

Was geschah mit Schrödingers Katze?

Quantenphysik und das Wesen der Wirklichkeit

Wir schreiben das Jahr 1925, die Glanzzeit von Buster Keaton und Charlie Chaplin. Die Welt wartet mit Spannung auf den für die folgende Woche angekündigten Kinostart von *Goldrausch*, der schon im Vorwege als Chaplins bis dato bester Film gelobt wurde. Und der arme Physikstudent Wolfgang Pauli sitzt in Hamburg und ist deprimiert. „Die Physik ist momentan wieder einmal sehr verfahren“, schreibt er einem Kollegen. „Für mich ist sie jedenfalls viel zu schwierig, und ich wollte, ich wäre Filmkomiker oder so etwas und hätte nie etwas von Physik gehört.“

Pauli hatte ganz recht: Die Physik war zu jener Zeit tatsächlich eine verfahrenere Kiste. Niemand verstand, was die soeben formulierte Quantentheorie bedeutete. Einige Experimente ließen sich nur interpretieren, wenn man annahm, dass Energie in unteilbare Pakete, „Quanten“, zerlegt werden kann, aber niemand konnte sagen, warum das so ist. Nur wenige Monate später aber brachte der österreichische Physiker Erwin Schrödinger Licht ins Dunkel. Der entscheidende Geistesblitz kam ihm bei einer Klettertour in der Schweizer Alpen mit einer Frau, die nicht seine Frau war; die Quintessenz des Ganzen war das Schicksal einer imaginären Katze, die alsbald zum berühmtesten Tier der Wissenschaft wurde. Die Geschichte von Schrödingers Katze trieft förmlich von der Verrücktheit der Quantentheorie; seine angemessen geheimnisvolle Aura bewahrte das Gedankenexperiment bis in unsere Tage.

Schrödingers Überlegungen bauten auf der Arbeit des französischen Physikers Louis de Broglie auf. De Broglie hatte 1923 die Relativitätstheorie – die gemeinhin als Physik der besonders großen Entfernungen und besonders hohen Geschwindigkeiten gilt – mit den ersten Keimen der Quantenmechanik, der Physik des Winzigen, vereinigt. Heraus kam eine

einfache Gleichung: Jedes bewegte Teilchen, stellte de Broglie fest, ist ebenso gut als Welle zu beschreiben; umgekehrt kann jede Welle als bewegtes Teilchen beschrieben werden. Als Einstein diese Idee zu Gesicht bekam, bezeichnete er sie als „recht interessant“; zwei Jahre später aber zeigte Schrödinger, dass sie viel, viel mehr war als das.

Die mathematische Fortsetzung von de Broglies Formel erarbeitete Schrödinger während des Weihnachtsurlaubs 1925, den er mit seiner Geliebten in einem Schweizer Chalet verbrachte. Seine Frau hatte er in Zürich gelassen. Solche „Arrangements“ waren in seinem Leben nichts Außergewöhnliches, und er scheint sich mit seiner Frau durchaus darüber geeinigt zu haben. Was auch immer sonst noch passierte, die Reise muss wissenschaftlich inspirierend gewesen sein: Aus den Bergen zurückgekehrt, hatte Schrödinger eine Formel im Gepäck, die heute Schrödinger-Gleichung heißt und beschreibt, wie sich ein Teilchen verhält, wenn man es als Welle behandelt.

Mithilfe der Schrödinger-Gleichung lässt sich verstehen, woher die Quantenzustände kommen. Denken Sie etwas an das Bohr'sche Atommodell mit einem Kern, um den Elektronen kreisen, die nur bestimmte Energiezustände einnehmen können. Die Schrödinger-Gleichung erklärt, was es mit diesen „gequantelten“ Energien auf sich hat: Das Elektron (ein Teilchen) kann den Kern nur auf solchen Bahnen umkreisen, deren Umfang einem ganzzahligen Vielfachen seiner Wellenlänge entspricht. Anders ausgedrückt: Es sind nur „stehende“ Elektronenwellen erlaubt. (Stehende Wellen können Sie leicht mit einem Springseil erzeugen.)

Diese Erkenntnis glich einer Offenbarung für die Physiker, denen es zuvor nicht gelungen war, die Quantelung der Energien zu rechtfertigen. Die Schrödinger-Gleichung kann aber noch mehr: Sie lässt uns auch berechnen, wie sich die Energie eines Teilchens (sagen wir wieder, eines Elektrons) in einer bestimmten Situation zeitlich entwickelt. Ebenso gut gibt sie uns den Ort des Teilchens oder seinen Impuls an, oder sie sagt, zu welchem Quantenzustand die Wechselwirkung zweier Teilchen führen wird. Die Gleichung wurde als Geniestreich bejubelt. Sie hatte nur einen Haken.

Die Physiker konnten sich nicht einigen, was die Formel nun eigentlich aussagte. Waren Teilchen in Wirklichkeit Wellen? Schrödinger glaubte es, oder hoffte es wenigstens. Einstein schloss sich ihm an, andere hingegen sträubten sich. Der Göttinger Physiker Max Born zum Beispiel zeigte, dass die Lösungen der Schrödinger-Gleichung nichts weiter angaben als Wahrscheinlichkeiten – die Wahrscheinlichkeit etwa, ein Teilchen in einem be-

stimmten Gebiet des Raums zu finden, oder die Wahrscheinlichkeit, für ein Teilchen einen bestimmten Impuls zu messen.

Dieser Sicht folgend, war die Schrödinger-Gleichung zwar eine Orientierungshilfe in der Teilchenwelt – eine Anleitung dafür, Eigenschaften eines betrachteten Quantensystems zu ermitteln –, aber ganz und gar keine Erklärung für die tatsächliche Natur dieses Systems. Anders gesagt: Schrödingers Formel beschreibt nicht das Quantenobjekt, sondern gibt lediglich an, was wir über dieses Objekt herausfinden können. Ein philosophischer Albtraum! Einstein verabscheute ihn, Schrödinger nicht minder.

Positiv denken

Niels Bohr dagegen konnte sich sehr gut damit anfreunden. Bohr leitete ein Institut in Kopenhagen, das von der Carlsberg-Brauerei finanziert wurde. Er war „Positivist“: Seine Philosophie besagte, es sei sinnlos, „objektive“ Eigenschaften von irgendetwas zu diskutieren, weil man jegliche Eigenschaft nur durch (subjektive) Beobachtungen oder Messungen erfassen könne. Diese Messungen beschränken zwangsläufig die Auswahl an Fakten, von denen wir uns überzeugen können.

Intuitiv wusste Bohr, dass die Realität hinter Schrödingers Formel weder Teilchen noch Welle ist und sich deshalb nicht mit bekannten Begriffen erfassen lässt. Bohrs Standpunkt war: Nichts existiert, bevor wir es messen; nehmen wir die Messung aber vor, so hängt das, was wir sehen, vor unserer Methode ab. Benutzen wir zum Beispiel ein Gerät, mit dem man den Ort eines Objekts im Raum bestimmt, dann sehen wir etwas, was einen solchen definierten Ort im Raum haben kann – eben das, was wir ein Teilchen nennen.

Einstein lehnte diese „Kopenhagener Interpretation“ der Quantentheorie rundweg ab. Mit seiner bedeutendsten Arbeit, der Relativitätstheorie, wollte er die Physik ja gerade unabhängig vom Beobachter machen; der Kernpunkt der Relativität besteht schließlich darin, dass die Gesetze der Physik immer in gleicher Weise gelten, unabhängig davon, wer sich damit befasst. Dass die physikalische Natur des Universums davon abhängen sollte, wie wir sie betrachten, verletzte Einsteins Gefühle zutiefst.

Einsteins eigentliches Problem war folgendes: Beschreibt man Quantenobjekte mit Wellengleichungen, dann lässt man zu, dass verschiedene Objekte einander überlagern (ihre Wellen „interferieren“). Die Überlagerung zweier Wellen, ihre Summe an jedem beliebigen Punkt, nennt man

„Superposition“: Trifft Wellenberg auf Wellenberg, ist die Superposition höher als beide Berge für sich genommen, trifft Tal auf Tal, entsteht ein tieferes Tal. Berge und Täler hingegen löschen sich gegenseitig aus.

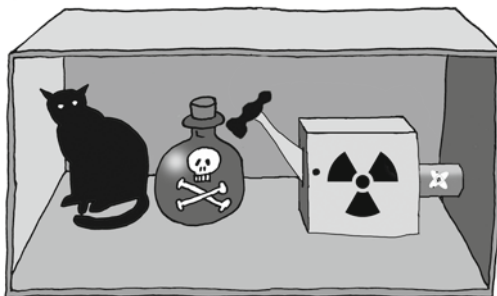
Was heißt das für unsere Quantenteilchen? Die Schrödinger-Gleichung besagt, dass unter geeigneten Umständen eine Superposition mehrerer Zustände stabil ist: Ein Elektron kann in einem Metallring gleichzeitig im Uhrzeigersinn und im Gegenuhrzeigersinn zirkulieren; das elektrische Feld eines Lichtquants (Photons) kann gleichzeitig in allen Richtungen orientiert sein; ein radioaktives Atom, das in einem Quantenprozess zerfällt, kann sich in einer Überlagerung der Zustände „zerfallen“ und „nicht zerfallen“ befinden. Das mag unsinnig klingen, aber genau das sagt die Theorie.

Aus diesem Grund waren Einstein und Schrödinger der Ansicht, der Theorie müsse etwas fehlen. In der Absicht, dies überdeutlich zu machen, dachte Schrödinger sich seine Katze aus. „Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren“, schrieb er 1935 in einer Fachzeitschrift. „Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt ...“ Diesen „burlesken“ Fall beschrieb Schrödinger dann im Detail und erschuf damit unabsichtlich einen Prüfstein für zukünftige Interpretationen der Quantentheorie.

Die Katze in der Kiste

Außer der Katze befindet sich in Schrödingers geschlossener Kammer eine winzige Menge radioaktiver Substanz und ein Geigerzähler. Mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit kann in jedem beliebigen Moment ein Atom der radioaktiven Probe zerfallen und ein Teilchen aussenden, das seinerseits einen elektrischen Strom im Geigerzähler fließen lässt. In Schrödingers Gedankenexperiment wird, wenn der Zähler anspricht, durch ein Relais ein Hämmerchen betätigt, das ein Kölbchen mit Blausäure zerschlägt. Die aufsteigenden Dämpfe töten die Katze.

Wie Schrödinger weiter ausführt, würde die Quantenbeschreibung des ganzen Systems (einschließlich aller Atome, aus denen die Katze besteht), „das so zum Ausdruck bringen, dass in ihr die lebende und die tote Katze (mit Verlaub) zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind.“ Diese Logik leuchtet ein. Durch den unbestimmten Zustand des radioaktiven Atoms in einer Superposition von „zerfallen“ und „nicht zerfallen“ gerät die Katze in eine Superposition von „tot“ und „lebendig“.



Schrödingers Katze – ein Gedankenexperiment

Der wahre Hammer kommt aber erst noch, nämlich dann, wenn man den Aspekt der Messung ins Spiel bringt. Bohr sagt, es gibt keine definitive Realität, solange nicht gemessen wird, weil die Wahl des Messinstruments bestimmt, welche Seite des Objekts – etwa Welle oder Teilchen – der Beobachter zu sehen bekommt.

Denkt man dies konsequent weiter, so besteht die „Messung“ im Fall des Katzenexperiments im Öffnen der Kiste. Indem man den Zustand der Katze beurteilte, würde man sie „zwingen“, sich für „lebendig“ oder „tot“ zu „entscheiden“.

Genau das fand Schrödinger so „burlesk“: Wie kann der Akt der Beobachtung das System (Katze) in dermaßen grundsätzlicher Weise beeinflussen? Bohr erliege hier derselben Täuschung, sagte Schrödinger, wie jemand, der ein verrissenes Foto einer Nebelbank zuschreibe: „Es ist ein Unterschied zwischen einer verwackelten oder unscharf eingestellten Fotografie und einer Aufnahme von Wolken und Nebelschwaden.“

Zu jener Zeit wurde die Interpretation der Quantentheorie bereits vehement öffentlich diskutiert. Berühmt wurde die Einstein-Bohr-Debatte während der 5. Solvay-Konferenz in Brüssel 1927, bei der Einstein seinen Kontrahenten mit einer Reihe von Gedankenexperimenten herausforderte, deren Muster war: Stellen Sie sich diese und jene Situation vor. Wie kann die Beobachtung oder die Wechselwirkung mit dem Messgerät dazu führen, dass sich die Superposition in den einen oder den anderen Zustand auflöst?

Wellen und Kugeln

Das Ergebnis dieser Auseinandersetzung war eine neue Version eines alten Versuchs, des berühmten „Doppelspalt“-Experiments von Thomas Young. 1801 hatte Young damit Newtons Ansicht, Licht sei ein Strom von Teilchen, widerlegt: Er ließ einen Lichtstrahl durch zwei Schlitze auf einen Schirm fallen und beobachtete dort ein Interferenzmuster, das nur durch

eine Superposition von Wellen zu erklären ist. Die Quantenversion stellt nun folgende Frage: Was geschieht, wenn man die Intensität des Lichts so weit herunterschraubt, dass die Quantentheorie angewendet werden muss? Stellen Sie sich vor, es fällt nur noch ein „Lichtkugélchen“ (Photon) nach dem anderen durch die Anordnung. Dann kann es doch keine Interferenz mehr geben, oder?

Doch, sagte Bohr – solange niemand hinschaut, um festzustellen, durch welchen der beiden Spalte das einzelne Photon fliegt. Für Bohr ist Licht weder Welle noch Teilchen; diese Bezeichnungen vergeben wir nur, nachdem wir bestimmte Eigenschaften gemessen haben. Schrödingers Wellengleichung zufolge fliegen die Photonen durch beide Spalte. Das einzelne Photon ist kein Teilchen, sondern wird „verschmiert“ wie eine Welle und hat im Moment des Durchgangs durch den Doppelspalt zwei voneinander unabhängige Existenzen. Solange niemand seinen Weg misst, nimmt das Photon alle möglichen Wege gleichzeitig.

Vielleicht halten Sie dies alles für Wortspielerei, abstrakte Gedankenexperimente, deren scheinbar absurde Züge sofort verschwinden würden, wenn man sie in der Realität ausführte. Dann haben Sie unrecht (Bohr würde sich freuen), wie die Forscher vor relativ kurzer Zeit zweifelsfrei belegen konnten. Erst in den 1970er Jahren gelang es, erstmals ein Doppelspaltexperiment so auszuführen, dass nur jeweils ein Teilchen zur Zeit die Anordnung durchlief – und es funktionierte: Obwohl sich die Elektronen zwischen zwei Spalten „entscheiden“ konnten, baute sich auf dem Schirm allmählich ein Interferenzmuster auf. Sobald aber ein Gerät eingebaut wurde, das messen sollte, welchen Spalt jedes einzelne Elektron nimmt, verschwand das Muster wie von Zauberhand. Anders ausgedrückt: Die Messung bewirkte, dass sich die Objekte als Teilchen äußerten, nicht als Welle. Auf den ersten Blick ist dies natürlich weit von Schrödingers Katze entfernt; eine Katze gehört zweifellos in eine andere Kategorie von Dingen als ein Elektron. Eine Reihe nachfolgender Experimente gelang jedoch mit immer größeren Quantenteilchen – nach Photonen und Elektronen kamen Atome und schließlich sogar C_{60} -Moleküle (Fullerene).

Stets trat die verrückte Interferenz auf, solange man nicht versuchte festzustellen, welchen Spalt die Teilchen nahmen. Im Moment ist geplant, den Versuch mit Viren auszuführen – Teilchen, die ungefähr eine Million Mal voluminöser sind als ein Fullerenmolekül; und abgesehen von den Schwierigkeiten, die beim Aufbau der Apparatur zu bewältigen sind, gibt es keinen Grund, dort aufzuhören. Warum sollte sich eine reale Katze

nicht benehmen wie ein Elektron, wenn geeignete Versuchsbedingungen geschaffen werden, etwa ein katzenklappengroßer Doppelspalt?

Ein Problem ist natürlich, dass man eine reale Katze gut sehen und daher ohne weiteres feststellen kann, durch welche Klappe sie gelaufen ist. Die Kiste in Schrödingers Gedankenexperiment hingegen musste geschlossen bleiben, damit niemand die Katze sah, also keine Messung vorgenommen wurde, und die Superposition unangetastet blieb. Das führt uns zu einer kniffligen Frage, der Bohr stets auswich: In welchem Moment wird gemessen? Um bei Schrödingers Katze zu bleiben: Ist es der Moment, in dem der Deckel geöffnet wird? Oder der, in dem die Photonen an der Katze reflektiert werden, die uns die Information über ihren Zustand übermitteln? Der, in dem die Photonen in unser Auge eintreten, oder der, in dem unser Bewusstsein den Zustand der Katze registriert? Bohrs Lösung des Rätsels: Der Physiker weiß einfach, wann er etwas gemessen hat. Moderne Fassungen des Katzenexperiments bringen jedoch mehr Licht ins Dunkel des Messprozesses und erklären auch, warum eine Katze nicht wirklich gleichzeitig tot und lebendig sein kann.

Nicht gucken!

Die Frage der Grenze zwischen der „klassischen“ Welt unserer Alltagserfahrung und der Quantenwelt der Atome und Teilchen reduziert sich auf die De-Broglie-Wellen, die die ganze Sache überhaupt erst ins Rollen gebracht haben. Die De-Broglie-Wellenlänge eines Objekts hängt von dessen Impuls ab und gibt die Größenordnung an, in der dieses Objekt Quanteneigenschaften zeigen würde.

Das Fullerenmolekül im Doppelspaltversuch hat eine De-Broglie-Wellenlänge von etwa 10^{-12} m (das ist ein milliardstel Millimeter). Der Abstand zwischen den beiden Spalten ist etwa eine halbe Million Mal breiter, ein Unterschied, der in diesem Zusammenhang nicht besonders groß ist. Das System eignet sich also dazu, Welleneigenschaften zu zeigen.

Bis jetzt steht noch nichts im Widerspruch zu Bohrs Behauptung, dass die Wahl der Messapparatur bestimmt, welche Eigenschaften ein System offenbart; aber nebenbei gewinnen wir zwei Erklärungen dafür, dass eine Katze (oder ein Mensch), im Gegensatz zu einem Fullerenmolekül, nicht an zwei Stellen gleichzeitig sein kann.

Der erste Grund ist ein praktischer. Eine Katze, die mit ein paar Kilometern pro Stunde an der Mauer entlangschleicht, hat eine Wellenlänge von

ungefähr 10^{-28} m. Wellenartiges Quantenverhalten zeigt eine solche Katze erst bei Wechselwirkung mit einem Messgerät dieser Größenordnung. Einen solchen Apparat hat noch niemand gebaut, folglich konnte die Katze sich noch nie als Quantensystem äußern. Sie erinnern sich: Das alltägliche Leben ist, Bohr zufolge, eine experimentelle Situation, in der sich stets die teilchenartige Natur der Gegenstände unserer Umwelt manifestiert.

Der zweite Grund für unser „klassisches“ Verhalten ist: Wir strahlen. Alles, was mehr als -273 °C (null Kelvin) warm ist, sendet Photonen aus, Energiepakete, die Wärme davontragen. Wie man aus Experimenten weiß, kann man mithilfe dieser Strahlung den Ort eines Teilchens ermitteln (also feststellen, durch welchen Spalt es geflogen ist). Anders ausgedrückt: Wann auch immer die Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts liegt, kann man Schrödingers Kiste nicht schließen. In der Realität ist dem Gedankenexperiment der Boden entzogen.

Bei entsprechenden Versuchen wurden Fullerenmoleküle verschiedener Temperatur auf einen Doppelspalt geschossen. Je heißer die Moleküle waren, umso stärker verschwamm das Interferenzmuster. Die heißen Moleküle emittieren Photonen, deren Energie von der Temperatur abhängt; höhere Temperaturen bedeuten höhere Energien, also, nach de Broglies Lesart, kürzere Wellenlängen. Je kürzer die Wellenlänge eines emittierten Photons aber ist, umso leichter fällt es, auf den Ort des zugehörigen Moleküls zu schließen. Kurz gesagt, ein heißer Körper gibt offenbar genauere Hinweise darauf, welchen Spalt er passiert.

Dasselbe geschieht, wenn Fullerenmoleküle auf ihrem Weg durch die Anordnung mit Molekülen der Luft zusammenstoßen. In der Regel werden solche Experimente im Hochvakuum ausgeführt; ist das Vakuum aber nicht so gut und lässt sich die Position der Fullerenmoleküle anhand ihrer Wechselwirkungen mit der Luft verfolgen, verschwindet das Interferenzmuster. Wieder scheint das Teilchen seine Fähigkeit zu verlieren, beide Spalte gleichzeitig zu durchfliegen, sobald man herausfinden kann, wo es sich befindet. In einem Teilvakuum verhält sich das Fullerenmolekül so, als hätte man den Deckel von Schrödingers Kiste halb offen gelassen; die Katze ist dann definitiv lebendig oder tot und kann nicht beides gleichzeitig sein.

Die Information muss also nicht das Bewusstsein des Beobachters erreicht haben, damit eine Messung stattfindet, sie muss nur irgendwie aus dem untersuchten System ausgetreten sein. Offenbar genügt der Fluss von Information über die Gesundheit der Katze, um diese in einen der infrage kommenden Zustände zu zwingen. Wenn es um Menschen und Katzen

*„Wer von der Quanten-
theorie nicht entsetzt ist,
hat sie nicht verstanden.“*

NIELS BOHR

geht, kommt der Informationsfluss zustande, weil die Organismen in vielfältiger Weise auf ihre Umwelt reagieren, Wärme abstrahlen und Luftmoleküle herumschubsen. Information über den Ort des Körpers ist verfügbar; deshalb kann der Körper sich nicht an zwei Stellen

gleichzeitig aufhalten. Dieses Heraussickern von Information nennen die Physiker „Dekohärenz“. Dekohärenz ist keine triviale Sache; sie könnte uns die wahre Natur des Universums verraten.

Rechnen mit Katzen

Hinter dem Quantencomputer steckt die Idee, Schrödingers Katze für Berechnungen in großem Stil einzuspannen. Gewöhnliche Computer stellen Information in „Bits“ dar, die den Zustand 0 oder 1 (geladener oder entladener Kondensator) annehmen können. Quantencomputer nutzen „Qubits“, die sich wie ein Atom in den Zuständen 0 (Normalzustand) und 1 (Zustand nach einer kleinen Energiezufuhr), aber auch in einer Superposition beider Zustände befinden können.

Mithilfe eines anderen Quantenphänomens, der „Verschränkung“, können die Forscher viele Qubits in Superpositionen verknüpfen. So entsteht ein „Quantenregister“ als Kette von Qubits, die alle möglichen Zustände gleichzeitig annimmt. Wendet man nun eine Elementaroperation wie „NICHT“ (die jede 0 zu 1 werden lässt und umgekehrt) auf das Quantenregister in Superposition an, so erfasst die Operation alle möglichen Zustände gleichzeitig. Quantencomputer lassen deshalb die Parallelisierung von Algorithmen in nie dagewesenem Ausmaß zu. Ein Quantenregister von nicht mehr als 250 Atomen, jedes davon in einem Superpositionszustand wie Schrödingers Katze, kann mehr Zahlen speichern, als es im Universum Atome gibt. Kein Wunder, dass die Regierungen das größte Interesse daran haben, die Entwickler der Quantencomputer von ihren nationalen Sicherheitscodes fernzuhalten.

Das Ganze hat nur einen Haken. Die Natur der Verschränkung und der Superposition macht die Qubits besonders anfällig für den Verlust von Information; wenn das passiert, bricht die gesamte Berechnung zusammen. Um eine neue Computerrevolution anzustoßen, müssten die Forscher die Dekohärenz besser verstehen und erklären können, warum wir niemals totlebendige Katzen zu Gesicht bekommen.

Information und Wirklichkeit

Die Physiker, die sich mit dem Mysterium von Schrödingers Katze befassen, fragen sich inzwischen, ob diese Geschichte nicht noch auf etwas anderes hinweist – darauf, dass Information die Basis der Wirklichkeit ist. Aus der Quantentheorie (im Gewand der unseligen Katze) scheint hervorzugehen, dass man das Universum als gigantische Informationsverarbeitungsmaschine beschreiben kann, woraus wir möglicherweise auch Nutzen ziehen können. Die Rolle der Information in der Quantentheorie führte zu einem der ambitioniertesten technologischen Projekte der Neuzeit, dem Quantencomputer (► *Kasten Rechnen mit Katzen*).

Mag sich dieser Quantenrechner aber als noch so leistungsfähig erweisen, eines kann er nicht: uns erklären, wie eine Katze tatsächlich gleichzeitig tot und lebendig sein kann. Der menschliche Geist weigert sich einfach, dies als Teil der physikalischen Realität zu akzeptieren. Wolfgang Pauli (der sich nicht geschlagen gab, sondern einer der genialsten Physiker in der Geschichte der Naturwissenschaften wurde) hatte recht: Es ist zu kompliziert, um es zu begreifen. Mit den Worten von Niels Bohr: „Wer von der Quantentheorie nicht entsetzt ist, hat sie nicht verstanden.“

Die großen Fragen - Physik

Brooks, M.

2011, V, 203 S., Hardcover

ISBN: 978-3-8274-2621-5