

Matt oder Patt – Der Bohr-Einstein-Dialog

Peter Stettler 2014

1. Eine Katze und zwei Schachteln

Die Quantenmechanik wird von manchen Wissenschaftshistorikern und Wissenschaftsphilosophen als die radikalste Umwälzung des naturwissenschaftlichen Weltbildes seit Newton betrachtet, radikaler noch als die Relativitätstheorie. Andererseits hinterlässt uns die Quantenmechanik einige bis heute ungelöste Paradoxien, etwa das so genannte Messproblem und das Problem der Verschränkung, d.h. der nichtlokalen Kopplung komplexer Systeme, die auch dann noch besteht, wenn die Teilsysteme meterweit voneinander entfernt sind.

Zum Messproblem: Bis in die Zwanzigerjahre des vergangenen Jahrhunderts bedeutete eine Messung schlicht eine Feststellung, was der Fall ist. Voraussetzung dafür war stillschweigend, dass die gemessenen Objekte schon vor der Messung ihre messbaren Eigenschaften aufweisen. Nun treten Quantenphysiker auf den Plan und behaupten, dass die zu vermessenden Objekte vor der Messung hinsichtlich ihrer Eigenschaften unbestimmt seien. Erst im Akt der Messung erlangen sie bestimmte Eigenschaften. Das heisst: Erst durch Messung tritt ein Quantenobjekt in den erhabenen Zustand der Wirklichkeit.

Erwin Schrödinger hat 1935 zum Thema Messung einen kritischen Übersichtsartikel mit dem Titel *Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik* verfasst. Darin findet man folgende Geschichte (Schrödinger 1935, zit. nach Baumann/Sexl 1987, S. 107/108):

„Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit einer Höllenmaschine (die man gegen den Zugriff der Katze sichern muss): In einem Geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, dass im Lauf einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines. Geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, dass die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiftet haben. Die Psi-Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, dass in ihr die lebende und die tote Katze zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind.“

In der üblichen Quantenmechanik¹ wird der Zustand eines Systems vollständig durch die Ψ -Funktion beschrieben, welche eine Lösung der Schrödingergleichung ist. Vor der Öffnung der Stahlkammer wird der Zustand der berühmten-berüchtigten Schödingerschen Katze durch folgende Zustandsfunktion beschrieben:

$$\Psi_{\text{Katze}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi_{\text{lebend}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi_{\text{tot}}$$

Man sieht, dass die Quantenmechanik die Katze in der geschlossenen Stahlkammer unmissverständlich in einem gemischten Zustand zwischen tot und lebendig beschreibt.

Erst nach Öffnen der Stahlkammer, was als Messung gelten kann, gilt ganz gewiss entweder:

¹ Hier wird die Rede von der „Kopenhagener-Deutung“ vermieden, weil dieser Begriff unterschiedlich interpretiert wird, und auch weil der bedeutende Einfluss von Max Born und seiner Schule in Göttingen dabei unberücksichtigt bleibt (Einstein/Born, 1969, S. 174). Die gehässige Rede von der „orthodoxen Quantenmechanik“ oder vom „Kopenhagener-Positivismus“ unterbleibt ebenfalls.

$$\Psi_{\text{Katze}} = \Psi_{\text{lebend}} \quad \text{oder} \quad \Psi_{\text{Katze}} = \Psi_{\text{tot}} .$$

Das System „Katze“ ist vom gemischten Zustand der beiden Möglichkeiten in den Zustand der Gewissheit gesprungen. Da nur eine der vorliegenden Möglichkeiten verwirklicht werden kann, spricht man von einer *Reduktion* oder von einem *Kollaps* der Zustandsfunktion bei der Messung.

Gewisse Interpreten gehen noch weiter und sagen: Das Öffnen der Kammer bewirkt noch gar nichts hinsichtlich des Zustandes der Katze: Erst wenn ich als Beobachter hineinschaue, kollabiert die Zustandsfunktion.

Schrödinger wurde möglicherweise zu seiner Katzengeschichte inspiriert – und zwar von Einstein. In einem Brief an Schrödinger vom 19.6.1935 schrieb dieser nämlich:

„Alle Physik ist eine Beschreibung von Wirklichkeit; aber die Beschreibung kann ‚vollständig‘ oder ‚unvollständig‘ sein. Der Sinn dieser Ausdrücke ist zunächst auch problematisch. Ich will das an folgendem Gleichnis erklären.

Vor mir stehen zwei Schachteln mit aufklappbarem Deckel, in die ich hineinsehen kann, wenn sie aufgeklappt werden; letzteres heisst, ‚eine Beobachtung machen‘. Es ist außerdem eine Kugel da, die immer in der einen oder andern Schachtel vorgefunden wird, wenn man eine Beobachtung macht.

Nun beschreibe ich einen Zustand so: *Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Kugel in der ersten Schachtel ist, ist 1/2.* - Ist dies eine vollständige Beschreibung?

Nein: Eine vollständige Aussage ist: die Kugel *ist* in der ersten Schachtel (oder ist nicht). So muss also die Charakterisierung des Zustandes bei vollständiger Beschreibung aussehen.

Ja: Bevor ich den Schachteldeckel aufklappe, ist die Kugel gar nicht in einer der beiden Schachteln. Dies Sein in einer bestimmten Schachtel kommt erst dadurch zustande, dass ich den Deckel aufklappe. Dadurch erst kommt der statistische Charakter der Erfahrungswelt bzw. ihrer empirischen Gesetzmäßigkeit zustande. Der Zustand vor dem Aufklappen ist durch die Zahl 1/2 *vollständig* charakterisiert, deren Sinn sich bei Vornahme von Beobachtungen allerdings nur als statistischer Befund manifestiert. ...

Vor der analogen Alternative stehen wir, wenn wir die Beziehung der Quantenmechanik zur Wirklichkeit deuten wollen. Bei dem Kugel-System ist natürlich die zweite ‚spiritistische‘ oder Schrödinger'sche Interpretation sozusagen abgeschmückt und nur die erste ‚Born'sche‘ [d.h. die statistische, P.S.], würde der Bürger ernst nehmen. Der talmudistische Philosoph aber pfeift auf die ‚Wirklichkeit‘ als auf einen Popanz der Naivität und erklärt beide Auffassungen als nur der Ausdrucksweise nach verschieden.

Meine Denkweise ist nun so: An sich kann man dem Talmudiker nicht beikommen, wenn man kein zusätzliches Prinzip zu Hilfe nimmt: ‚Trennungsprinzip‘. Nämlich: ‚die zweite Schachtel nebst allem, was ihren Inhalt betrifft, ist unabhängig davon, was bezüglich der ersten Schachtel passiert (getrennte Teilsysteme). Hält man an dem Trennungsprinzip fest, so schließt man dadurch die zweite (‚Schrödinger'sche‘) Auffassung aus und es bleibt nur die Born'sche, nach welcher aber die obige Beschreibung des Zustandes eine *unvollständige* Beschreibung der *Wirklichkeit*, bzw. der wirklichen Zustände ist.

Der vorstehende Vergleich entspricht dem quantentheoretischen Beispiel der Abhandlung nur sehr unvollkommen. Er ist aber geeignet, den Gesichtspunkt deutlich zu machen, der mir wesentlich ist.“ (zit. nach Held 1999, S. 132).

Mit dem ‚talmudistischen Philosophen‘ ist Niels Bohr gemeint, und damit sind wir beim Thema. Dass Einstein auch Schrödinger ins Bohrsche Lager einreicht, ist wohl nur als Provokation gemeint, denn dieser stand der Quantenmechanik ebenso kritisch gegenüber, wie die Katzengeschichte zeigt.

Einsteins Schachtelgeschichte wird hier derart ausführlich dargeboten, weil sich darin die Grunddifferenzen zwischen den Kontrahenten Einstein und Bohr zeigt: Die Vollständigkeit der Quantenmechanik sowie die Beziehung der Quantenmechanik zur Wirklichkeit. Die Melodie des Textes lässt uns aber auch Einsteins tiefes Unbehagen gegen die Quantenmechanik als vollständige Fundamentaltheorie der Natur spüren.

Sein Unbehagen gegenüber der Quantenmechanik drückte Einstein unmissverständlich in einem Brief vom 4. Dezember 1926 an Max Born aus (Einstein/Born 1969, S. 126):

„Lieber Born!

Die Quantenmechanik ist sehr achtungsgebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bis ich überzeugt, dass *der* nicht würfelt“.

Nun war es aber gerade sein Freund Born, der Einsteins Unbehagen in die Welt setzte, indem er die Zustandsfunktion als Wahrscheinlichkeitsaussage deutete. Born betrachtete die gestreute Materiewelle nach einem Stossvorgang und kommentierte sein Resultat, welches er durch Lösung der Schrödingergleichung erhalten hatte wie folgt (Born 1926, zit. nach Bauman/Sexl 1987, S. 50/51):

„Will man nun dieses Resultat korpuskular umdeuten, so ist nur eine Interpretation möglich: [Die Zustandsfunktion] bestimmt die Wahrscheinlichkeit, dass das aus der z-Richtung kommende Elektron in die [durch drei Winkel] bestimmte Richtung geworfen wird.“

Hinter dem Wort „Wahrscheinlichkeit“ hat er eine Fussnote angefügt:

„Anmerkung bei der Korrektur: Genauere Überlegung zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit dem Quadrat [der Zustandsfunktion] proportional ist.“

Für diese kleingedruckte Fussnote konnte Born 1954 den Nobelpreis in Empfang nehmen.

Aus seinen Überlegungen zu atomaren Stossvorgängen zieht Born folgende Konsequenz:

„Man bekommt keine Antwort auf die Frage „wie ist der Zustand nach dem Zusammenstoß“, sondern nur auf die Frage „wie wahrscheinlich ist ein vorgegebener Effekt des Zusammenstoßes“. ... Hier erhebt sich die ganze Problematik des Determinismus. ... Ich selber neige dazu, die Determiniertheit in der atomaren Welt aufzugeben.“

2. Der Solvay-Kongress von 1927

In der Folge von Borns Wahrscheinlichkeitsdeutung der Ψ -Funktion erfuhr die Entwicklung der Quantenmechanik eine ungeheure Verdichtung:

Im Februar 1927 erschien in der *Zeitschrift für Physik* Heisenbergs Artikel, in welchem er die Unschärferelation vorstellte. Darin findet man auch sein damaliges Bekenntnis zu einem radikalen Positivismus:

„Da nun der statistische Charakter der Quantentheorie so eng an die Ungenauigkeit aller Wahrnehmung geknüpft ist, könnte man zu der Vermutung verleitet werden, dass sich hinter der wahrgenommenen statistischen Welt noch eine wirkliche Welt verberge, in der das Kausalgesetz gilt. Aber solche Spekulationen scheinen uns, das

betonen wir ausdrücklich, unfruchtbar und sinnlos. Die Physik soll nur den Zusammenhang der Wahrnehmung formal beschreiben“. (zit. nach Baumann/Sexl 1987, S. 78).

Am 16. April 1927 erschien eine Arbeit von Davisson und Germer unter dem Titel *Diffraction of Electrons*. Durch Interferenzerscheinungen wurde der Wellenaspekt der Elektronen experimentell nachgewiesen.

Im September 1927 fand in Como eine Volta-Gedenktagung statt. Da versuchte Niels Bohr das Welle-Teilchen-Problem mit Hilfe seiner Idee der Komplementarität verständlich zu machen. Einstein nahm an dieser Tagung aus Protest gegen das faschistische Italien nicht teil.

Schliesslich fand im Oktober 1927 die fünfte Solvay-Konferenz in Brüssel statt. Diese Zusammenkünfte hochkarätiger Physiker wurden von einem reichen Industriellen namens Solvay vor dem ersten Weltkrieg ins Leben gerufen und wohl auch finanziert.

Die V. Solvay-Konferenz war wohl das bedeutendste intellektuelle Gipfeltreffen aller Zeiten: 17 von 29 geladenen Teilnehmer bekamen irgendwann den Nobelpreis zugesprochen (Kumar 2009, S. 9 & S. 471, Bild mit vollständiger Namenliste).

Zunächst verlief die Konferenz in geordneten Bahnen: angekündigte Vorträge, disziplinierte Diskussionen. Dann aber in der Plenumsdiskussion nach Bohrs Vortrag über die Komplementarität ergriff Einstein das Wort. Er ging aber überhaupt nicht auf Bohrs Vortrag ein, sondern stellte sich und dem Publikum die Frage, ob die Quantentheorie als vollständige Beschreibung individueller atomarer Prozesse angesehen werden könne (Held 2002, S. 58 ff).

Als Gedankenexperiment betrachtete Einstein eine Blende mit einem engen Spalt, durch welchen Elektronen treten. Hinter der Blende befindet sich ein Schirm, auf dem die Elektronen registriert werden können. Die Elektronen werden als Wellen beschrieben. Im Spalt werden diese Wellen gebeugt.

Gemäss der Bornschen Deutung bestimmt Quadrat der Zustandsfunktion die Wahrscheinlichkeit, Elektronen an bestimmten Orten auf dem Schirm anzutreffen. Im genannten Beispiel erstreckt sich Ψ^2 über den ganzen Schirms wie etwa eine breite Glockenkurve.

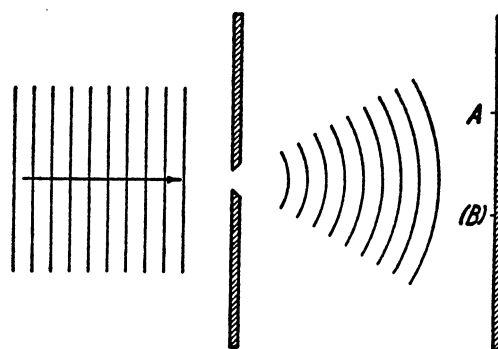


Fig. 1

Einstein unterschied nun zwei Deutungen:

- Eine einzelne Welle entspricht einem Schwarm von Elektronen. Diese sogenannte Ensemble-Deutung ergibt keine Probleme, denn dabei handelt es sich um klassische Statistik.
- Eine Welle entspricht einem einzelnen Elektron. Damit wäre die Quantentheorie für individuelle Prozesse vollständig. Aber dann wäre dieses eine Elektron identisch mit der Welle und müsste auf der ganze Breite des Schirms auftreffen.

Nun wird aber das Elektron an einem ganz bestimmten Ort registriert, z.B. am Ort A. Insofern hat es Teilchencharakter. Dann wäre Ψ^2 auf dem ganzen Schirm Null, ausser am Ort A. Demnach müsste die Wellenfunktion von der ganzen Breite des Schirms auf den Ort A zusammengestürzt sein. Diesen Zusammensturz benannte man später höchst anschaulich als *Kollaps der Wellenfunktion*. Nun muss aber der Kollaps an einem beliebigen Ort B, wo das Elektron nicht gemessen wurde, genau gleichzeitig mit der Registrierung in A erfolgen. Und das widerspricht dem Relativitätspostulat, gemäss welchem keine Wechselwirkung zwischen voneinander entfernten Orten A und B schneller als die Lichtgeschwindigkeit erfolgen kann.

Mit diesem einfachen Beispiel hat Einstein instinktsicher einen wunden Punkt der Quantenmechanik aufgespürt.

Die hitzigsten Streitgespräche fanden aber nicht im Konferenzsaal statt, sondern im eleganten Jugendstil-Speisesaal des Hotels Metropol, wo fast alle Teilnehmer logierten. Als dritter war stets Paul Ehrenfest dabei, der die intensiven Auseinandersetzungen in einem Brief an seine Assistenten wie folgt beschreibt (zit. nach Held 2002, S. 62 und Kumar 2009, S. 333-335):

„Herrlich war es für mich, den Zwiegesprächen zwischen Bohr und Einstein beizuwohnen. Schachspielartig. Einstein erfand immer neue Beispiele ... um die Ungenauigkeitsrelation zu durchbrechen. Bohr stets aus einer Wolke von philosophischen Rauchgewölken die Werkzeuge heraussuchend, um Beispiel nach Beispiel zu zerbrechen. Einstein wie die Teufeln in der Box, jeden Morgen wieder frisch herausspringen. Oh, das war köstlich. Aber ich bin fast rückhaltlos pro Bohr contra Einstein. Er verhält sich nun exakt gegen Bohr wie sich die Verteidiger der absoluten Gleichzeitigkeit gegen ihn verhielten.“

Bohr ging während der Sitzung ebensowenig auf Einsteins Frage nach der Vollständigkeit der Quantenmechanik ein, wie Einstein auf Bohrs Vortrag eingegangen war. Hingegen kontert er Einsteins Angriff auf die Unschärferelation wie folgt (Bohr 1949, S. 126):

- Vor der Blende hat das Teilchen einen Impuls p dem eine de Broglie-Wellenlänge $\lambda = h/p$ entspricht.
- Durch Beugung am Spalt ist der Öffnungswinkel² ϑ des gebeugten Wellenzuges hinter der Blende grössenordnungsmässig $\vartheta \approx \lambda/a$.
- Dieser Öffnungswinkel bestimmt aber auch die Unschärfe Δp_x der Impulskomponente senkrecht zur Ausbreitungsrichtung: $\vartheta \approx \Delta p_x/p$.
- Das Mass der Unschärfe des Ortes ist durch die Spaltbreite gegeben: $\Delta x = a$.
- Elimination von ϑ führt zu $\Delta p_x/p = \lambda/a \Rightarrow \Delta p_x \cdot \lambda/h = \lambda/\Delta x \Rightarrow \Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$.

Einsteins zweites Gedankenexperiment war eine Variation des ersten: Zusätzlich zur Blende war noch ein Schieber, der nur während der Zeitspanne Δt geöffnet war. Das war ein Angriff auf die Unschärferelation zwischen Energie und Zeit $\Delta E \cdot \Delta t > h$. Auch diese Situation konterte Bohr mit Hilfe einer einfachen Übersichtsrechnung.

Bis jetzt war nur von der Änderung des Impulses eines Elektrons beim Durchgang des Spaltes die Rede. Die nächste Frage war dann, ob die Impulsübertragung zwischen dem Spalt und der Blende kontrolliert werden könne. Damit hätte man es mit einem Zweikörperproblem zu tun und die Blende müsste als zweites Quantenobjekt betrachtet werden. Das Gedankenexperiment wäre dann eine Variation des Compton-Effekts.

² Die Winkel sind im Bogenmass angegeben; ein rechter Winkel wäre also $\pi/2$. Damit kann bei Näherungsrechnungen und kleinen Winkeln auf die Winkelfunktionen Sinus und Tangens verzichtet werden.

Um über die Impulsübertragung Klarheit zu gewinnen fügte Einstein einen zweiten Schirm zwischen die Spaltblende und den Schirm ein. Dieser Schirm hat zwei parallele Schlitze. Damit führte Einstein den berühmten Doppelspalt in den Diskurs der Quantenmechanik ein.

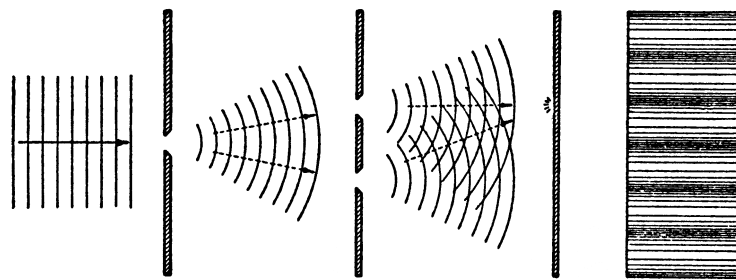


Fig. 3

Unter gewöhnlichen Bedingungen wird auf der Fotoplatte rechts das bekannte Interferenzmuster beobachtet, wie es in der Frontalansicht gezeigt wird.

Die gleiche Verteilung müsste sich aber auch aus einer grossen Zahl von Versuchen ergeben, wenn die Strahlung so schwach ist, dass jeweils nur ein einziges Teilchen unterwegs wäre. Ein solches soll nun an der markierten Stelle der Fotoplatte registriert werden. Dabei erhebt sich natürlich die Frage, ob dieses durch den oberen oder den unteren Schlitz geflogen sei.

Einstein vertrat die Auffassung, dass eine Kontrolle der Impulsübertragung die Entscheidung ermöglichen sollte (Bohr 1949, S. 129).

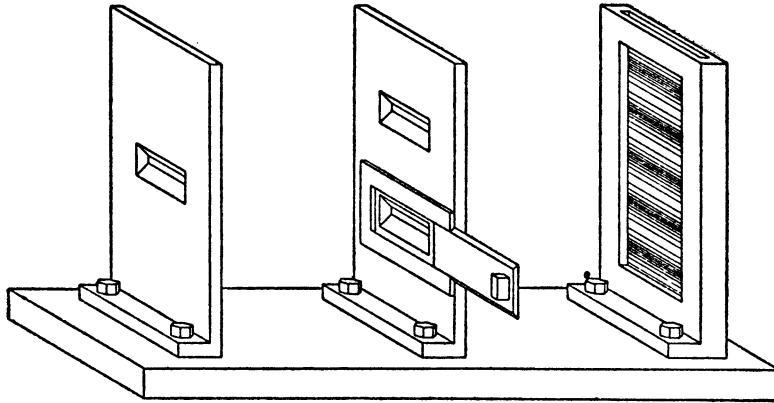
Bohr führte erneut folgende einfache Rechnung durch:

- Δx sei der Abstand zweier benachbarter Interferenzfransen auf der Fotoplatte.
- Gemäss dem bekannten Problem „Beugung am Doppelspalt“ ist $\Delta x/L \approx \lambda/d$, wobei L = Distanz zwischen Doppelspalt und Schirm und d = Abstand der beiden Spalte bedeuten.
- Mit „de Broglie“ wird: $\lambda/d = h/pd$. Und damit: $\Delta x/L \approx h/pd$.
- Δp_x ist die Differenz der Impulse, je nachdem das Teilchen durch den oberen oder den unteren Spalt flog.
- ω wäre der Winkel zwischen den beiden Bahnen: $\omega = d/L$, andererseits $\omega = \Delta p_x/p$.
- $\Delta x/L \approx \lambda/d$; $\Rightarrow \omega = d/L = \lambda/\Delta x = h/p\Delta x = \Delta p_x/p \Rightarrow \Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$.

Wäre die Unschärfe der Impulse kleiner als die Differenz der Impulse $\omega \cdot p$, dann könnte man entscheiden, durch welchen der beiden Schlitze das Teilchen geflogen ist. Damit wird aber die Unschärfe des Ortes auf der Fotoplatte grösser als der Abstand zweier benachbarter Interferenzfransen Δx . Die Messung des Impulses an einem der beiden Schlitze würde also das Interferenzmuster zerstören, was Niels Bohr wie folgt kommentierte (Bohr, 1949, S. 129/130):

„Wir stehen also vor der Wahl, entweder den Weg eines Teilchens zu verfolgen oder Interferenzwirkungen zu beobachten. ... Wir haben hier ein typisches Beispiel dafür, wie komplementäre Phänomene unter sich gegenseitig ausschliessenden Versuchsanordnungen auftreten. Wir stehen hier bei der Analyse der Quanteneffekte vor der Unmöglichkeit, eine scharfe Trennungslinie zwischen einem unabhängigen Verhalten atomarer Objekte und ihrer Wechselwirkung mit den Messgeräten zu ziehen, die zur Definition der Bedingungen für das Auftreten der Phänomene dienen“.

Quasi als meditative Vertiefung begann Bohr die Apparate von Einsteins Gedankenexperimenten in einem pseudorealistischen Stil zu skizzieren:



Diese Zeichnung Bohrs von Einsteins Doppelspalt mit Schieber mag uns inspirieren, um über die Grundlagen der Quantenmechanik nachzudenken. Wieder sei die Intensität derart schwach, dass jeweils nur einzelne Teilchen unterwegs sind. Die x-Achse sei die Vertikale auf dem Schirm.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron im Gebiet zwischen x und $x + dx$ auf dem Schirm auftritt, ist $|\Psi(x)|^2 \cdot dx$.

Wenn der untere Schieber geschlossen ist, sind $\Psi(x) = \Psi_1(x)$ und $|\Psi(x)|^2 = |\Psi_1(x)|^2$;

Wenn der untere Schieber offen, der obere Spalt dagegen zu ist, ist $|\Psi(x)|^2 = |\Psi_2(x)|^2$.

Wenn beide Spalte geöffnet sind, überlagern sich die Zustände „1“ und „2“ linear:

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi_1(x) + \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi_2(x)$$

Um die Wahrscheinlichkeitsdichte $|\Psi(x)|^2$ zu erhalten, muss man $\Psi(x)$ mit ihrer konjugiert-komplexen „Schwester“ $\Psi^*(x)$ multiplizieren:

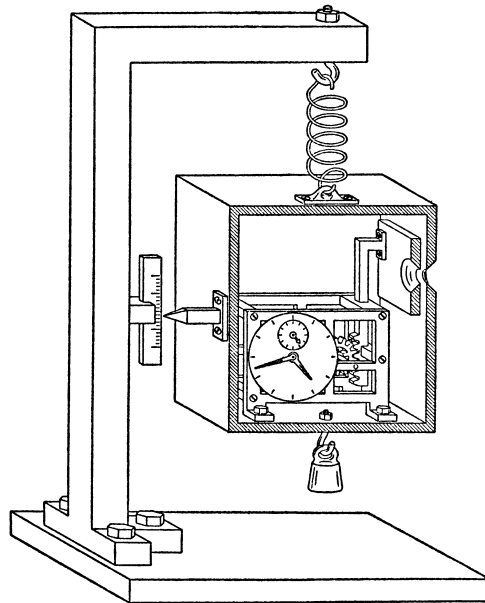
$$|\Psi(x)|^2 = \frac{1}{2} |\Psi_1(x)|^2 + \frac{1}{2} |\Psi_2(x)|^2 + \frac{1}{2} \{ \Psi_1^*(x) \Psi_2(x) + \Psi_1(x) \Psi_2^*(x) \}$$

Der dritte Summand ist der Interferenzterm. Dieser moduliert die „braven“ Ψ_1 und Ψ_2 zum rhythmischen Interferenzmuster, welches sich bei vielen Messungen (d.h. Aufschlägen der Elektronen auf dem Schirm) allmählich bildet.

Komplexe Systeme, die nicht aus ihren Teilen, sondern nur als ein Ganzes verstanden werden können, nennt man verschränkt. Überlagerung und Verschränkung sind zu Schlüsselbegriffen der Quantenmechanik geworden. Und für beides ist der Doppelspalt der Prototyp (z.B. Audretsch 2002, S. 9/10 & 17/18).

3. Der Solvay-Kongress von 1930

Die zweite Runde im Bohr-Einstein-Wettkampf fand wieder in Brüssel statt. Einstein entwarf eine Anordnung, die Bohr später wieder in seinem pseudorealistischen Stil wie folgt skizziert hat:



Der Apparat besteht aus einem Kasten mit einem Loch auf der Seite. Ein Schieber kann dieses Loch öffnen oder schliessen. Eine eingebaute Uhr steuert diesen Schieber. Der Kasten kann an einer Federwaage gewogen werden. Im Prinzip ist es möglich, den Schieber zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt kurz zu öffnen, so dass ein einzelnes Photon entweichen kann. Durch Wägung vor und nach dem Öffnen des Schiebers kann die Energie des entwichenen Photons gemäss $E = mc^2$ genau ermittelt werden. Damit glaubte Einstein, die Unschärferelation zwischen Energie und Zeit, nämlich $\Delta E \cdot \Delta t > h$ überlistet zu haben.

Es kostete Bohr eine schlaflose Nacht, um auch diesen Angriff auf die Unschärferelation abzuwehren. Dabei konnte er Einsteins Argument – Ironie des Schicksals – mit Hilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie entkräften. Die Ortsunschärfe Δx ist die Ungenauigkeit des Zeigerausschlags der Federwaage, und diese ist eine Höhendifferenz. Da nun der Lauf einer Uhr im Gravitationsfeld von der Höhe abhängt, ergibt sich daraus eine Ungenauigkeit der Zeit ΔT . Und wiederum führt Bohrs durch eine äusserst einfache Rechnung³ zu $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$.

4. Einstein, Podolsky, Rosen (EPR) 1935

Am 7. Oktober 1933 verliess Einstein Europa für immer und nahm im November seine Tätigkeit am *Institute for Advanced Study (IAS)* in Princeton auf.

Im Mai 1935 erschien ein relativ kurzer Artikel in der *Physical Review* mit dem Titel *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* Dessen Autoren waren Einstein und seine jungen Mitarbeiter Boris Podolsky und Nathan Rosen (Einstein 1935). In der Welt der Naturwissenschaften gibt es nur wenige Publikationen welche derart oft zitiert wurden und werden. Daher wird der ganze Diskurs um diese wenigen Seiten schlicht mit EPR bezeichnet.

EPR beginnen mit zwei Fragen zur Beurteilung einer Theorie:

Ist sie korrekt? – Und ist sie vollständig?

Die Korrektheit wird aus dem Grad der Übereinstimmung zwischen den Schlussfolgerungen der Theorie und der menschlichen Erfahrung, d.h. den Experimenten beurteilt. Darin scheint die Quantenmechanik bis heute unschlagbar zu sein.

Auf die Fragen folgen zwei Kriterien als Thesen (Baumann/Sexl 1987, S. 81):

³ Bohrs Rechnung zum Kastenexperiment: siehe Anhang 1.

Das Vollständigkeitskriterium:

„Jedes Element der physikalischen Realität muss seine Entsprechung in der physikalischen Theorie haben.“

Das Realitätskriterium:

„Wenn wir, ohne auf irgendeine Weise ein System zu stören, den Wert einer physikalischen Grösse mit Sicherheit vorhersagen können, dann gibt es ein Element der physikalischen Realität, das dieser Grösse entspricht.“

Man beachte hier die subtile Unterscheidung zwischen *Messen* und *Sicher-Vorhersagen*.

Dann folgen einige Berechnungen mit dem standardisierten Formalismus der Quantenmechanik. Dabei betrachten EPR zunächst ein freies Teilchen mit einem Freiheitsgrad. Die Zustandsfunktion dieses Systems entspricht einer einfachen Wellengleichung.

Schon eine klassische Analyse zeigt, dass eine Welle mit einer scharf definierter Wellenlänge unendlich lang sein muss (Fourier-Transformation). Es ist also sinnlos von einem Ort dieser Welle zu sprechen. Umgekehrt lässt sich aus einer genau lokalisierten Welle – da müsste man eher von einem Teilchen sprechen – nichts über ihre allfällige Frequenz oder Wellenlänge aussagen.

Mit Hilfe der de Broglie-Beziehung $p = h/\lambda$ lässt sich dieser Sachverhalt in das für die Quantenmechanik charakteristische Ausschlussverhältnis von Ort und Impuls eines Teilchens übersetzen: Wenn der Impuls einen scharfen Wert hat ($p = p_0$), dann ist der Ort unbestimmt – und umgekehrt. EPR konstatieren leicht ironisch (Baumann/Sexl 1987, S. 82):

„Daraus wird in der Quantenmechanik üblicherweise geschlossen, dass der Koordinate [d.h. dem Ort] des Teilchens, sobald dessen Impuls bekannt ist, keine Realität zukommt.“

Im 2. Teil der Arbeit hat Einstein wieder einmal ein geniales Gedankenexperiment erfunden, welches als EPR-Experiment in die Geschichte der Physik eingegangen ist:

Zwei Teilchen treffen zusammen und spicken nach der Wechselwirkung wieder auseinander. Erst nach der Wechselwirkung entscheidet sich der Beobachter, ob er den Impuls oder den Ort eines dieser Teilchen messen will. Da die Wellenfunktion für das gesamte System angesetzt wird, kann man durch die Messung am ersten Teilchen auch Voraussagen über die entsprechende Eigenschaft des anderen Teilchens machen⁴. Diese indirekte Messung am weit entfernten Teilchen würde der Forderung im Realitätskriterium „ohne auf irgendeine Weise ein System zu stören“ entsprechen.

Wenn der Impuls des ersten Teilchens gemessen wird, ist auch der Impuls des zweiten Teilchens bekannt. Die Orte beider Teilchen sind dagegen völlig unbekannt. Und umgekehrt.

Dem Realitätskriterium von EPR entsprechend gilt: Wenn der Impuls des zweiten Systems sicher vorausgesagt werden kann, ist er real. Der Ort dagegen nicht. Und umgekehrt. Und EPR kommen zum Schluss (Baumann/Sexl 1987, S. 86):

„Aus dieser Sicht [der Sicht der Quantenmechanik] sind die Grössen *Impuls* und *Ort* nicht zugleich real, da entweder die eine oder die andere Grösse, nicht aber beide zugleich vorhergesagt werden können. Dadurch wird der Realitätsanspruch von *Impuls* und *Ort* vom Vorgang der Messung abhängig, die am ersten System ausgeführt wird und die auf keine Weise das zweite System beeinflusst. Man darf nicht erwarten, dass dies irgendeine vernünftige Definition der Realität zulässt.“

Im Gegensatz zur Quantenmechanik nehmen EPR an, dass *beide* zueinander komplementären Grössen, nämlich Ort *und* Impuls des zweiten, weit entfernten System „der gleichen Wirklichkeit zugeordnet“ werden müssen, obwohl nur eine der beiden sicher vorhergesagt

⁴ Die Quantenmechanik erlaubt für dieses System scharfe Werte für $p_1 + p_2$ und $x_1 - x_2$. (Herleitung im Anhang 2)

werden könne. Damit beurteilen sie die Quantenmechanik als unvollständig. Wünschenswert wäre also nach EPR eine Theorie, welche der Quantenmechanik zugrunde liegt, und welche man im neueren Diskurs bisweilen *Theorie mit verborgenen Variablen* nennt.

5. Bohrs Antwort auf den EPR-Artikel 1935

Bohr wurde vom Erscheinen des EPR-Artikels überrascht (Bohr 1949, S. 142):

„Dank ihrer Klarheit und scheinbar unangreifbaren Argumentation gab die Arbeit von Einstein, Podolsky und Rosen Anlass zu Aufregung unter den Physikern und hat in der Diskussion allgemein philosophischer Fragen eine grosse Rolle gespielt.“

Er liess alle laufenden Arbeiten ruhen und antwortete sofort: Kaum vier Monate später traf seine Antwort bei der *Physical Review* ein und wurde unter demselben Titel veröffentlicht: *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* (Bohr 1935, in: Baumann/Sexl 1987, S. 87-97; Fischer 2012, S. 211).

Bohrs Antwort auf EPR ist umständlich formuliert, was er später selber als „Unbeholfenheit der Ausdrucksweise“ zugesteht (Bohr 1949, S. 144). Er argumentiert mit den Beispielen von 1927: ‚Schlitz in der Blende‘, ‚bewegliche Blende‘ – und als er endlich auf das EPR-Experiment zu sprechen kommt, argumentiert er mit dem Beispiel ‚Doppelspalt‘. Er geht also überhaupt nicht auf das EPR-Experiment ein, wo Aussagen über Eigenschaften eines weit entfernten Teilchens aus den Messresultaten an einem anderen Teilchen erschlossen werden.

Bohr sieht im Realitätskriterium von EPR eine Mehrdeutigkeit im Ausdruck „ohne ein System zu stören“ (Baumann/Sexl 1987, S. 93; Held 1999, S. 191):

„Natürlich ist in einem Fall wie dem soeben betrachteten nicht die Rede von einer mechanischen Störung des zu untersuchenden Systems während der letzten kritischen Phase des Messverfahrens. Aber selbst in dieser Phase handelt es sich wesentlich *um einen Einfluss auf die tatsächlichen Bedingungen, welche die möglichen Arten von Voraussagen über das zukünftige Verhalten des Systems definieren*. Da diese Bedingungen ein immanentes Element der Beschreibung jeglichen Phänomens ausmachen, dem man mit Recht den Begriff „physikalische Wirklichkeit“ zuschreiben kann, sehen wir, dass die Argumentation der genannten Verfasser nicht ihre Schlussfolgerung rechtfertigt, die quantenmechanische Beschreibung sei wesentlich unvollständig.“

Bohr versteht unter einem Phänomen – etwas salopp formuliert – eine Reise aus der klassischen Physik zur Quantenmechanik und wieder zurück in die klassische Physik. Im Mittelpunkt von Bohrs Überlegungen nach 1935 steht die Idee der Definiertheit⁵: Eine physikalische Grösse ist erst durch die experimentelle Anordnung definiert. (Baumann/Sexl 1987, S. 91/92):

„Tatsächlich haben wir es bei jeder experimentellen Anordnung, die zum Studium reiner Quantenphänomene geeignet ist, nicht nur mit der Unkenntnis des Wertes gewisser physikalischer Grössen zu tun, sondern mit der Unmöglichkeit, diese Grössen auf eindeutige Weise zu definieren“.

Wenn eine Grösse nicht definiert werden kann, dann gibt es sie nicht und damit gehört sie nicht zur Wirklichkeit.

Ob Bohr immer klar zwischen Phänomen und Experiment unterschieden hat, weiss ich nicht. Letzteres definierte er wie folgt (Bohr 1949, S. 122): Ein Experiment ist eine Situation...

„... in der wir anderen mitteilen können, was wir getan und was wir gelernt haben, und dass deshalb die Versuchsanordnung und die Beobachtungsergebnisse in klar

⁵ Definiertheit ist nicht zu verwechseln mit der Definition einer physikalischen Grösse, etwa „Impuls gleich Masse mal Geschwindigkeit“.

verständlicher Sprache unter passender Anwendung der Terminologie der klassischen Physik beschrieben werden müssen.“

Oft ist darauf hingewiesen worden, dass Bohr darauf bestand, die Messanordnung in Begriffen der klassischen Physik zu beschreiben. Dass das aber auch für die Mitteilung der Beobachtungsergebnisse gilt, wird bisweilen übersehen.

Bohrs Grundidee war es also, dass physikalische Grössen nicht an und für sich exakt definiert sind, sondern nur in bestimmten Kontexten. Carsten Held, Professor für Wissenschaftsphilosophie in Erfurt, der die Bohr-Einstein-Debatte ausführlich und sehr kritisch dokumentiert hat, sieht in der Kontextabhängigkeit ein Grundproblem der Quantenmechanik, das seiner Ansicht nach auch heute noch nicht hinreichend begründet ist (Held 1999, S. 202, Held 2002, S. 74).

6. Vorläufige Bilanz der Bohr-Einstein-Debatte

Die Doppelpublikation in der *Physical Review* von 1935 war der Höhepunkt der Bohr-Einstein-Diskussion – und gewissermassen auch ihr Ende. Die Streitpunkte wie auch die Standpunkte der Streitenden haben sich zwar in den gut 10 Jahren der intensiven Auseinandersetzung leicht geändert, aber zu einer endgültigen Einigung kam es nie.

6.1. „Gott würfelt nicht“ – oder doch?

Einsteins Unbehagen gegen die Quantenmechanik ist durch Max Borns statistische Deutung der Quantenmechanik erwacht. Der Wellen-Teilchen-Dualismus, dessen Klärung Bohr ein grosses Anliegen war, scheint Einstein kaum irritiert zu haben. Seine Abneigung gegen die Bornsche Deutung scheint sich aber im Laufe der Diskussion mit Bohr gemildert zu haben. Denn 1936 schreibt er in einem längeren Aufsatz mit dem Titel *Physik und Realität* (Einstein 1936 S. 340/341):

„Es scheint mir deshalb klar, dass die Bornsche statistische Deutung der Aussagen der Quantentheorie die einzig mögliche ist: Die Ψ -Funktion beschreibt überhaupt nicht einen Zustand, der einem einzelnen System zukommen könnte; sie bezieht sich vielmehr auf viele Systeme, eine ‚System-Gesamtheit‘ im Sinne der statistischen Mechanik. Wenn die Ψ -Funktion abgesehen von besonderen Fällen nur *statistische* Aussagen über messbare Grössen liefert, so liegt dies also nicht nur daran, dass *der Vorgang der Messung* unbekannte, nur statistisch erfassbare Elemente einführt, sondern eben daran, dass die Ψ -Funktion überhaupt nicht den Zustand *eines* Einzelsystems beschreibt.“

Damit hat sich ein zweiter Streitpunkt kundgetan:

6.2. Beschreibt Ψ individuelle Systeme oder nur Ensembles?

Einstein interpretiert die Bornsche Deutung der Zustandsfunktion selbstredend als eine Ensemble-Deutung. Damit würde die Statistik die gleiche Rolle spielen wie überall, wo Statistik verwendet wird.

In der Quantenmechanik kann sich Ψ aber auf eine Situation beziehen, in der nur ein einzelnes Teilchen vorkommt. Gemäss dem Pauli-Prinzip sind Quantenobjekte ununterscheidbar und nur durch ein Set von wenigen Quantenzahlen definiert. Ψ kann demnach nicht die Beschreibung eines ganz bestimmten Teilchens sein, sondern ist lediglich eine Bündelung von Wahrscheinlichkeitsaussagen für das Vorfinden eines Teilchens mit diesen und jenen Eigenschaften. Ψ beschreibt also eine Situation und nicht ein identifizierbares Objekt (Held 1999, S. 252 und 271).

Wenn nun Ψ auf individuelle Systeme bezogen wird, brockt man sich das Messproblem ein:

Vor der Messung ist die Zustandsfunktion die gewichtete Summe aller möglichen Eigenzustände Ψ_i .

$$\Psi = \sum_i c_i \Psi_i \quad \text{mit} \quad \sum_i |c_i|^2 = 1$$

Wird nun der dem Zustand Ψ_k entsprechende Eigenwert a_k gemessen, kollabiert die Zustandsfunktion und reduziert sich auf $\Psi = \Psi_k$. Dieser Kollaps ist ein sprunghafter, irreversibler Übergang von der Modalität der Möglichkeit in die Modalität der Wirklichkeit.

Das Messproblem war Einstein ein Dorn im Auge und ist auch heute noch Gegenstand wissenschaftsphilosophischer Kontroversen (Held 2012, S. 77; Esfeld 2012b). Mit seinem ersten Spaltexperiment von 1927 hat Einstein instinktsicher einen wunden Punkt der Quantenmechanik entlarvt.

6.3. Lokalitätsprinzip oder Verschränkung?

Ein weiterer Streitpunkt war das Lokalitätsprinzip, welches besagt: Der Zustand eines Systems kann durch Geschehnisse in räumlich getrennten Gebieten nicht beeinflusst werden.

Einsteins Schachtelgeschichte zeigt, dass er sich eine Physik ohne Lokalitätsprinzip⁶ nicht vorstellen konnte. Nun hat er aber 1935 ein Gedankenexperiment erfunden, um die Unvollständigkeit der Quantenmechanik zu beweisen, und zwar das EPR-Experiment, in welchem nichtlokale Korrelationen zwischen weit voneinander entfernten Teilsystemen vorkommen. Und das war ein Eigentor.

Heute spricht man treffend von EPR-Korrelationen zwischen verschränkten Teilsystemen. Verschränkte Systeme widersprechen dem Lokalitätsprinzip. Man kann sie nur als ein untrennbares Ganzes beschreiben. Seit den 80-er Jahren werden Variationen des EPR-Experiments tatsächlich durchgeführt, welche zeigen, dass die Welt nichtlokal ist (Primas, 1992; Dürr und Lazarovici 2012, S. 130).

6.4. Vollständigkeit und Wirklichkeit

Der augenfälligste Streitpunkt zwischen Bohr und Einstein ist aus dem gemeinsamen Titel der Veröffentlichungen von 1935 abzulesen: *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*

Die Frage nach der Vollständigkeit der Quantenmechanik ist eng mit dem unterschiedlichen Realitätsverständnis der Kontrahenten Einstein und Bohr verknüpft.

Einstein war und blieb Realist (zit. nach Held 1999, S. 70):

„Der Glaube an eine vom wahrnehmenden Subjekt unabhängige Aussenwelt liegt aller Naturwissenschaft zugrunde“.

Und die entscheidenden Sätze im EPR-Aufsatz sind:

„Der Realitätsanspruch von *Impuls* und *Ort* [wird in der Quantenmechanik] vom Vorgang der Messung abhängig, die am ersten System ausgeführt wird und die auf keine Weise das zweite System beeinflusst. Man darf nicht erwarten, dass dies irgendeine vernünftige Definition der Realität zulässt.“

Weil die Quantenmechanik keine A-Priori-Realität von *Impuls* und *Ort* des freien Teilchens im EPR-Experiment anerkennt, müsse sie unvollständig sein. Daher sollte sie durch eine

⁶ Einstein nannte das Lokalitätsprinzip im zitierten Brief an Schrödinger *Trennungsprinzip*. Manche Autoren unterscheiden diese beiden Prinzipien nicht.

umfassendere Theorie ergänzt werden. Wie sich Einstein diese Theorie wünschte, beschrieb er in einem Brief an Born (Einstein/Born 1969, S. 229-234):

„Ich stelle mir vor, dass [die Quantenmechanik] in einer späteren [Theorie] etwa so enthalten sein wird, wie die Strahlen-Optik in der Undulations-Optik: Die Beziehungen werden bleiben, die Grundlage aber wird vertieft bzw. durch eine umfassendere ersetzt werden.“

Diese Theorie müsste sowohl kausal wie auch lokal sein, etwa nach dem Muster der Allgemeinen Relativitätstheorie, also eine Feldtheorie. Eine solche versuchte Einstein bekanntlich in seinen späten Jahren vergeblich zu formulieren.

Niels Bohr hat wenig über die Wirklichkeit als solche gesprochen. Sein Hauptinteresse galt der Erkenntnis der physikalischen Wirklichkeit:

„...das Ziel der Naturwissenschaft ist [es], unsere Erfahrungen zu vermehren und zu ordnen...“ (Bohr 1985, S. 97).

Bohrs holistischen Phänomenansatz kann man etwas überzeichnet als einen Prozess beschreiben, der beim freien Willen des Experimentators beginnt und beim erkennenden Subjekt aufhört:

Der Experimentator wählt eine Messanordnung und bestimmt damit, welche physikalischen Grössen definiert sind und somit gemessen werden können (Definiertheits-Argument). Dann werden mit dem Formalismus der Quantenmechanik die Wahrscheinlichkeiten für das Vorfinden möglicher Messwerte bestimmt. Schliesslich wird einer oder mehrere dieser Messwerte⁷ experimentell als zutreffend festgestellt und bewusst zur Kenntnis genommen.

Nicht nur Einstein hatte seine Mühe mit dem Bohrschen Phänomenbegriff, der die Subjektivität des Beobachters ins Spiel bringt und damit die strenge Trennung zwischen Subjekt und Objekt aufweicht. So schreibt Schrödinger unmittelbar nach seiner berühmten Katzen-Geschichte voller Ironie:

„Aus diesem sehr schwerwiegenden Dilemma hilft ... uns die herrschende Lehrmeinung durch Zuflucht zur Erkenntnistheorie. Man bedeutet uns, dass kein Unterschied zu machen sei zwischen dem wirklichen Zustand des Naturobjekts und dem, was ich darüber weiss, oder besser, vielleicht dem, was ich darüber wissen kann, wenn ich mir Mühe gebe. Wirklich – so sagt man – sind ja eigentlich nur Wahrnehmungen, Beobachtungen, Messungen. ... Man lässt den naiven Realismus fahren und stürzt sich direkt auf die unbezweifelbare These, dass wirklich (für den Physiker) nur die Beobachtung ist. ... [Wir sehen uns gezwungen], vom Schreibtisch aus zu diktieren, welche Messungen prinzipiell möglich sind“ (Schrödinger 1935, zit. nach Baumann/Sexl 1987, S. 108/109).

7. Heutige Beurteilung der Debatte

Ein flüchtiger Blick ins Sachregister des 2012 erschienen Buches *Philosophie der Physik* (Esfeld 2012a) zeigt je einen einzigen Verweis zu den Stichwörtern *Kopenhagener Deutung* und *Komplementarität*, hingegen 35 Verweise zu *Kausalität*. Niels Bohrs geistiges Erbe scheint bei den jüngeren Wissenschaftstheoretikern nicht hoch im Trend zu liegen. Mir scheint, dass im Diskurs der Wissenschaftsphilosophie eine konservative Wende stattgefunden habe. So kritisiert der bereits zitierte Carsten Held den Begriff des Messens als hochproblematisch – und das mit Recht. Aber dann fragt er (Held 2012, S. 77):

⁷ In einem „Ensemble-Experiment“ wie etwa dem Doppelspalt werden mehrere Messgrössen (mehrere Einschläge der Elektronen auf dem Schirm) festgestellt.

„Wie kann in den Grundlagen einer fundamentalen physikalischen Theorie, die beschreiben soll, wie die von Beobachtern unabhängig existierende Welt wirklich ist, ein solcher Bezug auf den Beobachter vorkommen?“

Carsten Helds selbstverständliche Annahme einer vom wahrnehmenden Subjekt unabhängig existierenden Welt deckt sich ja fast wörtlich mit Einsteins Glaubensbekenntnis. Und dieses war ja sein schwerwiegendster Einwand gegen die Quantenmechanik!

Noch radikaler für Einstein und gegen Bohr argumentieren Detlef Dürr⁸ und Dustin Lazarovici in ihrem feurigen Plädoyer für die Bohmsche Mechanik (Dürr / Lazarovici, 2012):

1951 hat David Bohm eine Mechanik entwickelt, die den Formalismus der Quantenmechanik beibehält (Bohm 1952). Die Bohmsche Mechanik ist aber deterministisch und beruht auf dem Postulat einer objektiven Realität. Die ontologischen („verborgenen“) Variablen sind scharf bestimmte Orte von Punktteilchen und deren Bahnen im physikalischen Raum. Die Wellenfunktion spielt die Rolle eines Führungsfeldes dieser Teilchen⁹. In der Bohmschen Mechanik gibt es weder einen Kollaps der Zustandsfunktion noch ein Messproblem. Das wäre doch genau die Theorie, wie Einstein sie sich als Basis der Quantenmechanik wünschte.

Beinahe, denn wie die Quantenmechanik liefert auch die Bohmsche Mechanik eine nichtlokale Beschreibung der Natur. Alle Teilchen eines physikalischen Systems werden zugleich und miteinander geführt. Und es ist einzig die Frage nach der Nichtlokalität von der – gemäss Dürr und Lazarovici – die Bellsche Ungleichung von 1964 handelt. Die wichtigsten Experimente, die seit 1982 durchgeführt werden, um die Frage nach der Lokalität zu klären, sind Variationen des EPR-Experiments und haben bis jetzt ausnahmslos die Nichtlokalität der physikalischen Welt bestätigt. Für die jüngeren Theoretiker irrte Einstein einzig und allein in seinem Beharren auf dem Lokalitätsprinzip.

Wie auch immer, eins steht fest: Trotz aller oft getadelter und oft bespöttelter Starrköpfigkeit kann Einsteins Einfluss auf die Entwicklung der Interpretation der Quantenmechanik kaum überschätzt werden. Darum habe er das Schlusswort (Einstein 1949, S. 551):

„Richtig streiten kann man nur mit seinen Brüdern und nahen Freunden; die andern sind einem zu fremd.“

Literatur

AUDRETSCH, JÜRGEN (Hg., 2002): *Verschränkte Welt – Faszination der Quanten*, Weinheim: Wiley_VCH.

BAUMANN, KURT UND SEXL ROMAN U. (1987): *Die Deutung der Quantentheorie*, Braunschweig: Vieweg, 3. Aufl.

BOHM, DAVID (1952): *Vorschlag einer Deutung der Quantentheorie durch „verborgene“ Variable*. In Baumann/Sexl 1987, S163-192.

BOHR, NIELS (1935): *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* Phys. Rev **48**, 696-702 (1935). In deutscher Übersetzung: BAUMANN/SEXL 1987, S. 87 ff).

BOHR, NIELS (1949): *Diskussion mit Einstein über erkenntnistheoretische Probleme der Atomphysik*. In: Schilpp (1979), S. 115-150.

BOHR, NIELS (1985): *Atomphysik und menschliche Erkenntnis*, Braunschweig: Vieweg

⁸ Detlef Dürr ist nicht zu verwechseln mit Hans-Peter Dürr, dem bekannten Schüler Heisenbergs.

⁹ Die Idee des Führungsfeldes geht auf Prince Louis de Broglie zurück.

BORN, MAX (1926): *Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge*, Z. Physik **37**, 863-867. In: Baumann/Sexl 1987, S. 48-52.

DÜRR, DETLEF und LAZAROVICI, DUSTIN (2012): *Quantenphysik ohne Quantenphilosophie*. In: Esfeld 2012a, S. 110-134).

EINSTEIN, ALBERT; PODOLSKY BORIS; ROSEN, NATHAN (1935): *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* Phys. Rev **47**, 777-780 (1935); in deutscher Übersetzung: BAUMANN/SEXL 1987, S. 80 ff).

EINSTEIN, ALBERT (1936): *Physik und Realität*, The Journal of the Franklin Institute 221, No 3.

EINSTEIN, ALBERT (1946): *Autobiographisches*. In: Schilpp (1979), S. 493-511.

EINSTEIN, ALBERT (1949): *Bemerkungen zu den in diesem Bande vereinigten Arbeiten*. In: Schilpp (1979), S. 493-511.

EINSTEIN, ALBERT / BORN HEDWIG UND MAX (1969): *Briefwechsel*, München, Nymphenburger Verlagshandlung.

ESFELD, MICHAEL (2002): *Quantentheorie: Herausforderung an die Philosophie!* In Audretsch 2002, S 198-217.

ESFELD, MICHAEL (Hg., 2012a): *Philosophie der Physik*, Berlin: Suhrkamp stw 2033.

ESFELD, MICHAEL (2012b): *Das Messproblem in der Quantenmechanik heute: Übersicht und Bewertung*. In: Esfeld 2012a, S. 88-109.

FISCHER, ERST PETER (2012). *Niels Bohr – Physiker und Philosoph des Atomzeitalters*, München: Siedler.

HELD, CARSTEN (1999): *Die Bohr-Einstein-Debatte*. Paderborn: Mentis.

HELD, CARSTEN (2002): *Die Bohr-Einstein-Debatte und das Grundproblem der Quantenmechanik*. In: Audretsch 2002, S.55-75.

HELD, CARSTEN (2012): *Die Struktur der Quantenmechanik*. In Esfeld 2012a, S. 7187.

KUMAR, MANJIT (2009): *Quanten – Einstein, Bohr und die grosse Debatte über das Wesen der Wirklichkeit*, Berlin: Berlin-Verlag.

PRIMAS, HANS (1992): *Umdenken in der Naturwissenschaft*, GAIA I no. 1, S. 5-15. Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 137/1: S. 51/52.

SCHILPP, PAUL ARTHUR (1979): *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*, Braunschweig: Vieweg.

SCHRÖDINGER, ERWIN: *Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik*, Die Naturwissenschaften **23**, 807-812, 823-828, 844-849. Auch in: Baumann/Sexl 1987 S. 98-129.

Anhang 1: Bohrs Rechnung zu Einsteins Kastenexperiment:

- Δm : Unschärfe der Massenbestimmung des entwichenen Photons $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$.
 - Δx : Genauigkeit des Zeigerausschlags der Federwaage, mit welcher der Kasten gewogen wird.
 - Heisenberg: $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$
 - $\Delta p_x < T \cdot g \cdot \Delta m$ (Gesamtimpulsänderung während des Wägeintervalls T);
 - Heisenberg-Relation: $T \cdot g \cdot \Delta m \cdot \Delta x > h$.
 - Gangunterschied der Uhr im Gravitationsfeld $\Delta T = T \cdot g \cdot \Delta x / c^2$ (wird nachfolgend hergeleitet).
 - Nach Δx auflösen: $\Delta x = \Delta T \cdot c^2 / Tg$ in $T \cdot g \cdot \Delta m \cdot \Delta x > h$ einsetzen:
 - $T \cdot g \cdot \Delta m \cdot \Delta T \cdot c^2 / Tg = \Delta m \cdot \Delta T \cdot c^2 > h \Rightarrow \Delta E \cdot \Delta T > h$.
- (Held 1999, S. 87)

Die Herleitung der Ungenauigkeit ΔT einer Uhr im Gravitationsfeld erfolgt am einfachsten mit Hilfe einer Lichtuhr (wieder ein Gedankenexperiment):

- Hubarbeit eines Photons über die Höhe Δx : $h \cdot \Delta v = -mg \cdot \Delta x$; $m = E/c^2 = hv/c^2$.
- $v = 1/T \quad dv/dT = -1/T^2 \Rightarrow dv = -(1/T^2) dT \Rightarrow \Delta v \approx -(1/T^2) \Delta T$
- $-h \cdot (1/T^2) \cdot \Delta T = - (hv/c^2) \cdot g \cdot \Delta x = - (h/Tc^2) \cdot g \cdot \Delta x \Rightarrow \Delta T = T \cdot g \cdot \Delta x / c^2$.

Anhang 2: Scharfe Werte im EPR-Experiment

Im EPR-Experiment haben $p_1 + p_2$ und $x_1 - x_2$ scharfe Werte:

Bei der Herleitung lassen wir uns von Niels Bohr führen, weil dieser – anders als gewisse Autoren von Lehrbüchern zur Quantenmechanik – stets ein Gespür für möglichst einfache mathematische Formulierungen hatte:

„Im Quantenformalismus werden die Größen, die den Zustand eines physikalischen Systems bestimmen, durch symbolische Operatoren ersetzt, die einem nicht-kommutativen Algorithmus unterworfen sind, der die Plancksche Konstante enthält“ (Bohr 1958, in: Baumann/Sexl 1987, S. 158):

- x-Komponente des Impulsoperators: $p_x = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial x}$
- Der Ortsoperator ist schlicht eine Multiplikation mit der Koordinate x.

Bei gemeinsamer Anwendung der Operatoren p_x und x auf die Zustandsfunktion spielt die Reihenfolge eine Rolle:

$$(x p_x) \Psi = x \cdot \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad \text{aber} \quad (p_x x) \Psi = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial x}{\partial x} \Psi + x \cdot \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

Definition des Kommutators zweier beliebiger linearer Operatoren A und B:

$$[A, B] = (AB - BA) = -[B, A].$$

$$[p_x, x] \Psi = \frac{h}{2\pi i} \Psi + x \cdot \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial \Psi}{\partial x} - x \cdot \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \Rightarrow [p_x, x] = \frac{h}{2\pi i}$$

Für 2 Teilchen sind die 4 Kommutatoren:

$$[p_1, x_1] = \frac{\hbar}{2\pi i}; \quad [p_2, x_2] = \frac{\hbar}{2\pi i}; \quad [p_1, x_2] = 0; \quad [p_2, x_1] = 0. \quad (\text{Bem.: } \frac{\partial x_1}{\partial x_2} = \frac{\partial x_2}{\partial x_1} = 0).$$

$$[p_1 + p_2, x_1 - x_2] = p_1 x_1 - p_1 x_2 + p_2 x_1 - p_2 x_2 - x_1 p_1 - x_1 p_2 + x_2 p_1 + x_2 p_2 ;$$

$$[p_1 + p_2, x_1 - x_2] = [p_1, x_1] - [p_2, x_2] - [p_1, x_2] + [p_2, x_1] = 0 .$$

Wieder zu Bohr:

„Die begrenzte Vertauschbarkeit der Symbole A, B ..., durch welche die Variablen im Quantenformalismus dargestellt werden (d.h. wenn also $[A, B] \neq 0$), entspricht der gegenseitigen Ausschliessung der Versuchsanordnungen, die für ihre eindeutige Definition unentbehrlich sind“ (Baumann/Sexl, S. 160).

Im EPR-Experiment sind also $p_1 + p_2$ und $x_1 - x_2$ vertauschbar und damit gleichzeitig definiert und können gleichzeitig scharfe Werte haben. Misst man nun z.B. p_1 , so kann p_2 sicher vorhergesagt werden, x_2 ist dagegen gar nicht definiert. Misst man x_1 , so kann x_2 sicher vorhergesagt werden und p_2 ist nicht definiert – unabhängig davon, wie weit die beiden Teilsysteme voneinander entfernt sind.