

## Zu den neueren Entwicklungen der Quantentheorie

EIKE-CHRISTIAN HARDEN

Die Entwicklung der Quantentheorie lässt sich grob in mehrere Phasen einteilen. Die erste umfasste die „alten Quantentheorien“ bis zur Einführung der Matrizenmechanik durch Werner Heisenberg (1901-1976) 1925. Die anschließende zweite Phase, in der auch die anderen grundlegenden Formulierungen der Quantenmechanik [QM] (Schrödinger, Dirac, de Broglie) auftraten, erreichte ihren Höhepunkt mit der Veröffentlichung des mathematischen Formalismus durch John von Neumann (1903-1957, in: *„Die mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik“*, 1932).

Schon von Neumann hatte ein Argument entwickelt, das zeigen sollte, warum es keine weiteren als die der QM zugänglichen Informationen über mikroskopische Systeme geben könne und dass es daher nicht möglich sei, die QM durch Einführung weiterer („verborgener“) Parameter zu vervollständigen. Die Wirkung dieses Arguments schildert der Wissenschaftshistoriker Paul Feyerabend (1924-1994) so: *„In den Dreißigerjahren gab es zwei Interpretationen der Quantentheorie (neben vielen anderen Variationen). In der ersten Interpretation [der etwa Einstein anhing, wie wir gleich sehen werden; E. H.] war die Quantentheorie eine statistische Theorie, wie auch die klassische Statistische Mechanik, und die Unbestimmtheit ihrer Aussagen, die in der Unbestimmtheitsrelation formuliert ist, wurde als eine Unbestimmtheit unserer Kenntnisse und nicht der Natur selbst aufgefaßt: die Natur hat wohlbestimmte Züge, aber wir kennen diese Züge nur in gewissem Ausmaß. In der zweiten Interpretation war die Unbestimmtheit eine Unbestimmtheit der Natur selbst: Zustände, die genauer sind, als die Unbestimmtheitsrelation, gibt es nicht. Die zweite Interpretation wurde von Bohr mit einer Reihe von qualitativen Argumenten verteidigt. Außerdem gab es einen komplizierten Beweis, der angeblich zeigte, daß die Quantentheorie der ersten Interpretation widersprach. Auf Konferenzen über die Grundlagen der Quantentheorie in den Fünfzigerjahren nahm die Diskussion gewöhnlich den folgenden Verlauf. Zuerst erklärten die ‚Orthodoxen‘, das heißt die Verteidiger der zweiten Interpretation ihre Ideen. Dann kamen Einwände. Die Einwände waren zumeist philosophischer Natur. Sie bestanden in dem Nachweis, daß die in der Diskussion erwähnten Experimente ‚im Prinzip‘ eine andere Deutung zulassen. Das konnten die Anhänger Bohrs nicht bestreiten, denn sie diskutierten nicht logische Prinzipien, sondern physikalische Probleme. An dieser Stelle hörte man dann oft den Hinweis: ‚aber von Neumann hat gezeigt...‘ – und das entschied den Fall, denn es gab damals kaum jemanden, der von Neumanns Beweis im Detail kannte, oder der es gewagt hätte, der Autorität von Neumanns zu widersprechen: ein autoritäres Gerücht entschied eine wissenschaftliche Diskussion.“<sup>1</sup>*

Feyerabend kritisiert die Angewohnheit, einen Beweis zu zitieren, ohne genaue Kenntnis des Bewiesenen. Den entscheidenden Hinweis auf die Kraft des bloßen Namens gibt Feyerabend aber in der nun folgenden Fußnote: *„Von Neumann hat natürlich Recht gehabt (von Einzelheiten abgesehen). [...]“* Damit verfehlt Feyerabend den wichtigsten Gesichtspunkt. Der von

---

<sup>1</sup> Feyerabend, Paul: *„Erkenntnis für freie Menschen“*, S. 173-4.

Neumannsche Beweis war formalmathematisch korrekt und bewies, was er beweisen wollte, nur schloss er eben nicht verborgene Parameter aus, sondern nur verborgene Parameter, die sich wie Observablen verhielten. Wir werden später noch darauf zurückkommen.

Zur weiteren Klärung der Angriffe gegen die „Orthodoxie der QM“<sup>2</sup> führe ich die grundlegenden Postulate der QM an, auf die ich mich hier beziehen möchte:

(RS) Die physikalisch möglichen Zustände eines Systems  $S$  werden durch Einheitsvektoren in einem Hilbertraum dargestellt. Der physikalische Zustand zu einer Zeit ist dann ein einziger Vektor im Hilbertraum.

(RP) Zu jeder beobachtbaren physikalischen Eigenschaft  $O$  von  $S$  gibt es einen Operator  $P$  (Projektionsoperator), der auf die Zustandsvektoren wirkt und die entsprechende Eigenschaft darstellt.

(EE)  $S$  hat genau dann die Eigenschaft  $O$ , wenn  $PS=S$  ( $S$  sei derjenige Vektor im Hilbertraum, der den Zustand von  $S$  darstellt). Wir nennen  $S$  einen Eigenzustand von  $P$  mit Eigenwert 1.  $S$  hat genau dann die Eigenschaft  $O$  nicht, wenn  $PS=0$ .

(D1) Solange keine Messung durchgeführt ist, entwickelt sich  $S$  gemäß der linearen, deterministischen Dynamik, die nur von den energetischen Eigenschaften abhängt.

(D2) Sobald eine Messung durchgeführt wird, springt  $S$  sofort und zufälligerweise in einen Zustand, in dem es die gemessene Eigenschaft entweder hat oder nicht. Die Wahrscheinlichkeit für diese beiden möglichen Zustände nach der Messung ist von den Anfangsbedingungen bestimmt; es ist nämlich die Wahrscheinlichkeit bei der Messung einen Zustand anzunehmen gleich dem Quadrat der Norm der Projektion des Anfangs- auf den Endzustand.

Das Postulat (D2) wird oft Projektions- oder Kollapspostulat genannt. Auf dieses – und (EE) – zielen nahezu alle Angriffe gegen die Orthodoxie ab. Dennoch sei auch darauf hingewiesen, dass keineswegs klar ist, dass (RS) und (RP) die günstigste Beschreibung der Quantenwelt liefern. Vielleicht könnte man besser als mit Operatoren argumentieren, wenn man etwa auf Eichsymmetrien zurückgriffe...

Ich werde mich im folgenden auf die Entwicklungen nach 1932 beschränken und kurz auf sie eingehen. Dabei werde ich weitgehend auf mathematische Betrachtungen verzichten. Zentral in der Argumentation ist der Versuch Albert Einsteins (1879-1955) und seiner Assistenten am *Institute for Advanced Studies* in Princeton, Boris Podolsky (1896-1966) und Nathan

---

<sup>2</sup> Damit ist das Konglomerat aus Kopenhagener Deutungen (s.u.) und von Neumanns Formalismus gemeint. Man muss die Orthodoxie der QM von der QM selbst deutlich trennen: Die Orthodoxie liefert lediglich die ausgereiftesten Mittel, mit der QM umzugehen und sie zu deuten. Es gibt überdies nicht eine klar definierte Kopenhagener Deutung, sondern leicht differierende etwa von Bohr oder Heisenberg, die aber alle auf den Unsicherheitsrelationen und dem Komplementaritätsprinzip, der Wahrscheinlichkeitsdeutung der Wellenfunktion und dem Projektionspostulat beruhen – und daher auch alle den Gedanken ablehnen, man könne einer Observablen ohne Messung einen wohldefinierten Wert zuweisen; dazu müssten zusätzliche – nicht beobachtbare und daher „verborgene“ – Variablen (oft wird von Parametern gesprochen) eingeführt werden.

Rosen<sup>3</sup> (1909-1995), die Unvollständigkeit der quantenmechanischen Beschreibung der Welt aufzuzeigen. Nachdem bis in die Fünfzigerjahre hinein die Macht der Orthodoxie ungebrochen erscheint, werde ich die Darstellung mit David Bohms Arbeiten über eine Deutung mit verborgenen Parametern wieder aufnehmen, bevor ich auf John Bells, Simon Kochens und Ernst Speckers Attacken gegen den von Neumannschen Beweis eingehe. Zum Abschluss werde ich noch einige neuere Deutungen anführen und kurz erläutern, die in den Neunzigerjahren und bis heute intensiv diskutiert werden.

## Das Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon

Einstein störte an der orthodoxen QM deren Irrealismus und Indeterminismus; er glaubte dementsprechend, dass die Quantenzustände auch ohne Messung festlägen und dass die statistischen Eigenschaften einer Unzulänglichkeit der menschlichen Erkenntnis entsprängen. Diese Annahmen ließen ihn an der Vollständigkeit der QM zweifeln.

Dieses Anliegen diskutierte Einstein mit Podolsky und Rosen und entwickelte ein Gedankenexperiment weiter, das er auf der Solvay-Konferenz von 1930 zuerst vorgestellt hatte (es war damals von Bohr widerlegt worden, das Bild links unten zeigt den dazugehörigen Apparat in Bohrs pseudorealistischer Darstellung). In diesen Diskussionen entstand das Argument, das nach den Anfangsbuchstaben der Familiennamen seiner Urheber EPR-Argument genannt wird. Den Text der Veröffentlichung, „*Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*“, schrieb aus Gründen der Sprachkenntnis Podolsky, nicht Einstein.

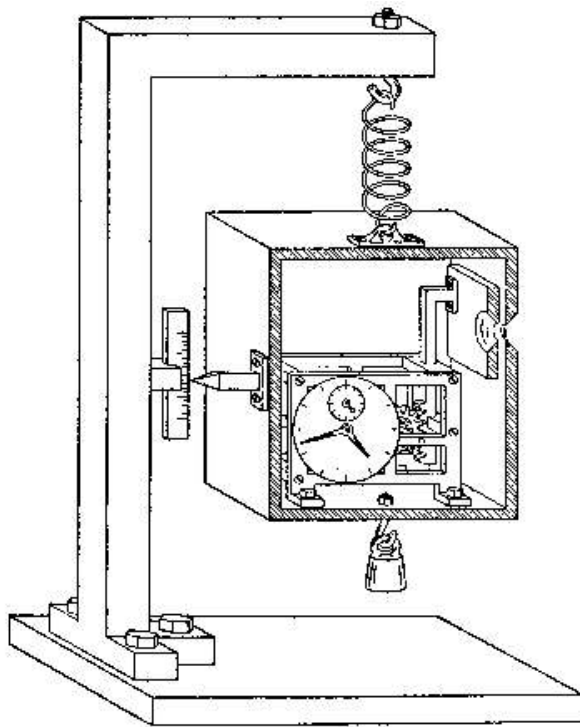


Abb. 1: Eine 1930 von Einstein zur gleichzeitigen Messung von Zeit und Energie (komplementären Größen) vorgeschlagener Apparat.

Da Einstein den Text vor der Drucklegung nicht genau gelesen hatte, fand er seine eigene Ansicht darin nicht wieder und legte dies in seinem Briefwechsel mit Erwin Schrödinger (1887-1961) dar. Niels Bohrs (1885-1962) Antwort auf das EPR-Argument (mit dem gleichen Titel „*Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*“ in der gleichen Zeitschrift *Physical Review* eine Ausgabe später erschienen) liefert eine dritte, wiederum etwas andere Formulierung des Arguments.

<sup>3</sup> Rosen war Einsteins Assistent von 1935-45 und ging dann auf dessen Rat nach Haifa. Noch bekannter als für das EPR-Argument ist er für seine Mitentwicklung der Idee des Wurmlochs („Einstein-Rosen-Brücke“; in der *Science-fiction-Literatur* auch fälschlich Einstein-Rosen-Podolsky-Brücke genannt...)

Allen drei gemeinsam ist die Vorstellung zweier, miteinander verbundener quantenmechanischer Systeme (Schrödinger nennt sie „verschränkt“), so dass durch Messung etwa des Ortes eines Systems der Ort des anderen festliegt. Die Schwierigkeit bei Einstein ist nun, dass der Formalismus der QM den Systemen ohne Messung keinen festen Ort zuschreibt, sondern ihn erst durch Messung festgelegt sieht – gemäß (D2). Durch Messung an einen müsste dann nicht nur der Ort des gemessenen, sondern auch derjenige des anderen, mit dem ersten verschränkten – im allgemeinen aber beliebig weit entfernten! – System instantan festgelegt werden, was Einstein als „spukhafte Fernwirkung“<sup>4</sup> auffasste und als solche ablehnte.

Podolsky hatte zudem noch ein Realitätskriterium aufgestellt: „Wenn wir, ohne das System irgendwie zu stören, mit Sicherheit (d. h. mit Wahrscheinlichkeit 1) den Wert einer physikalischen Größe vorhersagen können, dann gibt es ein dieser Größe entsprechendes Element der Realität.“<sup>5</sup>

Bohr nimmt die Fragen nach der Realität und deren Störung sehr ernst und greift sie in seiner Antwort wieder auf – er entwirft die Vorstellung einer Störung der Information, muss dazu jedoch die Information über die Realität des Systems und deren Zukunft als Teil der Realität des Systems selbst verstehen. So kann er zwar Schwierigkeiten im Verständnis der EPR-Veröffentlichung zeigen, der spukhaften Fernwirkung entgeht er trotzdem nicht.

**Das Argument von Einstein, Podolsky und Rosen zeigt zwei Probleme der Quantentheorie auf: Erstens die Schwierigkeit, das Projektionspostulats zu verstehen und zweitens die Schwierigkeit, die Quantenphänomene zu verstehen, ohne auf Fernwirkungen zurückgreifen zu müssen.**

## **Bohmsche Mechanik und deren Bedeutung**

David Joseph Bohm (1917-1992) hat 1952 eine Deutung der QM mit verborgenen Parametern vorgeschlagen. Er war einer der Schüler Oppenheimers gewesen und hatte versucht, am Manhattan-Projekt teilzunehmen. Das Ersuchen war abgelehnt worden, da Bohm in Berkeley Kontakt zu politisch linken Kommilitonen hatte. Im Jahr 1949 wurde gegen ihn ein Prozess wegen „unamerikanischer Umtriebe“ eröffnet, in dem eben diese Beurteilungen eine Rolle spielten. Er wurde zwar rehabilitiert, fand aber keine weitere Anstellung in den Vereinigten Staaten, weshalb er zunächst nach São Paulo ging und schließlich, ab 1961, in London lehrte.

Bohms Theorie ist im Unterschied zu den Kopenhagener Auffassungen realistisch<sup>6</sup>. Diese Möglichkeit eröffnet die Hoffnung, eine lokale Theorie zu erhalten, in der immerhin noch das Reichenbachsche Prinzip der gemeinsamen Ursachen<sup>7</sup> gelten könnte, und somit das Prinzip

---

<sup>4</sup> Abner Shimony (\*1928) hat später statt von Fernwirkung (*action at a distance*), von einem Fern-Erleiden (*passion at a distance*) gesprochen.

<sup>5</sup> Einstein, Albert u. Podolsky, Boris u. Rosen, Nathan: „*Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*“. In: *Physical Review* (47), S. 777: „If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of reality corresponding to that quantity.“

<sup>6</sup> Wie wir es als Behauptung (R) in der Diskussion des Satzes von Bell (s.u.) definieren werden.

der Lichtgeschwindigkeit als maximal möglicher der Informationsübertragung<sup>8</sup> nicht gefährdet wird. Bereits EPR hatten am Ende ihrer Arbeit von 1935 geschrieben: „Obwohl wir hiermit gezeigt haben, dass die Wellenfunktion keine vollständige Beschreibung der physikalischen Wirklichkeit liefert, haben wir die Frage offen gelassen ob es eine solche Beschreibung gibt. Wir meinen, wie dem auch sei, das eine solche Theorie möglich ist.“<sup>9</sup>

Zur Schrödingergleichung tritt eine „Führungsgleichung“ hinzu, die das Verhalten eines Teilchen streng deterministisch behandelt, so dass es berechnet werden kann, wenn zu einem Zeitpunkt Ort und Impuls<sup>10</sup> des Teilchens bekannt sind: dies sind die „verborgenen Parameter“. Die Wellenfunktion wurde zu einer „Führungswelle“, in der sich – wie Bohm später glaubte – das Teilchen wie in einer Flüssigkeit<sup>11</sup> bewege. Die Vorteile dieser Theorie treten in der Erklärung des Doppelspaltexperiments klar zutage: Das Teilchen geht nur durch einen Spalt, die Welle, welche die Trajektorien der Teilchen lenkt, jedoch durch beide. Freilich ist durch die Verwendung der Schrödingergleichung die Bohmsche Mechanik in dieser einfachsten Form nicht Lorentz-invariant. Außerdem hat von Neumanns Formalismus einen Forschungsvorsprung von mehreren Jahrzehnten und ist zum Grundpfeiler vieler Überlegungen geworden, die etwa das relativistische Verhalten von Quanten betreffen, das Chaos, und auch die Quantenfeldtheorie beruht darauf. In den 1990er Jahren sind diese Fragen verstärkt angegangen worden: Es gibt inzwischen sogar Erweiterungen auf die Quantenfeldtheorie<sup>12</sup> und Ansätze zu einer Bohmschen Quantengravitation.

---

<sup>7</sup> Gern mit einem Paar Handschuhen erklärt, von denen sich zwei Personen je einen in die Tasche stecken, bevor sie sich mit hohen Geschwindigkeiten auseinanderbewegen. Wenn einer von beiden in seine Tasche blickt, liegt für ihn instantan fest, welchen sein Partner (noch in der Tasche?) hat. Die gemeinsame Ursache ist die Aufteilung des Paares, bei der beide Partner anwesend waren. Ob dieses Prinzip in EPR-ähnlichen Experimenten tatsächlich gilt, ist heute umstritten.

<sup>8</sup> Das ist eine Modifikation des Einsteinschen Prinzips der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, aus der bekanntlich innerhalb der Speziellen Relativitätstheorie folgt, dass kein massives Objekt die Lichtgeschwindigkeit erreichen kann, weil es dann unendlichen Energieinhalt hätte. Das Handschuhbeispiel (vorige Anm.) zeigt, wie der falsche Eindruck entstehen kann, Information wäre schneller als das Licht übertragen worden.

<sup>9</sup> *op. cit.*, p. 780: „While we have thus shown that the wave function does not provide a complete description of the physical reality, we left open the question of whether or not such a description exists. We believe, however, that such a theory is possible.“

<sup>10</sup> Vermutlich John Bell brachte das Argument auf, dass die Betrachtung des Ortes (und seiner komplementären Größe, des Impulses) genügt, da alle anderen Observablen durch eine Messapparatur bestimmt werden, deren Zeiger einen Ort haben müssen.

<sup>11</sup> Er nennt es freilich in den Veröffentlichungen nicht Äther.

<sup>12</sup> Man lese etwa: Dürr, Detlef u. Goldstein, Sheldon u. Tumulka, Roderich u. Zanghì, Nino: „*Bohmian Mechanics and Quantum Field Theory*“ oder dies.: „*Bell-Type Quantum Field Theories*“ [beide 2004].

# John S. Bell „On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox“

## Biographie

John Stewart Bell wurde am 28. Juni 1928 in Belfast geboren und studierte dort bis zu seiner Graduierung 1948. Er promovierte in Birmingham, arbeitete bei der *British Atomic Energy Agency*, am Harwell Laboratory und bei der *Organisation Européenne de Recherche Nucléaire* [CERN]. Er starb am 1. Oktober 1990 an einer Gehirnblutung. Seine Arbeit „On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox“ von 1964 mit den darin hergeleiteten („Bellschen“) Ungleichungen und dem entsprechenden Satz gelten als eine der wichtigsten Arbeiten der Quantentheorie.

## Der Satz von Bell

Bells „On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox“ zeigte, dass eine „lokal realistische“ Vollständigung der QM nicht möglich ist. Über die weiteren Auslegungen wird nach wie vor heftig gestritten. Was heißt „lokal realistisch“? In sprachlicher Logik formuliert bedeutet sie, dass die Vorhersagen der QM nicht mit den Bellschen Ungleichungen verträglich sind, die Bell aus zwei Prinzipien, der Lokalität (L) und dem Realismus (R) ableitete. Diese besagen:

(L) Messungen an miteinander verschränkten quantenmechanischen Systemen sind voneinander unabhängig, sodass die Messung an einem System das Messergebnis eines raumartig dazu liegenden mit ihm verschränkten System nicht beeinflusst.

(R) Die QM beschreibt die Wirklichkeit unvollständig, es gibt zusätzliche Informationen, so dass die Ergebnisse von Messungen an quantenmechanischen Systemen durch diese vorab feststehen.

Seine Untersuchung des EPR-Arguments hatte Bell zu folgendem Ergebnis gebracht: „*Es ist wichtig festzuhalten, dass [selbst] zu dem beschränkten Grad, zu dem Determinismus eine Rolle im EPR-Argument spielt, er nicht angenommen wird, sondern hergeleitet. Geheiligt wird das ‚Prinzip der lokalen Kausalität‘ – oder ‚keine Fernwirkung‘ [...] Es ist bemerkenswert schwierig, diesen [Gesichts-]Punkt klarzustellen, dass Determinismus keine Vorbedingung der Analyse ist.*“<sup>13</sup>

Die Schwierigkeit mit dem Argument entsteht nicht aus dem Vorurteil des Determinismus, sondern aus einem Widerspruch zwischen den Annahmen des EPR-Arguments in Bohms Darstellung, die zusammen zu den Bellschen Ungleichungen führen, und den Ergebnissen der Experimente.

Bell hat in derselben Arbeit auch die Schwierigkeit des von Neumannschen Arguments aufgezeigt, die wir oben diskutiert haben. Er selbst ist Anhänger der Bohmschen Theorie gewesen, und hat mit seiner Kritik an von Neumann den Weg für weitere Deutungen mit verborgenen Parametern den Weg geebnet.

---

<sup>13</sup> Bell, John S.: *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge 1987, p. 143: „*It is important to note that to the limited degree to which determinism plays a role in the EPR argument, it is not assumed but inferred. What is held sacred is the principle of ‘local causality’ – or ‘no action at a distance’... It is remarkably difficult to get this point across, that determinism is not a presupposition of the analysis.*“

Durch sog. Bell-Test-Experimente<sup>14</sup> ist gezeigt worden, dass die Bellschen Ungleichungen verletzt werden (obwohl selbst das nicht unumstritten ist) und die Vorhersagen der QM zu treffen. Demnach müssen (L) oder (R) eingeschränkt werden, so dass die Ungleichungen nicht mehr gelten. Bell meinte, gezeigt zu haben,<sup>15</sup> dass die QM selbst irreduzibel nicht-lokal ist (also (L) verletzt). Andere verwenden den Satz und die Ergebnisse jedoch, um (R) abzulehnen und mit ihr alle Ansätze, die QM durch „verborgene Parameter“ zu vervollständigen.

### **Der Satz von Kochen und Specker**

Simon Kochen (promoviert 1958 in Princeton) und Ernst Specker (promoviert 1948 an der ETH, Zürich)<sup>16</sup> haben ihre Untersuchung „The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics.“ von 1967 eine dem Bellschen ähnlichen Satz<sup>17</sup> gefunden. Der Beweis ist umständlich, aber der Kern ähnlich eindeutig: Entweder macht die QM falsche Vorhersagen oder wir müssen einen der folgenden Sätze über Bestimmtheit der möglichen Messwerte (VD) und Kontextunabhängigkeit der Messung (NC) aufgeben.

(VD) Alle quantenmechanischen Observablen haben zu jeder Zeit und an jedem Ort (und nicht nur im Augenblick und am Ort einer tatsächlich durchgeführten Messung) einen wohldefinierten Wert.

(NC) Wenn ein quantenmechanisches System wohldefinierte Werte hat, so hat es diese unabhängig vom konkreten Kontext der Messapparatur.

Wenn im Rahmen der Orthodoxie die Annahme wohldefinierter Werte ohne Messzusammenhang abgelehnt wird, so ist (VD) aufgegeben und (NC) bewahrt; der umgekehrte Weg erscheint schwer gangbar, denn dazu müsste man wohldefinierte Werte zugeben, die aber von konkreten Messungen abhängen – man müsste die Möglichkeit von Experimenten sehr kritisch sehen.

Die Wahl zwischen diesen Voraussetzungen erscheint völlig willkürlich, denn (VD) ist *per se* dem Experiment unzugänglich und auch für (NC) bestehen Zweifel, weil nicht ersichtlich ist, wie man ein exaktes Experiment durchführen sollte.

### **Deutungen der Quantenmechanik**

Die Sätze von Bell und Kochen/Specker wurden freilich oft als weitere Verschärfung des von Neumannschen Arguments gegen die verborgenen Parameter aufgefasst, weshalb solche Ansätze selten verfolgt wurden. Wir haben gesehen, dass diese beiden Sätze vielmehr fordern, je mindestens eine von zwei Behauptungen fallen zu lassen, weil die Annahme je-

---

<sup>14</sup> Besonders bekannt: Alain Aspect *et al.* (frühe 1980er) oder Anton Zeilinger *et al.* (2004)

<sup>15</sup> Ich gebe ihm hierin recht. Trotzdem kann man natürlich versuchen, die QM zu retten, indem man (R) statt (L) aufgibt und somit zugibt, dass sie unvollständig ist – gleichwohl sehe ich nicht, warum ein Anhänger der Orthodoxie diesen Weg gehen wollte.

<sup>16</sup> Leider konnte ich weder für Kochen noch für Specker weitere Daten herausfinden, aber zusammen mit dem Jahr der Veröffentlichung (1967) ergeben sie doch einen guten Anhaltspunkt.

<sup>17</sup> Man spricht auch vom Bell-Kochen-Specker-Theorem.

weils beider der QM widerspricht, deren Erfolg als Instrument der Vorhersage unbestritten ist. Viele neuere Deutungen der QM beruhen darauf, den Spielraum zu nutzen, der Interpret der QM bleibt. Sie sind der Suche zu verdanken, einen Weg um das Projektionspostulat (D2) herum zu finden. Ihr Verhältnis zu anderen der obigen Sätze und Behauptungen ist unterschiedlich. Manche Deutungen bilden große Gruppen, die nur in dem Ansatz übereinstimmen, der sie davor bewahren soll (D2) zu akzeptieren.

Der direkteste Weg dazu ist bereits 1957 von Hugh Everett (1930-1982) vorgeschlagen worden: Einfach das Projektionspostulat wegzulassen und zu schauen, was passiert. Wie das aber zu verstehen sein könnte, ist wenig transparent: Schrödingers Katze ist entweder lebendig oder tot, die Entwicklung ohne Messung aber folgt offenbar der Schrödingergleichung. Irgendetwas muss dazwischen geschehen.

Den gegenteiligen Weg hat Bas van Fraassen (\*1941) vorgeschlagen<sup>18</sup>: Jedem quantenmechanischen System werden zu allen Zeiten zwei Zustände zugeschrieben, ein dynamischer und ein probabilistischer – der Ansatz erinnert an Bohm, geht jedoch in der Deutung längst nicht so weit, sondern bleibt bei dieser Annahme stehen, ohne sie weiter (philosophisch) zu begründen<sup>19</sup>.

Im Verhältnis zu dem Satz von Kochen und Specker völlig anders stellen sich Deutungen dar, die auf die Bedeutung der Messung hinweisen: Nur durch Wechselwirkung mit einem Messapparat erhalten wir Auskunft über die physikalischen Eigenschaften des Systems. Wenn man nun den Messapparat als mit dem zu messenden System verschränkt ansieht, erhält man eine kontextuelle Deutung. Hier wird häufig auf die Spektralzerlegung des Dichteoperators zurückzugreifen. Die mathematische Feinheiten dieser Deutungen zu untersuchen, will ich hier nicht unternehmen, aber es fragt sich, ob man mit (NC) nicht auch Teile von (VD) hergeben muss.

Am bekanntesten von allen Deutungen, auch durch die Verwendung in der *Science-fiction*, sind die „Viele-Welten“-Deutungen. Sie umgehen die Zufälligkeit des Projektionspostulats, indem sie annehmen, jede Möglichkeit werde in einer Welt verwirklicht. Zufällig ist dann nur noch das Ergebnis in einer bestimmten Welt, nicht aber dasjenige in allen Welten.

## **Zusammenfassung**

Auch wenn die QM in ihrer orthodoxen Form an den Universitäten fast ausschließlich gelehrt wird, wie sie seit 1932 bekannt ist, und auch wenn das Interesse der meisten Quantenphysiker sich zwischenzeitlich auf darauf aufbauende und darüber hinausführende Fragestellungen konzentriert hat, wie etwa die relativistische Quantentheorie, die Behandlung von Feldern mit deren Hilfe oder schließlich die Vereinheitlichung dieser Konzepte mit der Allgemeinen Relativitätstheorie, so haben sich doch einige Physiker um weitere Angriffe auf die

---

<sup>18</sup> In „*A Formal Approach to the Philosophy of Science*“ von 1972.

<sup>19</sup> Der (konstruktive) Empirist van Fraassen hält eine weitergehende Deutung wohl für unnötig. Ihm genügt empirische Adäquatheit, also Übereinstimmung der theoretischen Vorhersagen mit den experimentellen Beobachtungen.



Grundlagen der Orthodoxie verdient gemacht. Sie haben dadurch zur Klärung der Sachlage beigetragen und neue Experimente inspiriert. Besonders wichtig sind hier die Experimente zur Überprüfung der Bellschen Ungleichungen, die auf die Quantenteleportation und Quantenkryptographie geführt haben.

Die Untersuchungen haben auch verdeutlicht, dass wissenschaftlicher Erkenntnisgewinn durch Angriffe auf die Grundlagen der dominierenden Theorie von außen<sup>20</sup> angewiesen ist.

## Literatur

### Allgemeine Bemerkung

Zur Entwicklung der Quantentheorie nach 1932 ist mir keine Standard-Sekundärliteratur begegnet. Ein genaues Studium der Quellen verlangt freilich umfangreiche Kenntnisse des quantenmechanischen Formalismus und seiner mathematischen Hintergründe. Oft werden auch weitere (und gerne dem Durchschnittsphysikhistoriker völlig unbekannt) mathematische Vorgehensweisen verwendet.

### Internet-Literatur

Wesentliche Referenzen zum Verständnis und zur Bedeutung der Originalarbeiten sind die Artikel in der Stanford Encyclopedia of Philosophy (<http://plato.stanford.edu/>) gewesen. Darunter besonders:

Goldstein, Sheldon: Bohmian Mechanics.

Held, Carsten: The Kochen-Specker Theorem.

Shimony, Abner: Bell's Theorem.

Zum politischen Hintergrund der Bohmschen Mechanik ist zu lesen (auf der Homepage des MPI für Geschichte der Naturwissenschaften als Preprint 303 zu erhalten); freilich im Rahmen der Fleckschen Wissenschaftstheorie, nicht zu den Einzelheiten des Bohmschen Ansatzes:

Forstner, Christian: Dialectical Materialism and the Construction of a New Quantum Theory: David Joseph Bohm, 1917-1992.

### Quellen

Von besonderem Interesse sind die im Text erwähnten Werke:

Bell, John S.: On the Einstein-Rosen-Podolsky Paradox. *Physics* (1) [1964], pp. 195ff.  
Nachgedruckt in  
ders.: *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge 1987.

---

<sup>20</sup> Das heißt: Von außerhalb ihrer selbst. Das EPR-Argument, das nicht nur den Höhepunkt von Einsteins Auseinandersetzung mit Bohr um die Grundlagen der Quantenphysik darstellt, sondern auch weiterhin David Bohm, John Bell und viele andere inspiriert hat, zeigt deutlich, um welche Erkenntnisse die Physik gekommen wäre, wenn Einstein nicht an der Orthodoxie der QM (die sie 1935 bereits war) gezweifelt hätte.

Bohm, David J.: A Suggested Interpretation of Quantum Theory in Terms of 'Hidden Variables'. Part I & II, Physical Review 85 [1952], pp. 166-179 und 180-193.

Bohr, Niels: Can the Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? In: Physical Review (48) [1935], pp. 696ff.

Einstein, Albert, Podolsky, Boris und Rosen, Nathan: Can the Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? In: Physical Review (47) [1935], pp. 777-780.

Everett, Hugh: Relative State Formulation of Quantum Mechanics. In: Reviews of Modern Physics (29) [1957], pp. 454-462.

Fraassen, Bas van: A Formal Approach to the Philosophy of Science. In: Colodny, R. (ed.): Paradigms and Paradoxes. The Philosophical Challenge of the Quantum Domain, Pittsburgh 1972, pp. 303-366.

Kochen, Simon und Specker, Ernst: The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics. In: Journal of Mathematics and Mechanics (17) [1967], pp. 59-87.

Neumann, John von: Die mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik. Berlin 1932.

Bedeutende neuere Autoren zur Bohmschen Mechanik sind etwa (außer Sheldon Goldstein) Valia Allori, Martin Daumer, Detlef Dürr, Karin Münch-Berndl, Nino Zanghì, Zentren der Forschung Genua (wo Allori und Zanghì sitzen), München (Daumer, Dürr; Münch-Berndl inzwischen in Zürich-Irchl) und New Brunswick (NJ, dort lehrt Goldstein).

### Kleine Auswahl an Sekundärliteratur

Einige Bemerkungen zu den Problemen der QM-Orthodoxie und die Aspekte, die ich in der Zusammenfassung angesprochen habe, findet man wieder in:

Feyerabend, Paul: Wider den Methodenzwang. Frankfurt am Main 1976. Überarbeitet 1983, Original *Against Method. An Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge* erschien 1975.

Ders.: Erkenntnis für freie Menschen. Frankfurt am Main 1980.

Einen Überblick aus der Sicht des involvierten Physikers, aber mit einigen Anachronismen und gelegentlich wenig aktuell liefert:

Segrè, Emilio: Die großen Physiker. Von Röntgen bis Weinberg, München 1981, Original *From X-Rays To Quarks. Modern Physicists and Their Discoveries* erschien 1980.

Wer sich für das EPR-Argument interessiert, könnte lesen (sollte aber nicht als einziges darauf vertrauen, denn der Autor hat eine eigene Meinung, die er wortgewaltig darstellt, die aber nicht richtig sein muss):

Genz, Henning: Gedankenexperimente. Weinheim 1999.

### Abbildungsnachweis

Die Gedanken zur Abb. 1 dieser Arbeit findet man erläutert auf den S. 251-255 der Taschenbuchausgabe (Reinbek bei Hamburg, 2005) von Genz 1999.