

Ernst Peter Fischer

Die Hintertreppe zum Quantensprung

Die Erforschung der kleinsten Teilchen
von Max Planck bis Anton Zeilinger

Herbig

Inhalt

Die alten Quantensprünge	7
Acht Pioniere	15
Max Planck (1858–1947)	15
Arnold Sommerfeld (1868–1951)	31
Ernest Rutherford (1871–1937)	44
Lise Meitner (1878–1968)	53
Albert Einstein (1879–1955)	68
James Franck (1882–1964)	86
Max Born (1882–1970)	94
Niels Bohr (1885–1962)	106
Acht Revolutionäre	133
Erwin Schrödinger (1887–1961)	133
Louis de Broglie (1892–1987)	146
Wolfgang Pauli (1900–1958)	154
Werner Heisenberg (1901–1976)	171
Enrico Fermi (1901–1954)	188
Paul A. M. Dirac (1902–1984)	199
George Gamow (1904–1968)	209
Lew D. Landau (1908–1968)	221
Acht Erben	233
John Bardeen (1908–1991)	233
John A. Wheeler (1911–2008)	247
Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007)	259
David Bohm (1917–1992)	271

Richard P. Feynman (1918–1988)	281
John S. Bell (1928–1990)	294
Murray Gell-Mann (*1929)	308
Anton Zeilinger (*1945)	322
Die kommenden Quantensprünge	335
Literatur	339
Dank	343
Register	345

Die alten Quantensprünge

Quantensprünge kennt inzwischen jeder. Gemeint ist das Wort. Denn wer Unternehmern, Managern, Politikern oder anderen Festrednern zuhört, kann darauf wetten, dass es nicht lange dauert, bis in den jeweiligen Reden angekündigt oder gar versprochen wird, dass demnächst Quantensprünge in der Entwicklung eintreten würden. Damit sind plötzlich in Erscheinung tretende und außerordentliche Dimensionen annehmende Fortschritte sowie damit verbundene Gewinne gemeint, die dem Wohle des Volkes oder zumindest dem der Aktionäre dienen und mit deren Hilfe die Redner hoffen, die Zukunft meistern oder gestalten zu können.

Der doppelte Unsinn

Quantensprünge erfreuen sich also großer Beliebtheit, und niemand bemerkt, dass bei dieser fröhlichen Beschwörung einer wissenschaftlichen Idee und ihrer Einbettung in den sozialen Alltag das tatsächlich damit Gemeinte in doppelter Hinsicht auf den Kopf gestellt und also ziemlich unsinnig wird.

Zum einen bezeichnet die Physik, der wir das Konzept eines Quantensprungs verdanken, mit diesem Ausdruck und der entsprechenden Tatsache die aller kleinste Veränderung, die einem gegebenen Etwas – einem Atom oder einem Molekül – passieren kann, und wenn die damit verbundene Bewegung einsetzt, geht es gewöhnlich bergab, also nach

unten. Ein Atom etwa, das einen Quantensprung ausführt, landet dabei zumeist in seinem Grundzustand, wie die Wissenschaft es nennt, und in dieser Position möchte es dann so lange wie möglich untätig verweilen. Ein Quantensprung bewirkt also etwas, das die erwähnten Manager und Politiker für das von ihnen Verantwortete unter allen Umständen vermeiden möchten. Und das macht die Frage unvermeidlich: Warum reden sie überhaupt von Quantensprüngen? Für außenstehende Laien gilt auf jeden Fall die Regel: Wenn sie demnächst hören, dass Wirtschaftsbosse oder führende Politikerinnen, die etwas von Physik verstehen, Quantensprünge für ein Unternehmen oder die allgemeine Lage ankündigen, und wenn sie das Gesagte ernst nehmen, dann sollten sofort alle relevanten Aktien auf den Markt geworfen bzw. eine andere Partei gewählt werden.

Während diese erste öffentliche Verdrehung einer wissenschaftlichen Einsicht inzwischen vielen auffällt, bleibt die zweite bislang noch unbemerkt. Da sie aber tiefer geht, sollte sie von allen sorgfältig bedacht werden, die sich seriös darauf einlassen wollen, die physikalische Wirklichkeit, so wie sie sich nach der Entdeckung der Quantensprünge und mit deren Hilfe darstellt, zu verstehen. Denn im Gegensatz zu den publikumswirksamen Beschwörern von (fantasierten und zugleich fantastischen) Quantensprüngen – meist begrüßen und bejubeln sie die dazugehörigen Veränderungen freudig und können eigentlich gar nicht genug von ihnen bekommen – zeigten sich die wissenschaftlichen Entdecker des ruckhaften und unsteten Verhaltens der Natur erst erstaunt und dann schockiert. Sie reagierten entsetzt, verzweifelt, erschrocken und verwirrt, wie ihren Biografien zu entnehmen ist, und sie litten unter ihren eigenen Befunden. Einige Physiker fühlten sich von der Quantenhopserei gar angewidert und angeekelt, und viele von ihnen hatten nur ei-

nes im Sinn, nämlich die unstetigen Elemente unter allen Umständen und so schnell wie möglich wieder loszuwerden. Paradox formuliert: Sie verstanden die Welt nicht mehr, obwohl sie sie gerade verstanden hatten (wie wir heute wissen und sagen können). Einer von ihnen, der Däne Niels Bohr, meinte, wer bei der Physik der Quantensprünge nicht verrückt werde, der habe sie überhaupt nicht begriffen, und seine jüngeren Kollegen zitierten als wiederkehrenden Orkelton den Satz, den Shakespeare seinem Hamlet in den Mund legt: »Ist dies schon Wahnsinn, so hat es doch Methode.« Wir werden diesem Hamlet-Prinzip des wissenschaftlichen Fortschritts noch häufiger im Buch begegnen. Das Besondere an ihm ist, dass es nahezu nichts mit der fiktiven Logik der Forschung zu tun hat, an der viele Wissenschaftstheoretiker bis heute festhalten.

Tatsächlich und zu unserem Glück kennt die Forschung Methoden und hält sich auch an diese, um nachvollziehbar argumentieren zu können. Gerade deshalb bedurfte es eines Akts der Verzweiflung, um die Quantensprünge überhaupt einzuführen, und es war der zwar große, aber stets bescheiden bleibende Max Planck, der ihn ziemlich pünktlich zum Beginn des 20. Jahrhunderts vollziehen konnte bzw. musste. Wenn ihn damals jemand gefragt hätte, ob ihm seine Theorie gefalle, hätte er sicher mit Nein geantwortet und hinzufügen können, »aber einer musste sie aufstellen«.

Planck wurde unfreiwillig auf den Weg zum Quantensprung geführt, als er versuchte, mit einem scheinbar schlichten Problem seiner Wissenschaft, der Physik, fertig zu werden. Es ging ihm um das Licht, das ein (möglichst schwarzer) Körper allein deshalb aussendet, weil ihm Wärme zugeführt wird. Ein Stück Eisen etwa, das in einem Ofen erhitzt wird, glüht erst rot, dann gelb und weiß, bevor es schmilzt, und die Aufgabe, die sich Planck gestellt hatte,

klang harmlos genug. Er wollte herausfinden, wie die Farbe von der Temperatur abhängt – und vielleicht auch ableiten, welche Intensität das dazugehörige Licht aufweist. Er hoffte, dabei einen allgemeinen, universalen Zusammenhang zwischen dem Licht (genauer: seiner Farbe) und der Wärme entdecken zu können.

Nach langen und vergeblichen Mühen stellte Planck fest, dass er auf diese Fragestellung nur dann eine quantitativ zutreffende Antwort geben konnte, die mit den immer genauer werdenden Messungen vieler Physiker übereinstimmte und somit den Tatsachen bzw. den Phänomenen gerecht wurde, wenn er Folgendes annahm: Ein schwarzer Körper sendet dadurch Licht aus, dass seine Atome Quantensprünge ausführen. In diesem Fall kann das Licht in Form von un stetigen – manchmal sagt man auch diskontinuierlichen oder diskreten – Einheiten in Erscheinung treten, deren Existenz von den Messungen nahegelegt wurde. Diese für sich in Erscheinung tretenden und isoliert wirkenden Einheiten kann man als Lichtatome bezeichnen und sich als eigenständige Pakete vorstellen. Planck bezeichnete sie in seiner Fachsprache als Quanten, weil er noch Lateinisch konnte. Eine »quantitas« bezeichnet folglich eine Menge, für die man auch »quantus« sagen kann, woraus dann das Wort »quantum« entsteht, das ausdrückt, wie viel in einer Menge ist, wie viele Quanten also im Licht zu finden sind.

Ihre Quanten wirken und entstehen, wenn Atome von einem Zustand in einen anderen wechseln, was nur geht, wenn sie plötzlich springen. Bei diesen Quantensprüngen geben sie Energie ab, nämlich in Form von Licht, und genau dies konnte Planck berechnen, und zwar mit höchster Präzision. Wie sich zeigte, erklärte sich so die Intensität des Lichts und seiner Farben, die man seit dem 19. Jahrhundert mit großem Aufwand vermessen hatte, ohne bislang in der

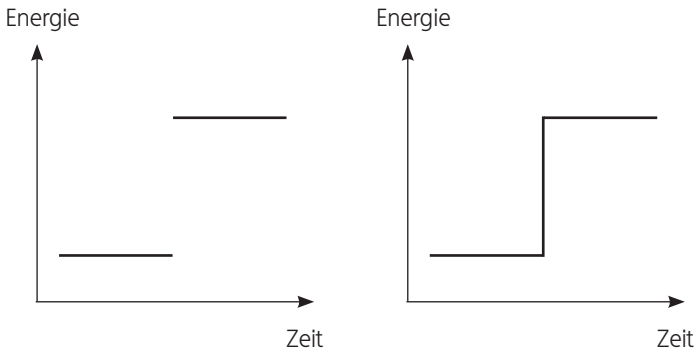
Lage zu sein, sie zufriedenstellend deuten zu können. Jetzt endlich war Planck dem bunten Leuchten der schwarzen Körper mit den geheimnisvollen Quantensprüngen auf die Spur gekommen, und dafür hat man ihn 1918 mit dem Nobelpreis für sein Fach ausgezeichnet.

Die Löcher in der Welt

Atome also können springen und dabei leuchten. Wenn man das so unvermittelt hört, versteht man nicht, was daran bemerkenswert oder gar schockierend sein soll. Viele Dinge können springen oder hüpfen: Mücken im Gras, Menschen in die Luft und über einen Graben, Schachfiguren auf ein anderes Feld und vieles mehr. Warum regt man sich dann über die Sprünge von Atomen auf? Die Antwort steckt in dem, was bei der diskreten Bewegung selbst zwischen den Zuständen passiert, zwischen denen gewechselt wird.

Ein Kind, das von einer Mauer auf eine Wiese hüpfet, befindet sich zwischendurch im freien Fall, und zwar für alle sichtbar. In jedem Augenblick lässt sich erkennen, wo und wie sich das Kind befindet, und diese Tatsache drückt man durch das Wort »stetig« aus. Das Kind ändert seine Position beim Sprung von der Mauer somit ständig und stetig (und zwar schön nach der Gesetzen der Physik). Wenn man eine Zeichnung von dem Aufenthaltsort des Kindes während des Sprungs machen würde, bräuchte man den Bleistift nicht abzusetzen und könnte eine durchgehende Linie zu Papier bringen.

Genau das geht bei Atomen nicht mehr, die bekanntlich aus einem Kern bestehen, den Elektronen wolkenartig umhüllen. Wenn Atome Quantensprünge ausführen, bewegen sich zunächst deren Elektronen. Diese nehmen Energie auf



Bei einem Quantensprung muss man den Stift absetzen, wenn man ihn zeichnen will (links). Klassische Sprünge kann man als Strich zeichnen (rechts).

oder geben sie ab, und zwar unstetig. Das heißt: Wenn diese elementaren Bausteine »schwuppdiwupp und mit Elan auf die nächste Quantenbahn« hopsen, dann wissen wir nur, wo sie sich vor dem Absprung befanden und wo sie nach der Landung angekommen sind. Ihr Springen selbst jedoch scheint es nicht zu geben. Atome bzw. ihre Elektronen können sich zwar in verschiedenen und getrennten Zuständen befinden, aber zwischen diesen Wirklichkeiten gibt es keine weitere Möglichkeit. Da klafft eine Lücke in der Natur, und die bleibt immer leer. Es gibt für Atome kein Dazwischen. Die Natur gesteht ihnen keinen kontinuierlichen Wandel – dadurch bedingt, dass sie *durchgängig* existieren – zu, und bei diesem Verbot bleibt sie unerbittlich. Sie verhält sich so aus gutem Grund, wie wir später noch sehen werden.

Anschaulich formuliert: Wer den Aufenthaltsort von atomaren Bausteinen zeichnen möchte, wenn sie einen Quantensprung ausführen, muss den Bleistift absetzen und eine durchbrochene – diskrete, lückenhafte, unstetige – Linie zu Papier bringen. Zwischen dem Ausgangspunkt und dem

Endpunkt von Quantensprüngen klaffen Leerstellen, und es waren diese Löcher, deren Existenz Planck und seine Kollegen bis ins Mark erschüttert und erschrocken hat. Mit ihrem Vorhandensein konnte doch der schöne und beruhigende Satz nicht mehr stimmen, mit dem der Philosoph Leibniz rund zweihundert Jahre zuvor die ideale Überzeugung aller Forscher seit der Antike ausgesprochen und zusammengefasst hatte, als er – in lateinischer Sprache, wie es sich damals gehörte – festlegte, dass die Natur keine Sprünge macht: »Natura non facit saltus«. Und niemand hat vor Planck auch nur einen Moment an die Möglichkeit gedacht, dass an dieser Stelle eine andere Ansicht zutreffen und Vorrang haben könnte.

Ein Ganzes ohne Teile

Heute wissen wir: Die Natur macht die Sprünge aber doch, und das Merkwürdige ist, dass wir ihr dafür dankbar sein sollten, ebenso wie den mutigen Forschern, die das Unstete der Natur entdeckt und erschlossen haben. Wie nämlich der Verlauf der Geschichte zutage gebracht hat und wie in diesem Buch erzählt wird, zeigen die kleinen Quantensprünge eine wahrlich große Wirkung mit enormer Bedeutung. So paradox es auch klingen mag, es sind gerade die sich als Quantensprünge bemerkbar machenden Löcher der Wirklichkeit, die dafür sorgen, dass die Welt erstens stabil bleibt und zweitens ein Ganzes ist, zu dem wir selbst auch gehören. Wir können beide Behauptungen beweisen bzw. verstehen und wollen dies in diesem Buch Schritt für Schritt – von einer Stufe der Hintertreppe zur nächsten – unternehmen.

Mit den Quantensprüngen erweist sich die uns zugängliche Welt als eine Einheit, die gar nicht aus den Teilen be-

steht, obwohl wir dauernd von diesen reden. Das heißt, natürlich lassen sich da draußen Einzelteile identifizieren – Atome, Elektronen, Moleküle und viele andere –, und wir können ihnen passende Namen geben und uns damit über sie verständigen. Aber wenn wir diese Benennungen aussprechen, dürfen wir nicht denken, dass wir die dabei sprachlich anvisierten Dinge faktisch vom Rest der Welt getrennt haben. Ein Elektron gehört stets in einen Zusammenhang, und selbst das Wort »Elektron« gehört in einen Kontext und bekommt nur da seine Bedeutung. Das bleibt auch dann so, wenn ich die unvermeidliche Einbettung nicht direkt anspreche, wenn sie ausgeblendet oder übergangen wird, was deshalb leicht passiert, weil uns die Sprache dazu verführt. Mit ihren isoliert stehenden oder getrennt aussprechbaren Wörtern entsteht der Eindruck, dass sich die bezeichneten Teile ebenso separiert betrachten lassen wie Wörter. Doch das geht nicht und bringt nichts, wie uns die Quantensprünge verdeutlichen, die zwar selbst nichts zu sein scheinen, dafür aber alles in Beziehung setzen und zusammenhalten.

Die Welt und jedes Ich – beide gehören zusammen und bleiben untrennbar. Die Quantensprünge zeigen es, wenn wir uns auf sie einlassen. Und wir können dies beruhigt tun. Der ursprüngliche Schrecken der Entdecker ist längst einem staunenden Stolz der Anwender gewichen. Die folgenden Geschichten wollen helfen, daran teilhaben zu können. Wenn der Aufstieg über die hier angebotene Hintertreppe gelingt, könnte man riskieren, von einem Quantensprung im öffentlichen Verstehen von Wissenschaft zu sprechen – aber nur dann, wenn man weiß, wie anders er in der Wirklichkeit abläuft.