

Adam Becker

Was ist real?

Das ungelöste Problem
der Quantenphysik

SACHBUCH



Springer

Was ist real?

Adam Becker

Was ist real?

Das ungelöste Problem der Quanten-
physik

Aus dem Englischen übersetzt von Bernhard Gerl

 Springer

Adam Becker
Center for Science, Technology, Medicine
University of California
Berkeley, CA, USA

ISBN 978-3-662-62541-5 ISBN 978-3-662-62542-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-62542-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Übersetzt von Bernhard Gerl Übersetzung der amerikanischen Ausgabe: What is real? von Adam Becker, erschienen bei Basic Books 2018, © 2018 by Adam Becker. Alle Rechte vorbehalten

Amerikanische Originalausgabe erschienen bei Basic Books, Hachette Book Group, New York, 2018

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: © Petr Krejčík/Adobe Stock

Planung/Lektorat: Lisa Edelhäuser

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*Die nüchternste Tatsache steht und fällt mit der Art und Weise, in der sie
berichtet wird*

Ursula K. Le Guin

Für Elisabeth, die es schon immer wusste

Danksagung

Der Autor dankt der Alfred P. Sloan Foundation für ihre Unterstützung bei den Nachforschungen, die für das Schreiben dieses Buches notwendig waren.

Inhaltsverzeichnis

Eine Philosophie als Beruhigungsmittel

- | | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Das Maß aller Dinge | 3 |
| 2 | Der seltsame Kollaps von Kopenhagen | 13 |
| 3 | Straßenschlägerei | 37 |
| 4 | Kopenhagen in Manhattan | 59 |

Quanten-Dissidenten

- | | | |
|----------|---|------------|
| 5 | Physik im Exil | 89 |
| 6 | Es kam aus einer anderen Welt | 121 |
| 7 | Die tiefgründigste Entdeckung der Wissenschaft | 147 |
| 8 | Mehr Dinge zwischen Himmel und Erde | 173 |

Das große Vorhaben

- | | | |
|----------|-------------------------------|------------|
| 9 | Realität im Untergrund | 207 |
|----------|-------------------------------|------------|

XII	Inhaltsverzeichnis	
10	Quantenfrühling	237
11	Kopenhagen gegen das Universum	263
12	Unerhörtes Glück	289
	Anhang: Vier Betrachtungsweisen eines seltsamen Experiments	313
	Danksagung	319
	Abdruckgenehmigungen	323
	Literatur und Quellen	325
	Stichwortverzeichnis	339

Einleitung

Die Gegenstände in unserem Alltagsleben sind ärgerlicherweise nie in der Lage, an zwei Stellen gleichzeitig zu sein. Wenn wir unseren Schlüssel in der Jackentasche lassen, hängt er nicht auch am Haken neben der Eingangstür, wo wir ihn doch eigentlich erwarten. Das ist nicht überraschend – diese Sachen haben keine unerforschten Eigenschaften oder Kräfte. Sie sind ganz gewöhnlich. Und dennoch sind diese alltäglichen Dinge aus einer Galaxie aus Unvertrautem zusammengesetzt. Ihre Hausschlüssel sind eine vorübergehende Verbindung aus einer unglaublich hohen Zahl von Atomen. Jedes davon wurde vor Äonen geformt in einem sterbenden Stern und ist in deren frühesten Tagen auf die Erde gefallen. Die Atome haben im Licht der ungestümen jungen Sonne gebadet und sind Zeugen der ganzen Geschichte des Lebens auf unserem Planeten. Atome sind episch. Und wie die meisten Helden aus Epen haben auch Atome manche Probleme, die normale Menschen nicht kennen. Wir sind Gewohnheitstiere, die immer nur an einer Stelle gleichzeitig bleiben. Aber Atome neigen dazu, launisch zu sein. Wenn etwa ein einzelnes Atom, das sich auf den Weg durch das Labor macht, an eine Gabelung kommt, an der es nach links oder rechts abbiegen kann, dann wählt es nicht einfach einen der Wege aus, so wie Sie und ich das tun würden, sondern es durchleidet eine Krise der Unschlüssigkeit, wo es sein oder nicht sein soll. Deshalb entscheidet sich unser Nanometer-Hamlet für beide. Das Atom zerbricht nicht, es nimmt nicht erst den einen Weg und dann den anderen – es geht beide Wege gleichzeitig und macht den Gesetzen der Logik eine lange Nase. Die Regeln, die für Sie und mich und dänische Prinzen gelten, gelten für Atome nicht. Sie leben in einer

anderen Welt, die von einer andersartigen Physik beherrscht wird: der submikroskopischen Welt der Quanten.

Die Quantenmechanik – die Physik der Atome und anderer winziger Objekte wie Moleküle und subatomare Teilchen – ist die erfolgreichste wissenschaftliche Theorie. Sie sagt mit außerordentlicher Genauigkeit eine erstaunliche Vielfalt von Phänomenen voraus und ihre Auswirkungen gehen weit über die Welt des sehr Kleinen hinaus – bis in unser Alltagsleben. Die Entdeckung der Quantenmechanik Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts führte unmittelbar zu den Siliziumtransistoren in unseren Smartphones und den LEDs in deren Bildschirmen, zu den Radionuklidbatterien in weit entfernten Raumsonden und den Lasern in den Barcodescannern an der Supermarktkasse. Die Quantenphysik erklärt, warum die Sonne scheint und wie unsere Augen sehen. Sie erklärt die gesamte Chemie, das Periodensystem und alles andere. Sogar, warum Dinge fest sind, kann sie uns verraten, etwa der Stuhl, auf dem Sie sitzen, oder Ihre Knochen und Ihre Haut. All dies kann man nur damit erklären, dass sich sehr kleine Dinge sehr seltsam verhalten.

Aber etwas ist verstörend. Die Quantenphysik scheint auf Menschen oder irgendetwas, das so groß ist wie wir, nicht anwendbar zu sein. Unsere Welt ist eine Welt der Menschen und Schlüssel und anderer gewöhnlicher Dinge, die zu einer bestimmten Zeit nur einen Weg nehmen können. Dennoch bestehen diese banalen Dinge um uns herum aus Atomen – auch Sie und ich und dänische Prinzen. Und natürlich werden diese Atome von der Quantenmechanik beherrscht. Wie kann sich also die Physik der Atome so stark von der Physik der Welt, die aus Atomen aufgebaut ist, unterscheiden? Warum ist die Quantenmechanik nur die Physik des Ultrakleinen?

Das Problem ist nicht, dass die Quantenphysik verrückt ist, denn die Welt ist ein wilder und verschwommener Ort, an dem es viel Platz für Verrücktheiten gibt. Doch wir sehen einfach all die seltsamen Effekte der Quantenmechanik in unserem Alltagsleben nicht. Warum nicht? Vielleicht ist die Quantenphysik wirklich nur die Physik der winzigen Dinge und gilt nicht für große Objekte – vielleicht gibt es irgendwo eine Grenze, hinter der die Quantenmechanik nicht funktioniert. In diesem Fall stellt sich die Frage: Wo liegt diese Grenze und wie funktioniert sie? Und wenn es keine derartige Grenze gibt – wenn die Quantenphysik auf uns genauso anwendbar ist wie auf Atome und subatomare Teilchen – warum widerspricht die Quantenphysik dann so schamlos unseren Erfahrungen in der Welt? Warum sind unsere Schlüssel nie an zwei Orten gleichzeitig?

Vor 80 Jahren war Erwin Schrödinger, einer der Mitbegründer der Quantenphysik, über diese Probleme sehr beunruhigt. Um seinen Kollegen

seine Sorgen zu erklären, tüftelte er ein Gedankenexperiment aus, das heute unter dem Namen Schrödingers Katze berühmt ist (Abb. 1). Schrödinger stellte sich vor, dass man eine Katze in eine Kiste setzt, in der sich auch eine verschlossene Glasviole mit Zyanid befindet, über der ein Hammer hängt. Der Hammer wiederum ist mit einem Geigerzähler verbunden, der radioaktive Strahlung aufspüren kann und der auf ein winziges Stück leicht radioaktiven Materials ausgerichtet ist. Diese Rube-Goldberg-Maschine wird ausgelöst, sobald das Metall auch nur die geringste Strahlung aussendet; sobald dies passiert, registriert der Geigerzähler die Strahlung und löst den Hammer aus. Der wiederum zerstört die Viole und das freigesetzte Zyanid tötet die Katze (Schrödinger hatte nicht vor, das Experiment tatsächlich auszuführen, Tierschützer können ihre Plakate also wieder einpacken). Schrödinger schlug vor, die Katze eine Zeit lang in der Kiste zu lassen und diese dann zu öffnen, um ihr Schicksal zu klären.

Die Strahlung, die vom Metall abgegeben wird, besteht aus subatomaren Teilchen, die sich von den Metallatomen lösen und mit hohen Geschwindigkeiten davonfliegen. Wie alle genügend kleinen Dinge gehorchen diese Teilchen den Gesetzen der Quantenphysik. Statt aber Shakespeare zu lesen, hören die subatomaren Teilchen lieber Musik der Punkband The Clash: Should I Stay Or Should I Go? Sollen sie bleiben oder gehen? Also machen sie beides: Während der Zeit, in der die Kiste geschlossen ist, wird das Stück Metall radioaktive Strahlung abgeben und auch nicht abgeben. Dank dieser Punkrock-Teilchen wird auch der Geigerzähler Strahlung registrieren und auch nicht, d.h., der Hammer wird die Zyanid-Viole zertrümmern und auch nicht und deshalb wird auch die Katze sowohl tot als auch lebendig sein. Und genau auf dieses ernste Problem wollte Schrödinger hinweisen. Vielleicht kann ein Atom zwei Wege gleichzeitig gehen, aber die Katze kann bestimmt nicht gleichzeitig tot und lebendig sein. Sobald wir die Kiste öffnen, wird die Katze entweder tot sein oder nicht, und es ist vernünftig anzunehmen, dass sie das eine oder das andere auch schon sein musste, bevor wir die Kiste geöffnet haben.

Trotzdem machten viele von Schrödingers Zeitgenossen einfach weiter und verleugneten genau diesen Punkt. Einige behaupteten, dass die Katze in einem Zustand von „Sowohl-lebendig-als-auch-tot“ gewesen sei bis zu dem Augenblick, in dem die Kiste geöffnet wurde; erst dann sei die Katze irgendwie durch den Blick in die Kiste in das „Totsein“ oder das „Lebendigsein“ gezwungen worden. Andere stellten sich auf den Standpunkt, dass es keinen Sinn ergebe, darüber zu sprechen, was in der Kiste vor sich gegangen ist, bevor sie geöffnet wurde, weil das Innere per definitionem nicht beobachtbar ist und nur beobachtbare, messbare Dinge eine Bedeutung haben.

Für sie war es sinnlos, sich über etwas Gedanken zu machen, was nicht beobachtet werden kann; das ist wie die Frage danach zu stellen, ob ein umfallender Baum in einem Wald ein Geräusch macht, wenn niemand da ist, der es hören kann.

Schrödingers Bedenken über seine Katze wurden durch diese Argumente nicht gemildert. Er fand, dass seine Kollegen das Wesentliche nicht verstanden hätten: Der Quantenmechanik fehlt eine entscheidende Komponente, nämlich wie sie zu den Dingen passt, die in der Welt vor sich gehen. Wie entsteht aus einer gewaltigen Zahl von Atomen, die von der Quantenmechanik beherrscht werden, die Welt, die wir um uns herum sehen? Was ist auf einer grundlegenden Ebene real? Und wie funktioniert das? Aber Schrödingers Gegner gewannen die Oberhand. Seine Bedenken wurden nicht ernst genommen: Der Rest der Physiker machte einfach weiter.

Schrödinger gehörte zu einer Minderheit, doch er war nicht allein. Auch Albert Einstein wollte wissen, was auf der Quantenebene wirklich passiert. Er stritt mit Niels Bohr, dem großen dänischen Physiker, über die Natur der Quantenphysik und der Realität. Die Einstein-Bohr-Diskussionen gingen in die Geschichte der Physik ein. Die verbreitetste Ansicht ist, dass Bohr gewonnen hat, dass also gezeigt werden konnte, dass die Bedenken von Einstein und Schrödinger unbegründet waren, dass es in der Quantenphysik kein Problem mit der Realität gibt, vor allem weil es keinen Grund gibt, über die Realität nachzudenken.

Trotzdem verrät uns die Quantenmechanik etwas darüber, was in der Welt real ist. Warum sollte sie sonst überhaupt funktionieren? Es wäre sehr schwierig, ihren unglaublichen Erfolg zu erklären, wenn sie keine Verbindung zu irgendetwas Realem in der Welt hätte. Selbst wenn die Theorie nur ein einfaches Modell wäre, dann modelliert sie jedenfalls ziemlich gut. Es muss etwas geben, das sicherstellt, dass die Vorhersagen mit phänomenal hoher Genauigkeit eintreffen. Doch es ist schwierig herauszufinden, was die Quantenmechanik über die Welt aussagt. Dies liegt zum Teil an der bloßen Verrücktheit der Theorie. Nichts, was in der Quantenwelt geschieht, ist uns vertraut. Die scheinbar widersprüchliche Natur von Quantenobjekten – Atome sind hier und da zur gleichen Zeit, Strahlung wurde emittiert und blieb doch gleichzeitig in ihrer Quelle – ist nicht der einzige fremdartige Aspekt der Theorie. Es gibt auch noch Verbindungen zwischen weit voneinander entfernten Objekten, die ohne Zeitverzögerung erfolgen. Diese sind fragil und ungeeignet für eine unmittelbare Kommunikation, aber überraschend nützlich für Berechnungen und die Kryptografie. Scheinbar gibt es keine Grenze für die Größe eines Objekts, das der Quanten-

physik unterworfen ist. Fast jeden Monat enthüllen geniale Geräte, die von Experimentalphysikern gebaut werden, dass immer größere Objekte seltsame Quantenphänomene zeigen – und mit ihnen wird das Problem, dass sich keine Quantenphänomene in unserem Alltagsleben beobachten lassen, immer größer.

Diese Phänomene sind nicht die einzige Herausforderung, wenn man die Botschaft der Quantenmechanik entschlüsseln will, nicht einmal die größte. Abgesehen von der Tatsache, dass jeder Physiker zustimmen wird, dass die Quantenmechanik funktioniert, wütet seit der Entwicklung der Theorie eine bittere Diskussion über ihre Bedeutung. Ein Standpunkt bei dieser Diskussion – auf den sich ein Großteil der Physiker und angeblich auch Bohr stellte – ist es, die Begriffe selbst zurückzuweisen. Diese Physiker behaupten, es sei unangemessen und unwissenschaftlich, angesichts des phänomenalen Erfolgs der Theorie danach zu fragen, was in der Welt der Quanten vor sich gehe. Die Theorie brauche keine Interpretation, denn die Dinge, die sie beschreibe, seien real. Tatsächlich hat die Eigentümlichkeit von Quantenphänomenen manche prominente Physiker dazu gebracht, einfach zu behaupten, dass es keine Alternative gäbe und dass die Quantenphysik beweise, dass kleine Objekte einfach nicht in der gleichen objektiven realen Art und Weise existieren wie Objekte in unserem Alltagsleben.¹ Deshalb könne man auch in der Quantenmechanik nicht über die Realität sprechen. Es gäbe nach dieser Theorie keine Geschichte der Welt und es könne auch keine geben.

Es ist überraschend, wie populär diese Einstellung zur Quantenphysik ist. In der Physik geht es um die Welt, die uns umgibt. Sie will die grundlegenden Bestandteile des Universums verstehen und wissen, wie sie funktionieren. Viele Physiker haben auf dem Gebiet angefangen, weil sie die grundlegenden Eigenschaften der Natur verstehen und herausfinden wollten, wie das Puzzle zusammenpasst. Aber wenn es um die Quantenmechanik geht, ist die Mehrheit von ihnen damit zufrieden, diese Fragen hinter sich zu lassen und dem „sei still und rechne“ zu folgen, ein Ausspruch, der dem Physiker David Mermin zugeschrieben wird.²

Noch überraschender ist, dass immer wieder gezeigt werden konnte, dass diese Sichtweise nicht funktioniert. Im Gegensatz zu der bei Physikern beliebten Meinung hatte Einstein gegenüber Bohr die besseren Argumente

¹Werner Heisenberg 1990, Physik und Philosophie Ullstein TB, S. 118.

²Original: „shut up and calculate“: N. David Mermin 1990, *Boojums All the Way Through: Communicating Science in a Prosaic Age* (Cambridge), S. 199

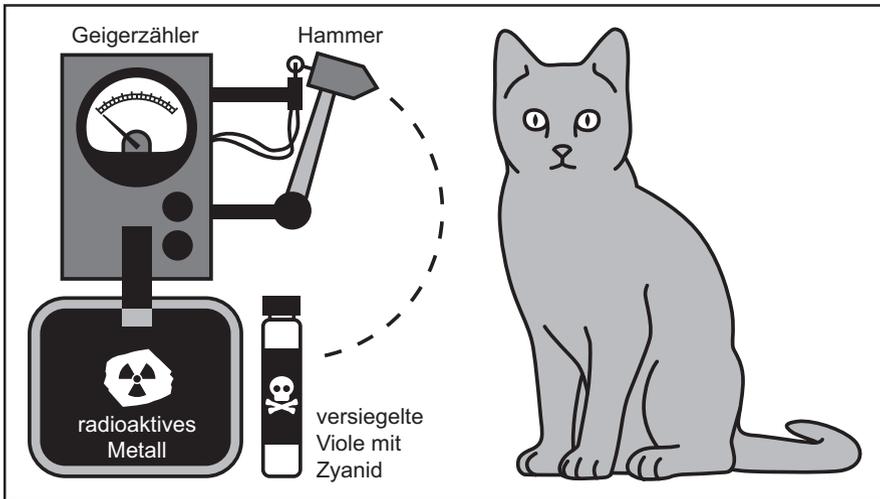


Abb. 1 Schrödingers Katze. Sobald das Metall Strahlung aussendet, registriert dies der Geigerzähler und gibt den Hammer frei, sodass das Zyanid freigesetzt und die Katze getötet wird.

und konnte überzeugend darlegen, dass es tiefgreifende Probleme im Kern der Quantenmechanik gibt, die beantwortet werden müssen. Die Frage nach der Realität einfach als „unwissenschaftlich“ abzutun, wie es manche von Schrödingers Gegnern machten, ist eine unhaltbare Position, die eine veraltete Philosophie als Grundlage hat. Manche Abweichler haben alternative Ansätze für die Quantenmechanik entwickelt, die klar erklären, was in der Welt vor sich geht, ohne die Genauigkeit der Theorie zu opfern.

Die Existenz dieser gangbaren Alternativen hat gezeigt, dass es nicht stimmt, dass wir die Realität in der Quantenphysik aufgeben müssen. Trotzdem hängen die meisten Physiker noch in gewisser Weise an dieser Idee. Sie wird immer noch in den Vorlesungssälen gelehrt und es ist immer noch das Bild, das für die Öffentlichkeit gemalt wird. Selbst wenn die Alternativen erwähnt werden, geschieht das eben nur als Alternativen zum Standard – trotz der Tatsache, dass der Standard überhaupt nicht funktioniert. Deshalb wissen wir selbst ein Jahrhundert nach der ersten Entwicklung der Quantenmechanik – die die Welt und das Leben jedes einzelnen Individuums darin sowohl zum Guten als auch zum Schlechten gründlich verändert hat – immer noch nicht, was sie uns über die Natur der Realität verrät. Diese durch und durch seltsame Geschichte ist das Thema dieses Buches.

Das ist eine erstaunliche Sachlage und kaum jemand außerhalb der Physik weiß darüber Bescheid. Warum sollte das auch jemanden interessieren? Die Quantenphysik funktioniert ja zweifellos. Warum sollten sich dann Physiker damit beschäftigen? Ihre mathematischen Berechnungen ergeben sehr genaue Vorhersagen, reicht das nicht? Doch in der Wissenschaft geht es um mehr als nur um Mathematik und Vorhersagen – es geht darum, ein Bild dafür zu schaffen, wie die Natur funktioniert. Und dieses Bild, diese Geschichte über die Welt, informiert uns sowohl über die alltägliche Praxis der Wissenschaft als auch über die zukünftige Entwicklung wissenschaftlicher Theorien, ganz zu schweigen von dem Tun der Menschen außerhalb der Wissenschaft. Für jede gegebene Menge von Gleichungen gibt es eine Unzahl von Geschichten darüber, was diese Gleichungen bedeuten. Eine gute Geschichte zu nehmen und dann nach den Löchern in dieser Geschichte zu suchen führt dazu, dass die Wissenschaft Fortschritte macht. Die Geschichten, die von den besten wissenschaftlichen Theorien erzählt werden, entscheiden auch über die Experimente, die Wissenschaftler auswählen, und die Art und Weise, wie diese Experimente interpretiert werden. Wie Einstein schon warnte: „Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann.“³

Die Wissenschaftsgeschichte bestätigte das immer wieder. Galileo war nicht der Erfinder des Teleskops – aber er kam als erster auf die Idee, ein gutes Modell davon auf Jupiter auszurichten, weil er glaubte, dass Jupiter ein Planet wie die Erde sei und um die Sonne wandere. Danach wurden Teleskope regelmäßig dafür genutzt, um Kometen, Sternnebel oder Sternhaufen zu beobachten. Doch niemand dachte daran, ein Teleskop dafür zu benutzen, um während einer Sonnenfinsternis herauszufinden, ob die Gravitation der Sonne das Licht der Sterne ablenkt – erst als die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins so einen Effekt vorhersagte, und das war drei Jahrhunderte nach Galileos Entdeckung.⁴ Unser wissenschaftliches Vorgehen selbst hängt vom gesamten Inhalt unserer besten wissenschaftlichen Theorien ab – nicht nur von der Mathematik, sondern von der Geschichte

³Werner Heisenberg 1971, *Der Teil und das Ganze*, Piper, München, S. 92.

⁴vgl. Stanley L. Jaki 1978, „Johann Georg von Soldner and the Gravitational Bending of Light, with an English Translation of His Essay on It Published in 1801“, *Foundations of Physics* 8 (11/12):927–950. Das Experiment wäre Jahrzehnte vor Einstein möglich gewesen – und wurde auch tatsächlich hundert Jahre vor Einstein von Johann Soldner als Test für die Newton'sche Physik vorgeschlagen. Doch niemand interessierte sich dafür, bis Einstein eine Konkurrenztheorie zur Newton'schen Gravitation vorschlug, die auf diese Art und Weise überprüft werden konnte.

der Welt, die zu dieser Mathematik gehört. Diese Geschichte ist ein entscheidender Teil der Wissenschaft und des Wegs, der über die existierende Wissenschaft hinaus zur nächsten Theorie führt.

Die Story spielt auch jenseits der Grenzen der Wissenschaft eine wichtige Rolle. Die Geschichten, die uns die Wissenschaft über die Welt erzählt, haben auch in der weiteren Kultur Auswirkungen. Sie verändern die Art und Weise, wie wir die Welt um uns herum und unseren Platz darin betrachten. Die Entdeckung, dass sich die Welt nicht im Mittelpunkt des Universums befindet, Darwins Evolutionstheorie, der Urknall und das expandierende Universum, das fast 14 Mrd. Jahre alt ist und Hunderte von Milliarden von Galaxien enthält, jede mit Hunderten von Milliarden von Sternen – all diese Ideen haben das Bild verändert, wie sich die Menschheit selbst wahrnimmt.

Die Quantenmechanik funktioniert, doch wenn wir ignorieren, was sie uns über die Realität verrät, bedeutet das, dass wir ein Loch im Verständnis der Welt einfach mit einem Blatt Papier zukleistern – und dabei eine große Geschichte über die Wissenschaft als einen menschlichen Vorgang ignorieren.

Vor allem ignorieren wir damit auch eine Geschichte über das Versagen: das Scheitern, über Disziplinen hinweg zu denken, das Scheitern, spezielle wissenschaftliche Zielsetzungen von dem bestechenden Einfluss des großen Geldes und der militärischen Verträge zu isolieren, das Scheitern beim Versuch, nach den Idealen der wissenschaftlichen Methode zu leben. Und dieses Versagen geht jeden denkenden Bewohner unserer Welt an, einer Welt, in der es keine Ecke mehr gibt, die nicht durch die Wissenschaft verändert wurde.

Dies ist eine Geschichte über die Wissenschaft als das menschliche Streben – nicht nur eine Geschichte darüber, wie die Natur funktioniert, sondern auch darüber, wie Menschen funktionieren.

Prolog – Alles Unmögliche ist getan

Das erste Mal kam John Bell als Student der Universität Belfast mit der Mathematik der Quantenmechanik in Kontakt und war gar nicht glücklich über das, was er da fand. Für Bell war die Quantenphysik ein schleierhaftes Durcheinander. „Ich zögerte zu denken, sie sei falsch“, sagte Bell, „aber ich *wusste*, dass sie *scheußlich* war.“⁵

Der Pate der Quantenphysik, Niels Bohr, sprach über eine Spaltung zwischen der Welt der großen Objekte, über die die klassische Newton'sche Physik herrscht, und der kleinen Objekte, wo die Quantenmechanik regiert. Aber Bohr war unerträglich vage darüber, wo er die Grenze zwischen diesen Welten setzen wollte. Und auch Werner Heisenberg, der Erste, dem eine vollständige mathematische Formulierung der Quantenphysik gelang, war nicht viel besser. Bohrs und Heisenbergs Ansatz für die Quantenphysik – bekannt unter dem Namen *Kopenhagener Deutung* nach dem Sitz von Bohrs berühmten Institut – war von der gleichen Verschwommenheit durchdrungen, die Bell in seinen Quantenphysikvorlesungen kennengelernt hatte.

Kurz bevor Bell 1949 promovierte, stolperte er über ein Buch von Max Born, einem anderen Architekten der Quantenphysik. Es trug den Titel *Natural philosophy of cause and chance* und machte großen Eindruck auf Bell – vor allem die Ausführungen zu einem Beweis des großen Mathematikers und Physikers John von Neumann. Born zufolge hatte von Neumann

⁵„but I knew it was rotten“: Jeremy Bernstein 1991, *Quantum Profiles* (Princeton University Press), S. 20. Die Betonung von „wusste“ stammt nach Bernstein von Bell, die Betonung von „scheußlich“ wurde in diesem Zusammenhang von Bernstein eingeführt: „Bell betonte das Wort „scheußlich“ ziemlich genussvoll.“

bewiesen, dass die Kopenhagener Deutung die einzig mögliche Art und Weise war, die Quantenphysik zu verstehen. Entweder war also die Kopenhagener Deutung richtig oder die Quantenphysik war falsch. Angesichts des Erfolgs der Quantenmechanik sah es so aus, als würden die Kopenhagener Deutung und ihre Verschwommenheit bestehen bleiben.

Bell war nicht in der Lage, von Neumanns Originalbeweis selbst zu lesen, denn dieser war nur auf Deutsch veröffentlicht worden, was Bell nicht beherrschte. Nachdem Bell Borns Beschreibung gelesen hatte, „machte er mit praktischeren Dingen weiter“,⁶ statt sich weiter um seine Bedenken und die Kopenhagener Deutung zu kümmern. Von nun an beschäftigte er sich mit dem Atomenergieprogramm Großbritanniens und schob seine Zweifel an der Quantenmechanik beiseite. Doch 1952 zerschmetterte eine neue Veröffentlichung seine kurzzeitige Gleichgültigkeit hinsichtlich der Probleme der Kopenhagener Deutung und er „erkannte ..., wie das Unmögliche getan werden konnte.“⁷

Trotz des Beweises durch von Neumann hatte der Physiker David Bohm eine andere Möglichkeit gefunden, die Quantenphysik zu verstehen. Wie das? Wo hatte sich der gewaltige von Neumann geirrt? Und hatte es vor Bohm niemand bemerkt? Ohne von Neumanns Beweis zu lesen, konnte Bell diese Frage nicht beantworten. Aber bis drei Jahre später von Neumanns Buch ins Englische übersetzt wurde, hatte sich das Leben eingemischt: Bell hatte geheiratet und war nach Birmingham gezogen, um in Quantenmechanik zu promovieren. Bohms Veröffentlichung „ist mir nie vollständig aus dem Kopf gegangen“, sagte Bell. „Ich wusste immer, dass sie auf mich wartet.“⁸ Mehr als ein Jahrzehnt später kehrte Bell schließlich dazu zurück – und machte die tiefgreifendste Entdeckung über die Natur der Realität seit Einstein.

⁶John S. Bell 2004, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, 2. Aufl. (Cambridge University Press), S. 160.

⁷Bell 2004, S. 160.

⁸Charles Mann und Robert Crease 1988, „Interview: John Bell.“ OMNI, Mai, 90.

Eine Philosophie als Beruhigungsmittel

Den Menschen von Tlön wurde beigebracht, dass der Akt des Zählens die gezählte Zahl verändert, sodass Unbestimmtes in Bestimmtes verwandelt wird. Die Tatsache, dass mehrere Personen beim Zählen der gleichen Menge zum gleichen Ergebnis kommen, ist für die Psychologen von Tlön ein Beispiel für die ideelle Verbindung oder die Erinnerung

– Jorge Luis Borges, “Tlön, Uqbar, Orbus Tertius”

Diese erkenntnistheoretisch aufgeweichte Orgie muss enden

– Albert Einstein, Brief an Erwin Schrödinger, 1935



1

Das Maß aller Dinge

Im ersten Viertel des zwanzigsten Jahrhunderts erschütterten zwei bedeutende Theorien die Welt. Sie zerstörten die Relikte der Physik, die vorher da war, und veränderten unser Verständnis der Realität auf ewig. Eine dieser Theorien, die Relativitätstheorie, wurde in wahrer Science-Fiction-Manier durch ein einsames Genie entwickelt, das vollkommen für sich allein gearbeitet hat. Es hatte die Hochschule nur verlassen, um in einem blendenden Triumphzug mit tiefgreifenden Wahrheiten in seinen Händen zurückzukehren – das war natürlich Albert Einstein.

Die andere Theorie, die Quantenphysik, hatte eine schwerere Geburt. Es war eine gemeinsame Anstrengung dutzender von Physikern, die im Laufe von 30 Jahren an ihr gearbeitet hatten. Einstein gehörte dazu, doch er war nicht ihr Anführer; am ehesten kam diese Rolle in dieser unorganisierten und ungebändigten Bande von Revolutionären noch dem großen dänischen Physiker Niels Bohr zu.

Dessen Institut für theoretische Physik in Kopenhagen war das Mekka der jungen Quantenphysik. Fast jeder mit großem Namen auf dem Gebiet hatte dort irgendwann studiert. Die Physiker, die dort arbeiteten, machten auf vielen Wissenschaftsgebieten grundlegende Entdeckungen: Sie entwickelten die erste echte Theorie der Quantenmechanik, fanden heraus, welcher Logik das Periodensystem der Elemente folgte, und verwendeten die Fähigkeiten der Radioaktivität um zu enthüllen, wie lebende Zellen arbeiten. Es waren Bohr und eine Gruppe seiner talentiertesten Studenten und Kollegen – Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Max Born, Pascual Jordan und anderen –, die die Kopenhagener Deutung entwickelten und favorisierten, sodass

sie bald zur Standardinterpretation der Mathematik der Quantenphysik wurde. Und was verrät uns die Quantenphysik über die Welt? Nach der Kopenhagener Deutung gab es zu dieser Frage eine einfache Antwort: Die Quantenphysik verrät uns überhaupt nichts über die Welt.

Stattdessen erzählt sie uns eine Geschichte über die Quantenwelt, in der Atome und subatomare Teilchen wohnen. Nach der Kopenhagener Deutung ist die Quantenmechanik nur ein Werkzeug, mit dem man die Wahrscheinlichkeiten für das Ergebnis eines Experiments berechnen kann. Bohr zufolge gibt es keine Geschichte der Quantenwelt, weil es keine Quantenwelt gibt. Es gibt nur eine abstrakte quantenmechanische Beschreibung.¹ Die Beschreibung erlaubt uns lediglich, Wahrscheinlichkeiten für Quantenereignisse vorherzusagen, denn Quantenobjekte existieren nicht so wie die alltäglichen Dinge um uns herum. Wie Heisenberg es ausdrückte: „Die Vorstellung, einer objektiven realen Welt, deren kleinsten Teile in der gleichen Weise objektiv existieren wie Steine oder Bäume, gleichgültig, ob wir sie beobachten oder nicht,“ ist nicht tragbar.² Doch die Ergebnisse unserer Experimente sind sehr real, denn wir erzeugen sie beim Vorgang des Messens. Jordan sagte, wenn wir den Ort eines subatomaren Teilchens bestimmen, z. B. eines Elektrons, „wird das Elektron zu einer Entscheidung gezwungen. Wir zwingen es, *einen genau definierten Ort einzunehmen*; vorher war es im Allgemeinen weder hier noch da ... Wir erzeugen also das Ergebnis einer Messung selbst.“³

Derartige Aussagen klangen für Albert Einstein lächerlich. „Die Theorie erinnert mich ein wenig an das Wahnsystem eines außerordentlich intelligenten Paranoikers“, schrieb er in einem Brief an einen Freund.⁴ Trotz seiner entscheidenden Rolle bei der Entwicklung der Quantenphysik empfand Einstein die Kopenhagener Deutung als unerträglich. Er nannte sie eine „ruhigstellende Philosophie – oder Religion“, die ein „weiches Kissen für den wahren Gläubigen“ zur Verfügung stelle „... [aber] so ver-

¹Max Jammer 1974, *The Philosophy of Quantum Mechanics* (John Wiley & Sons), S. 204. Vgl. aber auch N. David Mermin 2004a, „What’s Wrong with This Quantum World?“, *Physics Today*, February, S. 10–11.

²Heisenberg 1990, S. 104.

³Jammer 1974, S. 164. Beachten Sie auch, dass Jordans Ansichten denen von Bohr widersprechen, und auch die von Heisenberg könnten nicht dazu passen. Es gibt tatsächlich viele widersprüchliche Gedankenschulen, die alle den Namen Kopenhagener Deutung tragen, obwohl sie behaupten, dasselbe auszusagen. Mehr darüber in Kap. 3.

⁴Brief von Einstein an D. Lipkin, 5. Juli 1952, zitiert aus Arthur Fine 1996, *The Shaky Game*, 2nd ed. (University of Chicago Press), S. 1.

dammt weniger Auswirkungen auf mich [hat].“⁵ Einstein forderte eine Interpretation der Quantenphysik, die eine zusammenhängende Geschichte über die Welt erzählt, eine, die Antworten auf Fragen gibt, selbst wenn keine Messung stattfindet. Er war aufgebracht darüber, dass sich die Kopenhagener Deutung weigerte, derartige Fragen zu beantworten, und nannte sie deshalb eine „erkenntnistheoretisch aufgeweichte Orgie“.⁶

Trotzdem blieben Einsteins Appelle nach einer vollständigeren Theorie ungehört; teilweise deshalb, weil John von Neumann bewiesen hatte, dass es eine derartige Theorie nicht geben könne. Von Neumann war zweifellos das größte lebende Mathematikgenie.⁷ Er hatte sich im Alter von acht Jahren selbst die Integral- und Differentialrechnung beigebracht, mit neunzehn die erste Veröffentlichung in höherer Mathematik publiziert und mit zweiundzwanzig promoviert. Er hatte eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung der Atombombe gespielt und war einer der Gründerväter der Computerwissenschaft. Außerdem sprach er mehrere Sprachen fließend. Halb scherzend sagten seine Kollegen in Princeton, von Neumann könne alles beweisen – und alles, was er beweise, sei richtig.⁸

Von Neumann veröffentlichte seinen Beweis 1932 in einem Lehrbuch über Quantenphysik. Es gibt keine Hinweise darauf, dass Einstein etwas von diesem Beweis wusste⁹ – anders als viele anderen Physiker, und für diese war schon die reine Vorstellung eines Beweises durch von Neumann ausreichend, um eine Diskussion zu beenden. Der Philosoph Paul Feyerabend erfuhr dies aus erster Hand, nachdem er einen öffentlichen Vortrag von Bohr gehört hatte: „Am Ende des Vortrags ging Bohr, und die Diskussion ging ohne ihn weiter. Manche Redner griffen seine qualitativen Argumente an – es schien viele Hintertürchen zu geben. Die Bohrianer klärten nun nicht etwa die Argumente, sondern erwähnten den angeblichen Beweis durch von Neumann und damit war die Sache beendet ... wie durch Zauberei reichte der Name „von Neumann“ und der Begriff „Beweis“, um die Gegner zum Schweigen zu bringen.“¹⁰

⁵Kaiser 2011, *How the Hippies Saved Physics: Science, Counterculture, and the Quantum Revival* (W. W. Norton), S. 8.

⁶Fine 1996, S. 94.

⁷Max Born 1969, *Albert Einstein Max Born Briefwechsel 1916–1955*, Nymphenburger, S. 196.

⁸Richard Rhodes 1986, *The Making of the Atomic Bomb* (Simon and Schuster), S. 108–109.

⁹Vgl. Fine 1996, S. 42n3, wo es eine ausführliche Diskussion darüber gibt.

¹⁰Zitiert nach Mara Beller 1999b, *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution* (University of Chicago Press), S. 213–214.

Mindestens eine Person bemerkte kurz nach der Veröffentlichung ein Problem in von Neumanns Beweis. Grete Hermann, eine deutsche Mathematikerin und Philosophin, publizierte 1935 eine Veröffentlichung, in der sie seinen Beweis bemängelte. Sie wies nach, dass es von Neumann nicht gelungen war, einen entscheidenden Schritt zu begründen und dass deshalb der gesamte Beweis fehlerhaft war.^{11, 12} Doch niemand beachtete sie, teilweise, weil sie nicht zur Gemeinschaft der Physiker gehörte – und teilweise, weil sie eine Frau war.¹³

Trotz des Fehlers in von Neumanns Beweis blieb die Kopenhagener Deutung die vorherrschende. Einstein wurde als alter Mann dargestellt, der den Kontakt mit dem Rest der Welt verloren hatte, und die Kopenhagener Deutung infrage zu stellen wurde gleichbedeutend damit, die großen Erfolge der Quantenphysik selbst anzuzweifeln. Und so machte die Quantenmechanik die nächsten zwanzig Jahre lang weiter, häufte Erfolg nach Erfolg an, ohne dass je die Frage nach dem Loch in ihrem Herzen gestellt wurde.¹⁴

Aber warum benötigt die Quantenphysik überhaupt eine Interpretation? Warum verrät sie uns nicht einfach, wie die Welt aussieht? Warum gab es überhaupt diesen Streit zwischen Einstein und Bohr? Die beiden stimmten sicherlich darin überein, dass die Quantenmechanik funktionierte. Wenn sie beide an die Theorie glaubten, wie konnten sie dann anderer Meinung darüber sein, was die Theorie zum Ausdruck bringt?

Die Quantenmechanik macht eine Interpretation erforderlich, weil nicht sofort deutlich ist, was sie über die Welt verrät. Die Mathematik hinter der Quantenphysik ist unvertraut und abstrus; es ist schwer, die Verbindung zwischen dieser Mathematik und der Welt, in der wir leben, zu erkennen. Dies steht im klaren Widerspruch zu jener Theorie, die durch die Quantenphysik ersetzt wurde: die Physik von Isaac Newton. Die Newton'sche Physik

¹¹„Der Zirkel in NEUMANNs Beweis“, Veröffentlichung von Grete Hermann, Die Naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik. Abhandlungen der fries'schen Schule, 6, 1935.

¹²Jammer 1974, S. 273–274; eine englische Übersetzung der relevanten Teile von Hermanns Veröffentlichung findet man hier: HYPERLINK "sps:urlprefix::http" <https://mpseevinck.ruhosting.nl/seevinck/trans.pdf>, zugegriffen am 15. März 2019.

¹³Vgl. N. David Mermin 1993, „Hidden Variables and the Two Theorems of John Bell“, *Reviews of Modern Physics* 65 (3): 805. „Grete Hermann wies auf einen klaren Fehler in der Beweisführung hin, doch sie scheint vollkommen ignoriert worden zu sein. Jeder zitierte weiterhin den Beweis durch von Neumann.“ Mehr über Hermann findet sich auf der Präsentation von M. P. Seevinck über sie (2012), vgl.: <https://web.mit.edu/redingtn/www/netadv/PHghermann.html>, zugegriffen am 15. März 2019.

¹⁴Vgl. Jammer 1974, S. 247: „Trotz der gegenteiligen Meinung mancher führender Physiker zu Bohrs Ansichten, wie Einstein und Schrödinger, akzeptierte die überwiegende Mehrheit das Komplementaritätsprinzip (d. h. die Kopenhagener Deutung) im Allgemeinen ohne Bedenken, zumindest während der ersten beiden Dekaden nach ihrer Einführung.“

beschreibt eine vertraute und einfache Welt mit drei Dimensionen, die mit festen Objekten gefüllt ist, welche sich auf geraden Linien bewegen, bis sie etwas von ihren Bahnen abbringt.

Die Mathematik der Newton'schen Physik legt den Ort eines Objekts mit einer Menge aus drei Zahlen fest; jede steht für eine Dimension. Man spricht von einem Vektor. Wenn ich in 2 m Höhe auf einer Leiter stehe und sich diese Leiter 3 m von Ihnen entfernt befindet, könnte ich meine Position als $(0, 3, 2)$ beschreiben. Die Null bringt zum Ausdruck, dass ich seitlich nicht nach links oder rechts verschoben stehe, die Drei sagt, dass ich 3 m von Ihnen weit weg bin und die Zwei, dass ich 2 m höher bin als Sie. Das ist ziemlich einfach – niemand läuft herum, weil er tief besorgt darüber ist, wie er die Newton'sche Physik interpretieren soll.

Doch die Quantenphysik ist seltsamer als die Newton'sche Physik, und auch ihre Mathematik ist ungewöhnlicher. Wenn Sie wissen wollen, wo sich ein Elektron befindet, benötigen Sie mehr als drei Zahlen – Sie brauchen unendlich viele davon. Die Quantenmechanik verwendet unendliche Ansammlungen von Zahlen, die sogenannten *Wellenfunktionen*, um die Welt zu beschreiben. Diese Zahlen sind verschiedenen Orten zugeordnet: Jeder Punkt im Raum hat seine eigene Zahl.¹⁵ Wenn Sie auf Ihrem Smartphone eine App hätten, die die Wellenfunktion eines einzelnen Elektrons messen könnte, würde der Bildschirm nur eine einzige Zahl ausgeben, nämlich die Zahl, die dem Punkt zugeordnet ist, an dem sich Ihr Handy befindet. Dort, wo Sie gerade sitzen, würde das Wave-Function-O-Meter™ vielleicht die Zahl 5 ausgeben. Wenn Sie auf der Straße einen halben Block weitergehen, dann würde es vielleicht 0,02 zeigen.¹⁶ So etwas ist einfach gesagt eine Wellenfunktion: eine Menge von Zahlen, die zu verschiedenen Orten gehören.

In der Quantenmechanik hat alles eine Wellenfunktion: dieses Buch, der Stuhl, auf dem Sie sitzen, und sogar Sie selbst; genauso die Atome in der Luft, die Sie umgibt, und die Elektronen und anderen Teilchen in diesen Atomen. Die Wellenfunktion eines Objekts legt sein Verhalten fest und das Verhalten der Wellenfunktion eines Objekts wird wiederum durch die Schrödinger-Gleichung bestimmt. Das ist die zentrale Gleichung der Quantenphysik, die 1925 von dem österreichischen Physiker Erwin Schrödinger entwickelt wurde. Die Schrödinger-Gleichung stellt sicher, dass

¹⁵Für Spezialisten: Ich verwende hier nur Wellenfunktionen für den Ortsraum für stationäre Einteilchenzustände als Beispiel. Zu komplexeren Dingen komme ich später.

¹⁶Manchmal könnte das Wave-Function-O-Meter™ eine imaginäre Zahl anzeigen, etwa die Wurzel einer negativen Zahl, doch diese Komplikation lassen wir erst einmal beiseite.

sich Wellenfunktionen immer nahtlos ändern – die Zahl, die eine Wellenfunktion einem bestimmten Ort zuordnet, springt niemals plötzlich von 5 auf 500, sondern ist vollkommen vorhersagbar: 5,1; 5,2; 5,3 usw. Der Wert einer Wellenfunktion kann steigen oder auch wieder fallen – daher kommt auch der Name – doch dies geschieht immer ohne Brüche (genau wie bei einer echten Welle), er zuckt nie allzu verrückt herum.

Wellenfunktionen sind nicht so kompliziert, doch es ist ein wenig verrückt, dass die Quantenmechanik so etwas benötigt. Newton kann Ihnen den Ort eines Objekts mit nur drei Zahlen nennen. Die Quantenmechanik braucht stattdessen offensichtlich eine unendliche Anzahl von Zahlen dafür, die über das gesamte Universum verteilt sind, und das, nur um den Ort eines einzelnen Elektrons zu bezeichnen. Aber vielleicht sind die Elektronen das Verrückte – vielleicht verhalten sie sich ganz anders als Felsen oder Stühle oder Menschen. Vielleicht sind sie verschmiert, und die Wellenfunktion beschreibt, wie viel eines Elektrons sich an einem bestimmten Ort befindet.

Doch wie sich herausstellt, kann das nicht richtig sein. Niemand hat jemals ein halbes Elektron gesehen oder irgendetwas geringeres als ein ganzes Elektron an einem genau bestimmbar Ort. Die Wellenfunktion sagt nichts darüber aus, wie viel eines Elektrons an einem Ort ist – sie bringt die *Wahrscheinlichkeit* zum Ausdruck, dass dieses Elektron gerade da ist.¹⁷ Die Vorhersagen der Quantenphysik werden im Allgemeinen in Form von Wahrscheinlichkeiten gemacht, nicht von Gewissheiten. Und das ist seltsam, weil die Schrödinger-Gleichung vollkommen deterministisch ist – es geht keinerlei Wahrscheinlichkeit in sie ein. Sie können die Schrödinger-Gleichung benutzen, um mit hoher Genauigkeit vorherzusagen, wie sich eine Wellenfunktion verhalten wird – und das für alle Zeit.

Obwohl, das stimmt auch nicht ganz. Sobald Sie das Elektron gefunden haben, passiert etwas Komisches mit seiner Wellenfunktion. Statt wie eine brave Wellenfunktion weiter der Schrödinger-Gleichung zu folgen, bricht sie zusammen – sie wird sofort überall null, bis auf den Ort, wo Sie das Elektron gefunden haben. Irgendwie scheinen sich die physikalischen Gesetze anders zu verhalten, sobald Sie eine Messung durchführen: Die Schrödinger-Gleichung gilt die ganze Zeit, außer wenn Sie eine Messung machen, denn dann wird sie zeitweise aufgehoben und die Wellenfunktion bricht überall zusammen, außer an einem zufälligen Punkt. Das

¹⁷Eigentlich ist es das Quadrat der Wellenfunktion, das die Wahrscheinlichkeit angibt, doch die Idee dahinter bleibt die gleiche.

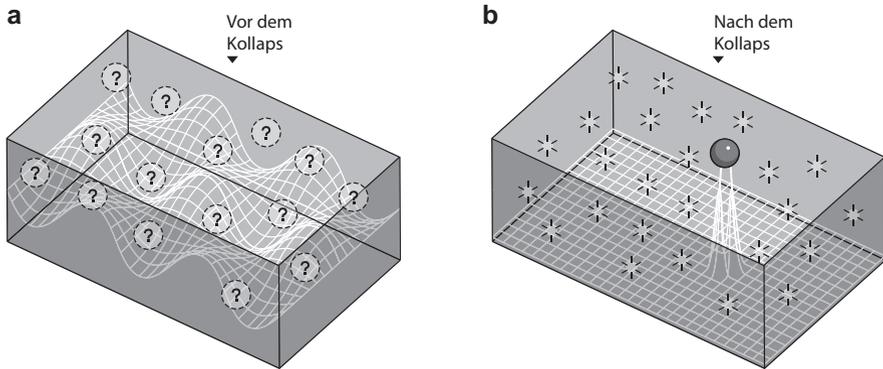


Abb. 1.1 Das Messproblem. **a** Die Wellenfunktion einer Kugel in einer Kiste folgt der Schrödinger-Gleichung und wogt glatt auf und ab, wie die Wellen auf der Oberfläche eines Teiches. Die Kugel kann irgendwo in der Kiste sein. **b** Die Position der Kugel wird gemessen und man findet sie an einem bestimmten Ort. Sofort bricht die Wellenfunktion zusammen und bricht damit radikal die Schrödinger-Gleichung. Warum gilt die Schrödinger-Gleichung – immerhin ein Naturgesetz – nur, wenn keine Messung durchgeführt wird? Und überhaupt: Was zählt als Messung?

ist so verrückt, dass es einen eigenen Namen erhalten hat: das *Messproblem* (Abb. 1.1).

Warum gilt die Schrödinger-Gleichung nur, wenn keine Messung durchgeführt wird? Das scheint anders zu sein als bei normalen Naturgesetzen – wir stellen uns vor, dass die Naturgesetze immer gelten, ganz unabhängig davon, was wir tun. Wenn sich ein Blatt von einem Ahornbaum löst, fällt es herunter, ganz unabhängig davon, ob jemand da ist, der das beobachtet. Die Gravitation kümmert sich nicht darum, ob sie von jemanden beobachtet wird.

Aber vielleicht ist die Quantenphysik wirklich anders. Vielleicht verändern Messungen tatsächlich die Gesetze, die über die Quantenwelt herrschen. Das ist sicherlich seltsam, doch es scheint nicht unmöglich zu sein. Doch selbst wenn es wahr ist, so löst es doch nicht das Messproblem, denn nun stehen wir vor einer weiteren Herausforderung: Was ist überhaupt eine Messung? Ist dazu jemand erforderlich, der misst? Hängt die Quantenwelt davon ab, ob sie Zuschauer hat? Kann jeder eine Wellenfunktion zum Kollabieren bringen oder muss man dazu wach und sich dessen bewusst sein? Und kann es jemand, der im Koma liegt? Wie sieht es mit einem neugeborenen Baby aus? Ist es auf Menschen beschränkt oder sind auch Schimpansen dazu in der Lage? „Verändert es den (Quanten-) Zustand des

Universums, wenn eine Maus zusieht?“, wollte Einstein einmal wissen.¹⁸ Bell fragte: „Wartete die Wellenfunktion der Welt Tausende von Millionen von Jahren darauf damit zu springen, bis eine einzige einzellige Kreatur auftauchte? Oder musste sie noch länger auf einen hoch qualifizierten Menschen, der eine Messung durchführte, warten – jemand, der promoviert hatte?“¹⁹ Wenn eine Messung nichts mit einem lebenden Beobachter zu tun hat, was ist dann dafür nötig? Vielleicht nur, dass ein kleines Objekt, das den Gesetzen der Quantenmechanik gehorcht, mit einem großen in Wechselwirkung getreten ist, das irgendwie von der Quantenphysik ausgenommen ist? Falls dem so ist: Heißt das nicht, dass eigentlich ständig Messungen passieren und dass die Schrödinger-Gleichung fast niemals gilt? Aber warum funktioniert die Schrödinger-Gleichung dann überhaupt? Und wo liegt die Grenze zwischen der Quantenwelt des Kleinen und der Newton'schen Welt des Großen?

Es ist, milde ausgedrückt, verstörend, dass diese Büchse der Pandora aus verrückten Fragen im Zentrum der Grundlagenphysik steht. Aber trotz all dieser Verrücktheiten ist die Quantenphysik weitgehend erfolgreich und beschreibt die Welt viel besser als die einfache, alte Newton'sche Physik (die schon ziemlich gut war). Ohne die Quantenmechanik würden wir nicht verstehen, warum Diamanten so hart sind, woraus Atome bestehen oder wie man elektronische Bauteile bauen kann. Also müssen Wellenfunktionen, deren Zahlen über das ganze Universum verteilt sind, irgendwie mit dem alltäglichen Zeug um uns herum in Verbindung stehen, sonst könnte die Quantenphysik keine so guten Vorhersagen machen. Aber dies macht das Messproblem umso dringender, denn es bedeutet, dass es etwas an der Realität gibt, was wir nicht verstehen.

Wie sollen wir diese seltsame und wunderbare Theorie also interpretieren? Welche Geschichte erzählt uns die Quantenphysik über die Welt? Statt diese Frage zu beantworten – was ziemlich schwierig aussieht – könnten wir bezweifeln, dass es überhaupt eine legitime Frage ist. Wir könnten behaupten, dass Vorhersagen über das Ergebnis einer Messung zu machen das Einzige ist, worauf es in der Quantenmechanik ankommt. Dann müssen wir uns keine Sorgen darüber machen, was passiert, wenn wir keine Messung durchführen, und all diese schwierigen Fragen schmelzen dahin. Was ist die Wellenfunktion? In welcher Verbindung steht sie zu den Objekten in der Welt um uns herum? Leichte, komfortable Lösungen sind

¹⁸Walter Isaacson 2007, Einstein: His Life and Universe (Simon and Schuster), S. 515.

¹⁹Bell 2004, S. 117.

dann schnell zur Hand: Die Wellenfunktion ist nur eine mathematische Vorrichtung, ein buchhalterisches Werkzeug, das es uns erlaubt, Vorhersagen über Messungen zu machen. Und sie hat keine Verbindung zur Welt um uns herum – es handelt sich nur um ein nützliches Stück Mathematik. Es ist unerheblich, wenn Wellenfunktionen sich anders verhalten, wenn wir nicht hinschauen, denn zwischen Messungen spielt überhaupt nichts eine Rolle. Selbst über die Existenz von Dingen zwischen zwei Messungen zu sprechen ist unwissenschaftlich. Dies ist – seltsamerweise – die orthodoxe Ansicht der Quantenphysik – das „weiche Kissen“ der Kopenhagener Deutung. Diese verdächtig einfachen Antworten werfen eine weitere Frage auf, eine ohne offensichtliche Lösung. Physik ist die Wissenschaft der materiellen Welt. Und die Quantentheorie gibt vor, die Physik zu sein, die die grundlegendsten Komponenten dieser Welt beschreibt. Trotzdem sagt die Kopenhagener Deutung, dass die Frage danach, was wirklich in der Quantenphysik vorgeht, keine Bedeutung hat. Was ist also real? Die Antwort von Kopenhagen ist Stille – und ein Blick voll von strenger Missbilligung, weil jemand die Kühnheit hatte, diese Frage überhaupt zu stellen.

Dies ist eine zutiefst unbefriedigende Antwort. Doch es ist auch die Standardantwort. Die Physiker, die dieser Frage trotzdem nachgingen – wie Einstein und später Bell und Bohm – taten dies quasi in offenem Ungehorsam gegenüber Kopenhagen. Deshalb ist die Suche nach Realität auch die Geschichte dieser Rebellion, eine Rebellion, die so alt ist wie die Quantenphysik selbst.



2

Der seltsame Kollaps von Kopenhagen

Endlich war die Zeit für Werner Heisenberg gekommen. Der junge Physiker, erst zwanzig Jahre alt, wurde eingeladen, um einen Vortrag an der Berliner Universität zu halten, damals der Mittelpunkt der Physik in Deutschland und wohl der ganzen Welt. Er sollte seine erstaunlichen neuen Ideen vor Einstein selbst erklären.

„Weil das meine erste Gelegenheit war, so vielen berühmten Männern zu begegnen, bemühte ich mich sehr um eine klare Darstellung der Konzepte und der mathematischen Grundlagen dieser damals sehr unkonventionellen Theorie“, erinnerte sich Heisenberg Jahrzehnte später.

„Es gelang mir, besonders Einsteins Interesse zu wecken. Einstein bat mich nach dem Kolloquium, ihn in seine Wohnung zu begleiten, damit wir über die neuen Gedanken ausführlicher diskutieren könnten.“¹ Während sie an diesem Frühlingstag 1926 zu seinem Appartement gingen, fragte Einstein Heisenberg unverfänglich über seine Ausbildung und seinen Hintergrund aus und achtete sorgfältig darauf, das Thema nicht auf Heisenbergs neue Theorie kommen zu lassen. Er wartete, bis sie sicher im Haus waren, bevor er die Falle zuschnappen ließ.

Heisenbergs „sehr unkonventionelle Theorie“ war ein gewaltiger Durchbruch. Sie versprach das offene wissenschaftliche Problem seiner Tage zu lösen: die Natur der Quantenwelt. Schon seit fast drei Jahrzehnten wussten die Physiker, dass etwas nicht stimmte, dass unbedingt eine Veränderung notwendig war, um zu verstehen, was in der Welt der kleinsten Dinge – in

¹Heisenberg 1971, S. 91.