduziert werden. Wenn jetzt gemessen wird, lautet das Ergebnis mit Sicherheit »B«. Bingo!



**Abb. 7-1** Graphische Darstellung des Grover-Algorithmus

- a: Am Anfang haben alle Einträge die gleiche Amplitude.
- b: Drehen der Phase des gesuchten Eintrags
- c: Spiegeln der Amplituden am Mittelwert aller vier Amplituden

In nur *zwei* Schritten kommt der Quantencomputer zu einem Ergebnis – was bei vier Einträgen allerdings auch klassisch gelingt. Erst bei deutlich mehr Datenbankeinträgen zeigt der Grover-Algorithmus seinen Geschwindigkeitsvorteil. Allerdings reichen zwei Operationen dann nicht mehr. Denn nach dem Drehen des richtigen Eintrags weicht der Mittelwert umso weniger von den Amplituden der restlichen Einträge ab, je mehr Einträge es gibt. Das Spiegeln am Mittelwert reduziert deren Amplituden also kaum, sodass sehr wahrscheinlich ein falscher Eintrag gemessen wird.

Wird die Prozedur aus Drehen und Spiegeln aber mehrmals wiederholt, schrumpfen die Amplituden der falschen Einträge bei jedem Schritt und die des richtigen wächst entsprechend, bis es praktisch sicher ist, das richtige Ergebnis zu messen. Eine einfache

Rechnung zeigt, dass die Anzahl der nötigen Wiederholungen der Wurzel aus der Anzahl der Einträge entspricht.

Auch der Quantencomputer kommt also nicht in einem Schritt zum Ergebnis. Man muss die Wahrscheinlichkeitswellen in seinem Innern so geschickt überlagern, dass die der falschen Ergebnisse ausgelöscht werden und die der richtigen verstärkt. Dafür muss eine gewisse Anzahl von Operationen ausgeführt werden.

## Harmonien im Universum der Zahlen

Als zweites Beispiel betrachten wir Shors Algorithmus, bei dem die besondere Rolle der Verschränkung auf faszinierende Weise zutage tritt. Der Job lautet: Finde die Primfaktoren einer großen Zahl, also jene Teiler dieser Zahl, die sich nicht weiter zerlegen lassen. Bei der Primzahl 15 sind das die Teiler 5 und 3 und bei der Primzahl 21 lauten sie 7 und 3.

In Presseartikeln steht oft, Shors Verfahren probiere alle möglichen Teiler parallel aus. Das ist das Missverständnis, das Scott Aaronson anprangert. Der Quantencomputer kann das genauso wenig, wie ein Dirigent es schaffen würde, die kreischenden Möwen an einer Steilküste dazu zu bringen, Beethovens Neunte zu trällern. Vielmehr hat das Faktorisierungsproblem eine schwache Flanke, die ein Quantencomputer ausnutzen kann.

Die folgende Erklärung soll nur plausibel machen, wo diese Achillesferse liegt und wie ein Quantenrechner hineinstößt. Eine detaillierte mathematische Beschreibung findet sich zum Beispiel im ausgezeichneten Buch »Quantencomputing verstehen« von Matthias Homeister. Ich gebe zwei Erklärungen: eine, die nahe am mathematischen Algorithmus ist mit ein paar Formeln, und eine bildliche, die sich im Kasten »Der Wanderer und Quanten-Reinhold« findet. Wer mit Zahlen und Formeln nicht so gut kann, darf abkürzen, die zwei folgenden Absätze lesen und dann direkt zum Kasten springen.

Ein Kunstgriff, den Mathematiker gerne machen, um widerborstige Probleme zu lösen, besteht darin, die Aufgabe auf eine

andere zu »reduzieren«, die leichter zu knacken ist. Dazu braucht es aber irgendeine Art von mathematischer Struktur hinter dem Problem. Um es kurz zu machen: Eine solche gibt es bei der uns interessierenden Frage. Die Faktorisierung lässt sich auf das *Finden von Perioden* zurückführen. Was ist damit gemeint? Stellen Sie sich Außerirdische vor, die auf der Erde landen und Beobachtungen machen. Ziemlich schnell würden sie bemerken, dass es einen Tag-Nacht-Rhythmus von 24 Stunden gibt. Etwas länger würden sie benötigen, um die Periodizität der Mondphasen zu finden und noch länger, um die der Jahreszeiten festzustellen. Sie hätten durch Beobachtung mehrere Perioden gefunden.

Welche Art von Perioden sucht man nun beim Faktorisieren? Es geht um regelmäßige Wiederholungen innerhalb von Zahlenfolgen. Dazu sehen wir uns eine spezielle Zahlenfolge an, nämlich die der Potenzen von zwei, also  $2^1, 2^2, 2^3 \dots$ . Hier ist jede Zahl das Doppelte der vorangegangenen.

2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, ...

Nun teilen wir jede dieser Zahlen durch 15 und sehen uns jeweils den Rest dieser Division an. In der Mathematik bezeichnet man diese Operation als »Modulo«, geschrieben als

$2^x \bmod 15$ .

Die Divisionsreste ergeben ebenfalls eine Folge:

2, 4, 8, 1, 2, 4, 8, 1, 2, 4, ...

Wir sehen: Nach vier Zahlen wiederholt sich das Ganze. Die Folge ist periodisch. Machen wir das gleiche mit 21 als Teiler, ergibt sich eine Periode von sechs Zahlen:

2, 4, 8, 16, 11, 1, 2, 4, 8, 16, ...

Was hat das jetzt mit der Primfaktorenzerlegung zu tun? Die Antwort gab das Mathematik-Genie Leonhard Euler schon im 18. Jahrhundert. Angenommen, die Zahl  $N$  hat die Primfaktoren  $p$  und  $q$ . Dann sehen wir uns diese Zahlenfolge an:

$x \bmod N, x^2 \bmod N, x^3 \bmod N, x^4 \bmod N, \dots$

Auch diese Folge wird eine Periodizität haben. Der Clou: die Periode ist ein Teiler von  $(p-1)(q-1)$ . Kurz gesagt: *Sie hängt mit den gesuchten Primfaktoren zusammen*. Nun kann man die Perioden für mehrere dieser Folgen ausrechnen (indem man  $x$  variiert) und

lernt so immer mehr über die Primfaktoren, bis man  $p$  und  $q$  selbst ermittelt hat.

Man kann das Faktorisierungsproblem also lösen, indem man Perioden bestimmt. Wenn  $N$  klein ist, geht das auch ohne Quantenrechner. Weil aber die Wiederholungen fast so lang werden können wie die Zahl selbst, bekommt man ein Problem, wenn  $N$  ein paar hundert Dezimalstellen hat wie bei RSA üblich. Einen normalen Computer überfordert das, denn er müsste mehr Divisionsreste ausrechnen, als es Partikel im All gibt. Er müsste quasi wie zuvor schon bei der Datenbanksuche eine Zahl nach der anderen abklappern, bis er feststellt, wo die Folge sich wiederholt. Um es in der obigen Metapher mit den Außerirdischen zu sagen: Mit einem normalen Rechner kann man den Tag-Nacht-Rhythmus erkennen, vielleicht gerade noch die Mondphasen, aber auf keinen Fall den Wechsel der Jahreszeiten.

Hätten wir aber einen Quantencomputer: Ha! Dann sähe die Welt völlig anders aus. Angenommen, wir wollen eine Bank knacken oder digitale Signaturen fälschen. Dazu müssen wir eine 600-stellige Zahl faktorisieren, nennen wir sie  $N$ .

Alles, was wir brauchen, sind zwei Quantenregister, von denen jedes  $N$  Werte speichert. Dafür braucht man insgesamt etwa 1000 Qubits. Die Sache bleibt also übersichtlich. Das eine Quantenregister speichert einfach die laufenden Nummern von 1 bis  $N$ . Aus diesen Werten lassen sich nach dem oben skizzierten Rezept eine Zahlenfolge und daraus die Folge der Divisionsreste berechnen. Der Quantencomputer macht das parallel mit allen Werten und schreibt die Ergebnisse in das zweite Register.

Und jetzt kommt der Witz. Die Ergebnisse der Berechnung sind mit ihren Ausgangswerten im ersten Quantenregister verschränkt. Sie merken sich sozusagen ihre Herkunft, ihre Eltern, wenn man so will. Nun braucht man nur noch ein paar Schritte zur Lösung.

Zunächst misst man das zweite Quantenregister. Dabei kommt *irgendeiner* der Reste heraus, was natürlich überhaupt nichts aussagt. *Aber*: Wegen der Verschränkung geschieht gleich-

zeitig auch etwas mit dem ersten Register. Angenommen, der gemessene Wert ist  $X$ . Wegen der Wiederholungen tritt  $X$  mehrmals im zweiten Register auf. Also hat  $X$  mehrere Eltern. Die Messung löscht nun die Amplituden aller Werte im ersten Register bis auf die der Eltern von  $X$ .

Die gesuchte Periode ist nun also im ersten Register enthalten, nämlich als Differenz zwischen je zwei benachbarten Werten. Diese Differenz lässt sich durch weitere Manipulationen und eine Messung am ersten Register gewinnen.

Der Shor-Algorithmus arbeitet sehr effizient. Im »Handumdrehen«, wie es oft heißt, wird aber auch ein Quantencomputer nicht die Primfaktoren einer großen Zahl finden. Die Frage ist letztlich: Wie stark wächst die Zeit, die er dafür braucht, mit der Größe der Zahl, die es zu zerlegen gilt? Die Sicherheit von RSA basiert darauf, dass man dem Fortschritt der Computertechnik leicht vorauslaufen kann, indem man diese Zahl vergrößert. Der Igel wird immer schon längst da gewesen sein, wo der Hase gerade ankommt. Beim Quantencomputer wächst die Rechenzeit aber *nicht* exponentiell. Das bedeutet, dass eine Vergrößerung der Zahl zwar auch für den Quantencomputer mehr Rechenzeit bedeuten würde. Aber sie würde sich nicht potenzieren. Es bliebe bei Minuten, vielleicht eine Stunde, eine Zeit jedenfalls, die der Angreifer abwarten könnte.

### **Der Wanderer und Quanten-Reinhold**

Ein fauler und sadistischer Landvermesser gibt einem Wanderer und einer Quanten-Version von Reinhold Messner folgende Aufgabe: Geht über diese Berglandschaft und sagt mir, wie weit die Gipfel auseinanderliegen. Außer einem Funkgerät, mit dem ihr mir das Ergebnis meldet, und einem Höhenmesser dürft ihr keine technischen Hilfsmittel verwenden!

→

Der Wanderer macht sich auf den Weg. Ihm ist klar, dass er keine andere Möglichkeit hat, als von Gipfel zu Gipfel zu wandern und die Schritte dazwischen zu zählen. Mit dem Höhenmesser stellt er fest, wann er jeweils den höchsten Punkt erreicht hat.

Nach gut einer Stunde kommt er am ersten Gipfel an. Er macht nur ein Wurstbrot lang Pause, stapft weiter und fängt mit dem Schrittezählen an. Bei Schritt Nummer 28644, nach weiteren drei Stunden, kommt er am zweiten Gipfel an. Zuvor hat er seine Schrittlänge gemessen, sie beträgt 50 Zentimeter. Völlig erledigt greift er zum Funkgerät und meldet dem Vermesser: »Die Gipfel liegen 28.644 Schritte auseinander, das sind 14 Kilometer und 322 Meter.«

Nun ist Quanten-Reinhold dran. Er greift den Höhenmesser und steht auf. »Willst du keinen Proviant mitnehmen, es ist ein langer Weg«, sagt der Aufgabensteller sarkastisch. »Ach was, brauch ich nicht!«, entgegnet Quanten-Reinhold. »Und das Funkgerät?« Quanten-Reinhold winkt mit einem spöttischen Lächeln im Gesicht ab.

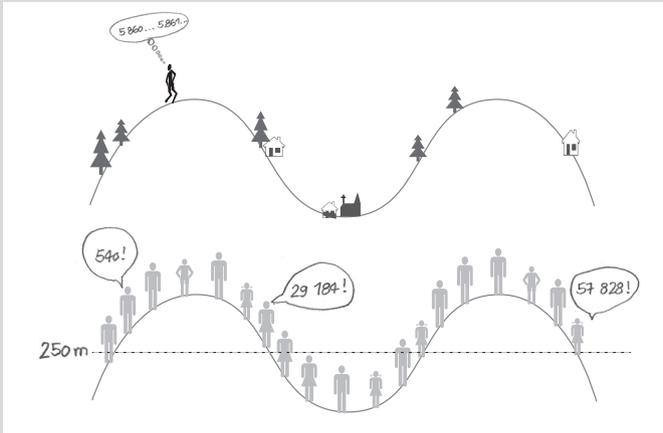
Er macht den ersten Schritt in Richtung des ersten Gipfels. Aber was passiert da bloß? Der Landvermesser reibt sich die Augen. Quanten-Reinhold hat den ersten Schritt noch nicht auf den Boden gesetzt, da erscheint eine kilometerlange Kolonne von identischen Kopien Quanten-Reinholds, die sich auf den ersten Gipfel zieht. In der Ferne erkennt der Aufgabensteller vage, dass sich die Kolonne weiter durch das nächste Tal und zum zweiten Gipfel erstreckt.

Fast im gleichen Moment drehen sich die Quanten-Reinholds um und melden unisono, mit vielfachem, etwas überheblichem Grinsen: »14 Kilometer und 322 Meter.«

»Wie hast du ... äh, ich meine, wie habt ihr das gemacht?«, fragt der Landvermesser. »Na, wie wohl«, antworten die Quanten-Reinholds. »Wir haben eine Höhenmessung vorgenommen. Dabei sind zufällig 250 Meter herausgekommen. Drei von uns stehen auf genau dieser Höhe. Weil wir miteinander verschränkt sind, kennen wir die Positionen der drei in unserer Kolonne. Sie sind jeweils 28.644 Schritte

→

bzw. 14 Kilometer und 322 Meter voneinander entfernt. Da die Landschaft regelmäßig geformt ist, entspricht dies dem Abstand der Gipfel.«



**Abb. 7-2** a: Der Wanderer zählt die Schritte, um zu erfahren, wie weit die Gipfel auseinanderliegen.  
 b: Quanten-Reinhold ist an allen Orten gleichzeitig, das heißt, jeder Quanten-Reinhold steht für einen Schritt auf dem langen Weg. Er besetzt sehr viele unterschiedliche Höhen. Bei einer Messung kommt zufällig eine Höhe von 250 Metern heraus. Weil die Versionen von Quanten-Reinhold miteinander verschränkt sind, wissen sie, welche von ihnen bei der Höhe von 250 Meter stehen, und damit, welcher Schrittzahl diese Höhe entspricht. Damit wiederum lässt sich der Abstand berechnen.

Der Shor-Algorithmus funktioniert nur deshalb, weil sich hinter dem Faktorisierungsproblem eine mathematische Struktur verbirgt, nämlich eine Periode. Die Stärke des Quantencomputers ist es, diese im Zahlensalat gut verborgene Periode herauszufiltern.

Bemerkenswert dabei ist, dass die Lösung nicht eine der gespeicherten Zahlen ist wie zuvor beim Grover-Algorithmus, sondern eine »globale Eigenschaft« dieser Zahlen, wie Scott Aaronson

## 10 Hilft die Quantenphysik beim Denken?

**Das Leben kontrolliert die Quantenphysik: Wie Pflanzen, Tiere und Menschen die bizarren Quantengesetze nutzen**

*» Wenn man bedenkt, dass jedes Atom des eigenen Körpers Millionen Jahre alt ist und bereits in Sternen, Steinen, Blumen, Moskitos und Dinosauriern gedient hat, ahnt man etwas von der Erfahrungsintelligenz der Biologie.«*

*Peter Horton, österreichischer Musiker und Buchautor*

Der Weg zum Labor von Tobias Fromme führt durch säuerlichen Trebergeruch vorbei an einer Versuchsbrauerei und Lebensmittel-labors. Die Umgebung passt so gar nicht zu der Frage, die sich der Tierphysiologe und einige andere Forscher stellen: Nutzt das Gehirn die Verschränkung von Quantenobjekten, immerhin einer der bizarrsten Effekte der Quantenphysik, für Denkprozesse?

Fromme empfängt mich zwischen Mikroskopen, Pipetten, Zentrifugen und anderen Apparaten eines molekularbiologischen Labors. Die Szene wirkt bescheiden gegen die Werkstätten von Quantenphysikern mit ihren Vakuumkammern, Kältemaschinen und Spiegeln, die Laserlicht perfekt reflektieren. Obwohl Frommes Team ähnlich schwer greifbaren Phänomenen nachspürt, braucht es kein Hightech an der Grenze des Machbaren. »Die Natur macht alles für uns«, sagt der Wissenschaftler. Vlatko Vedral von der Uni-

versity of Oxford pflichtet bei: »Die Evolution hat Quanteneffekte lange vor uns entdeckt«, sagt der Physiker.

## **Offene Rätsel der Biologie, neu betrachtet**

Die Überzeugung der Forscher fällt nicht vom Himmel. Einer der Väter der Quantenphysik, der Österreicher Erwin Schrödinger, schrieb schon 1944 in seinem Buch »Was ist Leben?«, die Theorie könnte erklären, wie auf der frühen Erde Ordnung aus dem Chaos entstand und damit das Leben. Zwar beschreibt die Quantenphysik die tote Welt der kleinsten Teilchen wie Elektronen, Atome oder Moleküle. Makroskopische Objekte aber, und dazu gehören Lebewesen, gehorchen weiter den älteren Gesetzen der klassischen Physik. Denn sie stehen in ständigem Kontakt und Austausch mit ihrer Umgebung, wodurch die Phänomene der Quantenphysik verwaschen. Wir haben diesen Effekt als »Dekohärenz« kennengelernt. Weil aber die kleinsten Werkzeuge des Lebens wie Enzyme, Gene oder Zellwände aus relativ wenigen Molekülen bestehen, könnte die Quantenphysik quasi von der Basis aus in Lebensfunktionen eingreifen.

Diesem Gedanken folgen Forscher, um einige hartnäckige Rätsel der Biologie quantenphysikalisch zu erklären. Diese entziehen sich bislang einer Erklärung. Könnte also die Quantenphysik den Aha-Effekt bringen? Ihr Feld nennen die Forscher »Quantenbiologie«. An die Frage nach dem Ursprung der Ordnung denken sie dabei zwar nicht. Aber die Wunder der Evolution, denen sie sich widmen, sind kaum kleiner: der Orientierungssinn der Vögel, die hoch effiziente Lichternte von Pflanzen und Bakterien oder die überraschend feinsinnig menschliche Nase (siehe Kasten). Sogar Denken und Bewusstsein wollen einige Forscher auf Quanteneffekte zurückführen.

## Quantenphysik der Nase

Der Geruchssinn des Menschen unterscheidet rund 10.000 Düfte. Rätselhaft ist, wie er das mit nur etwa 400 Rezeptoren schafft. Damit ein Rezeptor anspricht, muss das andockende Molekül genau in dessen speziell geformte Tasche passen. Um verschiedene in die Tasche passende Duftstoffe zu unterscheiden, »fühle« der Rezeptor zusätzlich zu deren Form die charakteristischen Vibrationen unterschiedlicher Moleküle, schlagen Forscher als Lösung vor.

Beim Spüren der Schwingungen helfe die Quantenphysik, so die Annahme. Das andockende Molekül verbindet demnach zwei gegenüberliegende Kontakte in der Tasche des Rezeptors. Ein Elektron wartet auf der einen Seite schon darauf hinüberzukommen, um das Signal »Duft!« auszulösen. Zwar ist das Molekül elektrisch isolierend. Aber kein Problem: Der quantenmechanische »Tunneleffekt« erlaubt mit gewisser Chance dennoch den Transfer. Allerdings auch nur, wenn das Elektron beim »Tunneln« ein exaktes Quantum Energie abgibt. Das kann es nur, indem es eine charakteristische Schwingung des Moleküls anregt. Also spricht der Rezeptor nur auf bestimmte Vibrationsfrequenzen an.

Die Parfumindustrie möchte gerne wissen, welche das sind. Denn dann könnte sie Düfte am Computer designen.

Lange fehlte den quantenbiologischen Ideen ein Nachweis aus dem Labor. Bis zum Jahr 2007, als Physiker um Graham Fleming von der University of California in Berkeley die Photosynthese von Grünen Schwefelbakterien untersuchten. Diese sammeln Sonnenlicht mittels Eiweißmolekülen ein, die winzigen schüsselförmigen Antennen ähneln. Die eingefangene Energie speichern sie in einer Art Teilchen, die Physiker »Exzitonen« nennen. Diese sind frei beweglich und transportieren die eingefangene Sonnenenergie zu einem anderen Molekül: das so genannte Reaktionszentrum. Dort geben die Exzitonen ihre Energie ab. Sie fließt in die Produktion von energiereichen chemischen Verbindungen ein, sozusagen der »Sprit« für das Bakterium.

Das Erstaunliche an dem Transfer ist seine Effizienz: Fast keine Energie geht als nutzlose Wärme verloren, wie es die klassische Physik erwarten ließe. Entwickler von Solarzellen können von einem solchen Wirkungsgrad nur träumen. Die Fast-100-Prozent-Effizienz ist eine Folge der extremen Schnelligkeit des Energietransports: Nur Billionstel Sekunden dauert die Reise der Exzitonen. Weil die Energie praktisch augenblicklich zum Reaktionszentrum gelangt, hat sie kaum Zeit, sich in nutzlose Wärme umzuwandeln.

Die klassische Physik scheitert bislang daran, diese Effizienz zu erklären. Warum? Der Energietransport verläuft über ein drittes Molekül, das als Brücke zwischen Antenne und Reaktionszentrum dient. Es nennt sich »FMO-Komplex« und besteht aus einem Netz von Chlorophyll-Molekülen. Nach klassischer Vorstellung suchen sich die Exzitonen den Weg durch die Antenne zum Reaktionszentrum, indem sie planlos von Chlorophyll zu Chlorophyll hüpfen. Wie ein schwer Betrunkener, der nach Hause torkelt: Für jeden Schritt in die richtige Richtung macht er mehrere zufällige Schritte irgendwo anders hin. Effizient ist das wahrlich nicht.

Wenn die klassische Physik keine Erklärung liefert, dann vielleicht die Quantenmechanik? Das wollte Graham Flemings Team genau wissen. Die Forscher richteten Laserpulse auf den FMO-Komplex und beobachtete etwas Ungewöhnliches: Das Protein antwortete wie ein Stroboskop. Es gab selbst regelmäßige Lichtpulse ab. Die Fachgemeinde geriet in Aufregung. Denn das An- und Abschwellen des Lichts resultiert aus einer Interferenz, wie sie typisch für Quantenphänomene ist.

Eine Hypothese lag nahe: Die Exzitonen reisen in Form von Materiewellen durch das Molekül. Mehrere Wellen bilden eine Superposition und gehen somit viele Wege gleichzeitig durch das Molekül. In einem einzigen Augenblick verwerfen sie alle Irrwege und wählen den richtigen, sprich den direkten Weg ins Reaktionszentrum. Jedes Elektron vervielfältigt sich gleichsam, um wie Ameisen auszuschwärmen nach dem Motto: Eines wird das Ziel schon finden.

Die New York Times schrieb, die Grünen Schwefelbakterien arbeiteten wie ein Quantencomputer. Denn dieser nutzt Superposition ebenfalls, um verschiedene Lösungsmöglichkeiten simultan zu testen, die Nieten zu verwerfen, sodass der Gewinn übrig bleibt.

Das mit dem Quantencomputer bleibt bis heute Spekulation. Modellrechnungen des Physikers Seth Lloyd, den wir schon kennengelernt haben, legen aber nahe, dass das Elektron einen so genannten Quantum-Walk durchführt. Das wäre in der Tat eine Art Quantencomputer-Programm, das im FMO-Komplex abläuft.

Der Quantum-Walk ist die Quanten-Version des »Random Walk« oder auf Deutsch der »Zufallsbewegung«. Angenommen, jemand steht auf einer Linie. Er wirft eine Münze. Bei Kopf geht er einen Schritt vorwärts, bei Zahl einen Schritt rückwärts. Auch wenn er das Spiel 100 Mal wiederholt, wird er insgesamt etwa genauso oft Kopf wie Zahl geworfen haben. Wenn er, sagen wir, fünf Mal öfter Kopf geworfen hat, dann ist er gerade mal fünf Schritte vorwärtsgekommen.

## Eine Irrfahrt, die schnell zum Ziel führt

Wäre der Münzwerfer ein Quantenobjekt, würde er deutlich weiter kommen. Am wahrscheinlichsten landet er nach hundert Schritten rund 70 Schritte vom Ausgangspunkt entfernt. Mit anderen Worten: Er legt trotz des zufälligen Münzwurfs substanziiell Weg zurück. Eine ziemlich effiziente Irrfahrt.

Dies erklärt sich mithilfe der Quanteninterferenz. Im klassischen Fall befindet sich der Läufer nach jedem Schritt auf *einem* Platz, von dem aus er nach vorne *oder* nach hinten weitergehen kann. Der Quantenläufer hingegen kann simultan in *beide* Richtungen wandern. Nach dem ersten Schritt ist er gleichzeitig vor und hinter dem Ausgangspunkt. Nach zwei Schritten ist er wieder am Ausgangspunkt und gleichzeitig zwei Schritte davor und dahinter. So geht das immer weiter. Auf seinem Weg nimmt er alle Positionen zwischen je hundert Schritten vor und hinter dem Ausgangspunkt ein. Dabei überlagern sich die Wahrscheinlichkeits-

wellen all dieser Möglichkeiten. Der Läufer begegnet sich gleichsam an allen Punkten mehrfach selbst.

Die Wahrscheinlichkeitswellen können sich gegenseitig verstärken, aber auch abschwächen. In der Nähe des Ausgangspunkts schwächen sie sich ab. Die Schritte, die zu Plätzen wie 30 oder 20 geführt hätten, neutralisieren sich sozusagen, als hätten sie nie stattgefunden. Weiter außen hingegen verstärken sie sich, sodass die Wahrscheinlichkeit, den Quantenläufer dort bei einer Bestimmung seines Aufenthaltsorts anzutreffen, recht groß ist.

Angenommen, dieser Quanteneffekt läuft im FMO-Komplex ab. Dann wäre ein erstes Beispiel der »Quantenbiologie« bestätigt. Doch es blieben Zweifel. Fleming hatte bei  $-200\text{ °C}$  gemessen. Bei Raumtemperatur würde das Protein stärker schwingen und auf die reisenden Energiepakete einwirken, monierten Kritiker. Dekohärenz wäre die Folge. Das Stroboskop geriete aus dem Takt. Doch inzwischen beobachteten Forscher den Quanteneffekt bei Algen und Grünen Schwefelbakterien auch bei Raumtemperatur.<sup>77</sup>

Jüngst aber geriet die Idee erneut unter Druck. Forscher um Donatas Zigmantas von der Universität Lund fragten sich, ob die Interferenzen von Vibrationen des FMO-Komplexes herrühren statt von den Exzitonen. Sie maßen und rechneten selbst und folgerten, dass eine Mischung aus beiden Phänomenen vorliege. Die Exzitonen gerieten demnach schnell aus dem Takt, sprich: Sie unterlagen der Dekohärenz.

Martin Plenio von der Universität Ulm hingegen hält die Vibrationen des FMO-Komplexes für einen integralen Bestandteil des Quantenphänomens. Sie schützten vor Dekohärenz, meint er: »Die Vibrationen fangen Energie von den Exzitonen auf und geben sie dann an diese zurück.« Ähnlich einem Vater, der die Schaukel mit seiner Tochter immer im richtigen Moment anstupst. Der Gedanke fasziniert: Denn der Natur wäre der Schutz vor Dekohärenz gelungen, ohne Teilchen per Hochvakuum und tiefen Temperaturen strikt vor jedem Umwelteinfluss zu isolieren, wie Quantenphysiker das versuchen.

Doch auch Plenios Modell ist umstritten. Kritiker halten die Vibrationen für zu schwach dafür. »Eine Entscheidung ist schwierig«, räumt Plenio ein. Biologische Proben seien eben sehr komplex: Schon kleine Abweichungen bei der Präparation könnten die Ergebnisse verändern. »Um Widersprüche aufzulösen, müssen wir uns zusammensetzen und standardisierte Experimente entwickeln«, sagt Plenio. Ungeachtet, ob die Natur den Quanteneffekt nutzt, forscht sein Team daran, wie er sich in künstlichen Materialien umsetzen lässt. »Das könnte zu hocheffizienten Solarzellen führen«, meint der Physiker.

## Der geisterhafte Kompass der Vögel

Unterdessen wollen deutsche und britische Forscher eine andere These untermauern: Dass Vögel eine Art »Quantenkompass« in sich tragen. Nur ein solcher erkläre die Beobachtungen an Rotkehlchen, meint Peter Hore von der University of Oxford. Die Vögel nehmen die Neigung des Erdmagnetfelds relativ zur Horizontalen wahr, die so genannte Inklinationswinkel. Dieser Kompass funktioniert nachts und reagiert sensibel auf schwingende Magnetfelder, wie technische Geräte sie emittieren.

Den Quantenkompass stellen sich Hore und andere Forscher wie folgt vor. Ein Protein in der Netzhaut der Tiere, das so genannte Cryptochrom, schluckt das bläuliche Licht der Nacht. Die absorbierte Energie stößt ein Elektron von seinem angestammten Platz im Protein zu einem anderen. Das negativ geladene Elementarteilchen hinterlässt dabei eine positive Ladung. Beide Ladungen kreiseln und besitzen somit einen Spin. Dieser reagiert auf Magnetfelder wie eine winzige Kompassnadel. Das allein reicht jedoch nicht, weil kein für den Vogel wahrnehmbares Signal entsteht. Das quantenbiologische Modell schlägt vor, dass den Spins dies im Teamwork gelingt. Als Paar können sie sich parallel zueinander ausrichten oder entgegengesetzt. Die Quantenphysik beschreibt die beiden Möglichkeiten jeweils als einen Anteil der Wellenfunktion.

Wie Wasser in einem Becken schwappen die Teilwellen hin und her. Mal sind die Spins »mehr parallel«, mal »mehr entgegengesetzt«. Der Clou: Die Inklination des Erdmagnetfelds bestimmt, wie schnell die Spins oszillieren. Das Tempo der Schwingung wiederum wirkt sich auf zwei chemische Reaktionen aus: Deren Produkte entstehen, je nach Inklination, in unterschiedlichem Verhältnis. Dieses chemische Signal nimmt der Vogel wahr.

Auch hier schütze das Protein vor der Dekohärenz, vermutet Peter Hore. Um ein chemisches Signal zu produzieren, muss die Interferenz mehrere millionstel Sekunden andauern. Dekohärenz passiert normalerweise viel schneller. Im Reagenzglas wurde der Quanten-Mechanismus bestätigt. Im lebenden Tier gelang dies noch nicht, weshalb das Modell umstritten bleibt. Dies will ein Projekt namens Quantum-Bird nun ändern, das Peter Hore und der Oldenburger Forscher Henrik Mouritsen leiten. Sie haben Ideen für Experimente, wollen sich aber nicht in die Karten blicken lassen. Nur so viel: »Es ist sehr schwierig, diese Quanteneffekte im lebenden Tier nachzuweisen«, sagt Hore.

## **Eine steile These erhält Nahrung**

Und doch wirkt das Vorhaben wie ein Kinderspiel gegenüber einer anderen Absicht: die Quantenphysik im Gehirn am Werk zu ertappen. Die Idee klingt erst einmal nach Esoterik, die die Quantenphysik gerne als Zeugin für Unerklärliches heranzieht und wolkige Begriffe wie »Quantenheilung« produziert (von denen sich der Autor distanziert). Doch es war einer der renommiertesten Physiker der Welt, der britische Nobelpreisträger Roger Penrose, der in den 1990ern erstmals eine Theorie vortrug, wie die Quantenphysik Bewusstsein und freien Willen verursachen soll. Das Gehirn unterscheide sich vom Computer, weil es keinem Algorithmus folge, schrieb Penrose. Stattdessen nutze es ein »nicht berechenbares« Element. Dies wollte der Physiker im quantenphysikalischen Messprozess erkannt haben, wie er etwa bei der Ermittlung des Orts eines Teilchens anfällt. Wie wir wissen, entscheidet sich die Wellen-