

Einstein und die Quantentheorie

Heinz-Jürgen Schmidt, Universität Osnabrück

Vorbemerkung

Aus Zeitgründen verzichte ich auf Literaturangaben. Die benutzten Quellen sind allgemein bekannt und zugänglich. Eine erweiterte Fassung dieses Textes mit Literaturangaben wird unter <http://www.physik.uos.de/einstein/> bereitgestellt.

Einleitung

Die Person Einsteins wird vorwiegend mit der Entwicklung der beiden Relativitätstheorien assoziiert. Vielleicht nimmt man noch zur Kenntnis, dass er sich zeitweise auch mit Fragen der Quantentheorie befasst hat, zunächst kreativ, dann eher kritisch, neigt aber dazu, diese Beschäftigung auf das Konto seiner Vielseitigkeit zu buchen. Als Kuriosum gilt die Begründung für die Verleihung des Nobelpreises 1921, den er nicht etwa für die Relativitätstheorien erhalten hat, sondern "für (...) seine Entdeckung des photoelektrischen Effekts".

Tatsächlich aber spielte die Quantentheorie in Einsteins wissenschaftlichen Leben eine größere Rolle als landläufig vermutet. Überspitzt könnte man sagen, dass die Quantentheorie Einsteins Leitmotiv und zentrale Fragestellung für über fünf Jahrzehnte seines Lebens war, unterbrochen nur durch einige Jahre Arbeit am Nebenschauplatz Relativitätstheorie.

Ich will versuchen, diese Behauptung durch eine physikhistorische Skizze der Auseinandersetzung Einsteins mit der Quantentheorie zu belegen. Man kann drei Phasen dieser Auseinandersetzung unterscheiden.

1. Phase (1905-1926): Einstein und die frühe Quantentheorie

Die Väter der frühen Quantentheorie (1900-1926) waren Planck, Einstein und Bohr. Während Planck sich mit den Ergebnissen seiner Vaterschaft nie richtig anfreunden konnte, war Einstein die treibende Kraft bei der Entwicklung des Konzepts der Lichtquanten oder Photonen, der Statistik von Quantengasen und der Vorläufer der Wellenmechanik. Die erste Arbeit im "annus mirabilis" 1905 mit dem Titel "Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt" enthielt die revolutionäre Lichtquantenhypothese, die mit den Maxwell'schen Gleichungen der klassischen Physik offenbar nicht verträglich war. Diese Lichtquantenhypothese wurde lange Zeit angezweifelt, unter anderem von Planck und Bohr, und erst auf Grund der Entdeckung des Compton-Effekts 1923 allgemein akzeptiert. Einstein nutzte einerseits seinen wachsenden Einfluss in der scientific community, um neue Ansätze zur Quantentheorie von damals unbekanntem Physikern wie Bose oder de Broglie zu unterstützen und publik zu machen. Andererseits trieb er die Entwicklung mit eigenen Beiträgen voran, die sich in heute üblichen Fachbegriffen wie "Bose-Einstein-Statistik", "Bose-Einstein-Kondensation" oder "Einstein-Koeffizienten" für die Emission und Absorption von Strahlung niedergeschlagen haben.

Die frühe Quantentheorie umfasste verschiedene Ideen und Ansätze ohne jedoch ein umfassendes Theoriegebäude zu liefern. Einsteins Versuche zur Formulierung einer echten Quantentheorie kreisten bereits in dieser ersten Phase um die Idee einer

einheitlichen Feldtheorie. Sie sollte nicht nur Gravitation und elektromagnetische Wechselwirkungen verschmelzen sondern auch, etwa durch Überbestimmung der Feldgleichungen, das Rätsel der Quantelung lösen. Einstein führte diese Versuche in unterschiedlichen Variationen trotz permanenter Fehlschläge bis zu seinem Lebensende fort.

2. Phase (1926-1935): Kritik der Quanten-Vernunft

In den Jahren 1925/26 entstand schließlich die langgesuchte Theorie, die heute als "Quantenmechanik" bekannt ist. Sie trat in zwei disparaten, aber äquivalenten, Theorievarianten auf: Einerseits gab es die Göttinger "Matrizenmechanik" von Heisenberg, Born, Jordan und Pauli und andererseits die "Wellenmechanik" von Schrödinger. Diracs Beiträge gehören stilistisch zur Göttinger Variante. Die Wellenmechanik entsprach eher dem Zeitgeschmack der Physiker als die abstrakte und ungewohnte Matrizenmechanik und wurde mit Begeisterung begrüßt, auch von Einstein.

Für ihn war offenbar auch wichtig, dass zunächst eine realistische Deutung der Wellenfunktion möglich schien, die auch Schrödinger selbst lebenslang verfochten hat. Kurze Zeit später wurde die mathematische Äquivalenz beider Varianten (von Schrödinger) bewiesen und es setzte sich die Born'sche Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion durch.

Parallel zum empirischen Siegeszug der neuen Quantenmechanik begann ein Kampf um die Deutung der Theorie. Die Kopenhagener Interpretation, durch Stichworte wie irreduzible Wahrscheinlichkeitsaussagen, Unschärferelation, Komplementarität und unverzichtbare Rolle der Messanordnung umschrieben, implizierte eine Abkehr von überkommenen Theorie-Idealen wie Kausalität und eine objektive und lokale Beschreibung der physikalischen Realität. Einstein lehnte aus diesem Grunde die "Heisenberg-Bohr'sche Beruhigungsphilosophie" strikt ab ohne allerdings die empirischen Erfolge der Quantenmechanik in Frage zu stellen. Eine gewisse Publizität erlangte die Auseinandersetzung als Einstein-Bohr-Debatte auf den Solvay-Konferenzen 1927 und 1930. Der sportliche Aspekt dieser Debatte zeigte sich in wiederholten Versuchen Einsteins, die Unschärferelation durch raffinierte Versuchsanordnungen zu überlisten, gefolgt von der prompten Widerlegung durch Bohr am nächsten Morgen.

Den Höhe- und Endpunkt dieser Wettkämpfe bildete 1930 ein Gedankenexperiment Einsteins, in dem ein Photon zu einem definierten Zeitpunkt aus einem Kasten tritt, dessen Energie durch eine Wägung des Kastens gemäß $E=mc^2$ genau bestimmt werden kann. Dies wäre eine Verletzung der Energie-Zeit-Unschärferelation. Die Bohr'sche Widerlegung am nächsten Morgen basierte auf der Zeitunschärfe der Uhr im Kasten auf Grund seiner Ortsunschärfe in Verbindung mit der allgemeinen Relativitätstheorie. Derart mit seinen eigenen Waffen geschlagen, gab Einstein weitere Versuche auf, die Unschärferelation durch Gedankenexperimente ad absurdum zu führen, jedoch nicht seine grundsätzliche Opposition zur Quantentheorie. Im Nachhinein betrachtet, erscheinen diese Versuche auch, wenn man so sagen darf, unter Einsteins Niveau zu liegen: So einfach läßt sich die Quantenmechanik nicht aushebeln.

Zwei Nebenbemerkungen, die die historische Exkursion unterbrechen: Erstens fällt auf, dass die Gedankenexperimente und ihre Widerlegung im Grunde keine Quantenmechanik benutzen, sondern innerhalb der klassischen Theorien mit zusätzlichen Unschärfe-Postulaten funktionieren. Vermutlich handelt es sich um eine Eigenschaft der klassischen Theorien, die als Verträglichkeitsbedingung mit den zu Grunde liegenden Quantentheorien erscheint, aber meines Wissens noch nicht analysiert worden ist. Zweitens ist es im Hinblick auf die bis heute ungeklärte Beziehung zwischen

Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie bemerkenswert, dass die allgemeine Relativitätstheorie oder zumindest Konsequenzen der allgemeinen Relativitätstheorie gebraucht werden, um die Quantentheorie gegen Einwände zu verteidigen. Wenn Einstein die allgemeine Relativitätstheorie nicht bereits aufgestellt hätte, hätte Bohr sie entdecken müssen, um Einsteins Einwand gegen die Quantentheorie zu entkräften?

Die Niederlagen auf den Solvay-Konferenzen änderten nichts an der grundsätzlich kritischen Einstellung Einsteins zur Quantentheorie. Seine nächste Attacke, die in der Fachwelt einiges Aufsehen erregte, war der Physical-Review-Artikel von 1935, der das später nach den Autoren so benannte E(instein) P(odolski) R(osen)-Paradox enthielt. Dieser Aufsatz wurde von den Vertretern der Kopenhagener Deutung zwar ernst genommen und von Bohr ausführlich beantwortet, aber in seiner grundsätzlichen Bedeutung von der Fachwelt erst später, etwa ab 1966, gewürdigt. Das EPR-Paradox beruht auf gewissen Zuständen, die gemäß der Quantentheorie möglich sind und nach Schrödinger "verschränkte Zustände" genannt werden. Sie besitzen als Überlagerungen von Produktzuständen keine Entsprechung in klassischen Theorien und sind daher einigermaßen unanschaulich. Die von EPR betrachteten Zustände zeigen darüber hinaus hohe (Anti-)Korrelationen zwischen räumlich beliebig weit entfernten Messungen.

Solche Korrelationen sind an sich nicht paradox; auch die Reaktionen der Fernseh Zuschauer eines Fußballspiels in zwei räumlich entfernten Ländern kann hohe Anti-Korrelationen aufweisen. Allerdings sind die EPR-Korrelationen höher als es lokal realistische Theorien erlauben, sie verletzen nämlich die Bell'schen Ungleichungen (1966). Seit den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts ist das EPR-Gedankenexperiment in vielfältiger Weise technisch realisiert worden, wobei stets eine Verletzung der Bell'schen Ungleichungen und eine Bestätigung der quantentheoretischen Korrelationen beobachtet wurde.

Dieser Aspekt war für Einstein und seine Mitautoren aber nicht maßgeblich, zumal sie die Bell'schen Ungleichungen noch nicht kannten. Sie betonten vielmehr den paradoxen Effekt, dass das Ergebnis einer lokalen Messung von der Versuchsanordnung und vom Ergebnis einer weit entfernten Messung festgelegt wird, ohne dass die Quantentheorie dies adäquat beschreiben kann. "Adäquat" im Sinne von EPR wäre eine Beschreibung in Form von lokalen, realistischen Theorien. Der Versuch, die Wellenfunktion selbst als lokale Beschreibung von individuellen Zuständen zu verwenden, führt zu einer plötzlichen Veränderung der Wellenfunktion in Abhängigkeit vom Ergebnis der entfernten Messung, die Einstein "spukhafte Fernwirkung" nannte. Schon die Frage, wann diese plötzliche Veränderung eintritt, kann nicht im Einklang mit dem relativistischen Zeitbegriff beantwortet werden.

Der EPR-Aufsatz wurde von Podolski formuliert und entsprach in seiner publizierten Fassung nicht völlig Einsteins Geschmack. Er selbst ist in Aufsätzen und Briefen wiederholt auf das EPR-Paradox zurückgekommen und hat dabei die Akzente etwas anders gesetzt als in dem EPR-Aufsatz. Das Paradox zeigt nach Einsteins Meinung, dass die Wellenfunktion nicht das Einzelsystem beschreibt, sondern dass sie der statistischen Gesamtheit (dem "Ensemble") zugeordnet werden muss. In der Ensemble-Interpretation verschwinden die spukhaften Fernwirkungen, allerdings verzichtet die Quantentheorie in dieser Interpretation auf die Beschreibung des Einzel Experiments, nach Einstein ein Ausdruck ihrer Unvollständigkeit. Zumindest dieser Aspekt der Einsteinschen Position wird auch heute von einer Fraktion der Quantenphysiker (z.B. Ludwig oder Ballentine) vertreten.

3. Phase (1935-1955): Der einsame Kritiker

Die Haltung Einsteins zur Quantentheorie blieb nach dem EPR-Aufsatz bis zu seinem Lebensende unverändert, sieht man von einzelnen resignativen Äußerungen ab. Er arbeitete weiter erfolglos an verschiedenen Ansätzen zur vereinheitlichten Feldtheorie, die, wie gesagt, immer auch als alternative Quantentheorie gedacht waren. Anders als in der zweiten Periode von 1926-35 wurde aber seine Position von der Fachwelt weitgehend ignoriert. Natürlich war Einstein nicht völlig isoliert. Er sprach mit Besuchern über Fragen der Quantentheorie und führte Korrespondenz.

In einem Briefwechsel mit Born von 1953-54 geht es um die Beziehung der Quantentheorie zur makroskopischen Physik am Beispiel der Bewegung eines makroskopischen Körpers zwischen zwei reflektierenden Wänden. In dieser Diskussion reden (oder schreiben) Einstein und Born zunächst aneinander vorbei. Born führt aus, dass die beobachtete Bewegung auch im Rahmen der Quantentheorie durch eine langsam zerfließendes Wellenpaket beschrieben werden kann. Dies ist korrekt, geht aber völlig an dem Anliegen von Einstein vorbei. Erst als Pauli sich einschaltet und bei einem Besuch in Princeton mit Einstein diskutiert, klären sich die Positionen. Es bleibt der Dissens über die Frage, ob jede Lösung der Schrödinger-Gleichung im Prinzip einer möglichen Bewegung des makroskopischen Körpers entspricht. Pauli muss dies postulieren, um dem Einwand der Unvollständigkeit der Quantentheorie zu entgehen; Einstein bezweifelt es. Auch in dieser Debatte dürfte heute Einstein einige Physiker auf seiner Seite haben, die mit ihm an eine Unvollständigkeit der Quantentheorie im Makroskopischen glauben. In den letzten beiden Jahrzehnten seines Lebens sah es allerdings so aus, als sei die Zeit über Einstein hinweggegangen. Dabei spielte es auch eine Rolle, dass die allgemeine Relativitätstheorie nur noch von einer kleinen Minderheit der Physiker weiterentwickelt wurde, während sich die Mehrheit den Konsequenzen der Quantentheorie in der Kern- und Festkörperphysik zuwandte, ohne allzuviel Zeit in grundsätzliche Fragen ihrer Interpretation zu investieren. Das Projekt einer Gravitation und Elektrodynamik vereinigenden Feldtheorie wirkte angesichts der neu entdeckten Kernkräfte (starke und schwache Wechselwirkung) obsolet.

Erst nach seinem Tode erlebten die Grundlagenfragen der Quantentheorie eine Renaissance. Dies führte zu einer verspäteten Würdigung der Einstein'schen Positionen. Einstein gilt heute in zunehmendem Maße nicht mehr als unverbesserlicher Querulant, sondern als jemand, der die Quantentheorie nicht akzeptieren wollte, weil er ihre radikalen Konsequenzen klarer gesehen hat als mancher Zeitgenosse.

Diskussion

Einstein hat also die frühe Quantentheorie wesentlich gefördert, aber die Quantenmechanik in der Form von 1926 hartnäckig und lebenslang kritisiert. Dabei hat er den empirischen Gehalt der Theorie nie angezweifelt, sondern nur ihre Vollständigkeit in Frage gestellt und die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik, die ihre Vollständigkeit implizierte, bekämpft. Einstein wollte nicht akzeptieren, dass die Kopenhagener Deutung in programmatischer Weise auf Eigenschaften von Theorien verzichtete, die von den bisherigen klassischen Theorien erfüllt waren und die Einstein weiterhin für wünschenswert hielt: Kausalität, realistische Interpretation, Objektivität, Lokalität. Dabei bleibt es etwas unklar, ob Kausalität im Einstein'schen Sinne auch Determinismus einschließt. Einerseits kennen wir von Einstein apodiktische Ablehnungen des Wahrscheinlichkeitsbegriffes für fundamentale Theorien ("Der Alte würfeln nicht"), andererseits gibt es nach Aussagen von Pauli beim späten Einstein vorsichtige Abgrenzungen vom Determinismus.

Wie man die Einstein'schen Positionen heute einschätzt, hängt auch davon ab, ob man die

Vertreibung aus dem Paradies der klassischen Theorien für endgültig hält. Ich plädiere dafür, bei der Beurteilung der Haltung Einsteins zur Quantentheorie eine gewisse Behutsamkeit zu üben. Sollte eine zukünftige Theorie, die nach der Hoffnung vieler Physiker Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie vereint und alle vier bekannten Wechselwirkungen einschließt, wieder stärker "klassische" Züge haben, würde man einige Einstein'sche Positionen mit neuen Augen sehen. Dies ist, zugegebenermaßen, reine Spekulation, solange eine solche Theorie nicht vorliegt. Die Wissenschaftsgeschichte zeigt aber, dass solche späten Rehabilitationen nicht selten sind. Oft handelt es sich dabei aber nur um "partielle Rehabilitationen". Wenn man etwa von heute aus gesehen die unterschiedlichen Raumauffassungen von Newton und Leibniz vergleicht, so kann man den Schluss ziehen, dass beide Seiten teilweise Recht hatten: Der Raum ist weder absolut, noch in dem starken Sinne von Leibniz relativ, sondern die Wahrheit liegt in der Mitte. Außer der "Wahrheit" gibt es noch die Nützlichkeit: Wahrscheinlich war Newtons Auffassung für die mittelfristige Entwicklung der Physik fruchtbarer. Aber auch diese Einschätzungen können sich im Laufe der Geschichte der Physik wieder ändern: Gewisse Interpretationen der allgemeinen Relativitätstheorie, die die Gleichberechtigung aller Koordinatensysteme betonen, scheinen auf der Leibniz'schen Linie zu liegen, während bestimmte kosmologische Modelle eine Rückkehr zum absoluten Raum nahezulegen scheinen.

Damit soll nicht einem schrankenlosen historischen Relativismus das Wort geredet werden. Physikalische Theorien haben einen empirischen Kern und eine, etwas polemisch formuliert, "ideologische Hülle". Die Grenze zwischen beiden ist nicht immer klar. Viele Missverständnisse rühren von der fehlenden Unterscheidung von Kern und Hülle her. Zum Beispiel nimmt der empirische Gehalt der physikalischen Theorien ständig zu, während der ideologische Überbau von verschiedenen Faktoren, zum Beispiel geistigen Strömungen geprägt wird. Hier kann man kaum von "Fortschritt" reden, sondern eher von einer Pendelbewegung. Die Einstein-Bohr-Debatte betraf die ideologische Hülle, nicht den empirischen Kern. Deshalb ist ihr Ausgang keine Frage der Logik sondern des Zeitgeistes.