

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 °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.⁷⁷

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 Inklinatation. 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 stupst 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-