

Vortrag zum EPR-Paradoxon

von Natalie Romanov

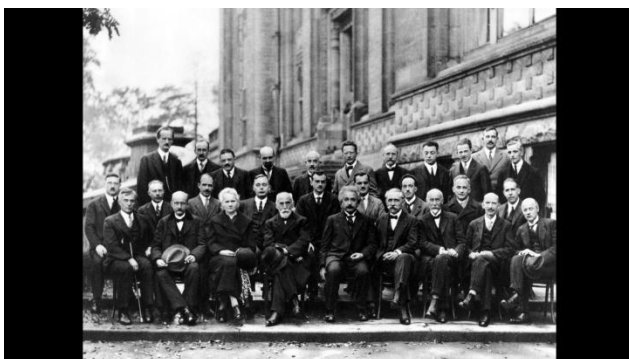
Meine Aufgabe heute besteht darin Ihnen etwas über das EPR-Paradoxon zu erzählen, wobei ich gleich sagen muss, dass ich diese Präsentation im letzten Sommersemester für das Seminar „Quantenphysik ohne Formeln“ designt habe. Dementsprechend sind auch keine Formeln erwähnt und es ist relativ einfach gehalten.

So, also zu jetzt zu diesem ominösen Paradoxon. Alles beginnt wieder mal mit der Interpretation der Quantenmechanik, die von Niels Bohr und Heisenberg ausgearbeitet wurde- der **Kopenhagener Deutung**. Von der Mathematik her beruht sie hauptsächlich auf der Heisenbergschen Unschärferelation und der Bornschen Wahrscheinlichkeitsregel, was auch zugleich ihren indeterministischen Charakter für alle Quantenphänomene verleiht. Allein durch die Heisenbergsche Unschärferelation wissen wir ja, dass wir den Ort und den Impuls eines Teilchens nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmen können. Das kann der gesunde Menschenverstand ja noch irgendwie akzeptieren, schwierig wirds dann bei den philosophischen Implikationen, die Heisenberg da heraufbeschwört hat.

Was ist denn dann die physikalische Realität?

Laut Woody Allen besteht die Realität darin, dass er zuviel für seinen Teppich bezahlt hat, wenn sowieso alles Illusion ist. Im Endeffekt läuft es darauf hinaus, dass wir nur etwas als real erachten können, wenn wir einem gemessenen Parameter eine Wahrscheinlichkeit von 1 zuteilen können, also mit Sicherheit aussagen können, dass es existiert. Sollte das nicht so sein- eben im Falle eines Nicht-Beobachtens- darüber schweigt die Quantenmechanik. Was man natürlich einwenden könnte, und das hab ich dann auch

dann in meiner „Seminararbeit“ versucht zu verdeutlichen, ist, dass man ja dieses sogenannte **Realitätskriterium** auch umformulieren könnte. Es folgt ja nicht unweigerlich von der Heisenbergschen Unschärferelation, dass Ort und Impuls nicht gleichzeitig *existieren* können; diese Formel gilt ja schlussendlich nur für die *Messung* der Parameter selber. Aber genau dieses Realitätskriterium, das eigentlich für die klassische Physik gilt, ist die Basis für die weitere Diskussion, und war im Prinzip von Anfang an einer der wichtigsten Kritikpunkte an der Quantenphysik.



In der Tat war es in den Anfängen so, dass nicht alle bedeutenden Vertreter der Physik mit den neuen Ideen einverstanden waren: Schrödinger, Planck und Einstein waren die „alten Herren“, die ständig irgendwelche Einwände hatten. Als sich dann 1927 die berühmtesten Physiker dieser Zeit in der **Solvay-Konferenz** trafen, war das der Moment, wo eine der größten Debatten in der Quantenmechanik aufkam, nämlich die Einstein-

Bohr-Debatte. Ich sag gleich, dass Bohr von den anderen Vertretern der Quantenphysik mehr oder weniger

zum „Verteidiger der Quantentheorie“ ausgewählt wurde- ob er wollte oder nicht-, also immer wenn ein provokanter Artikel im Physical Review erschien, der etwas in dieser Hinsicht bemängelte, musste der arme Bohr darauf antworten. Die schrecklichsten Angriffe kamen seitens Einstein; Wolfgang Pauli hat sich dazu auch geäußert: Er hat gemeint, dass jedes Mal wenn Einstein einen Artikel im Physical Review veröffentlicht, dass eine geistige Katastrophe bei den Kollegen auslöst. Bei der Konferenz selbst konnte Einstein noch nicht mit großartigen Argumenten auftrumpfen, es war- wie er selbst sagte- eine innere Stimme, die ihm sagte, dass etwas nicht stimmt, wenn Bohr voller Stolz behauptet, dass die Quantenmechanik bereits eine *vollständige* Theorie sei. Es war also diese **Vollständigkeit**, die Bohr angesprochen hat, und die Einstein zum Stutzen brachte. Und das kann man ja auch durchaus verstehen:

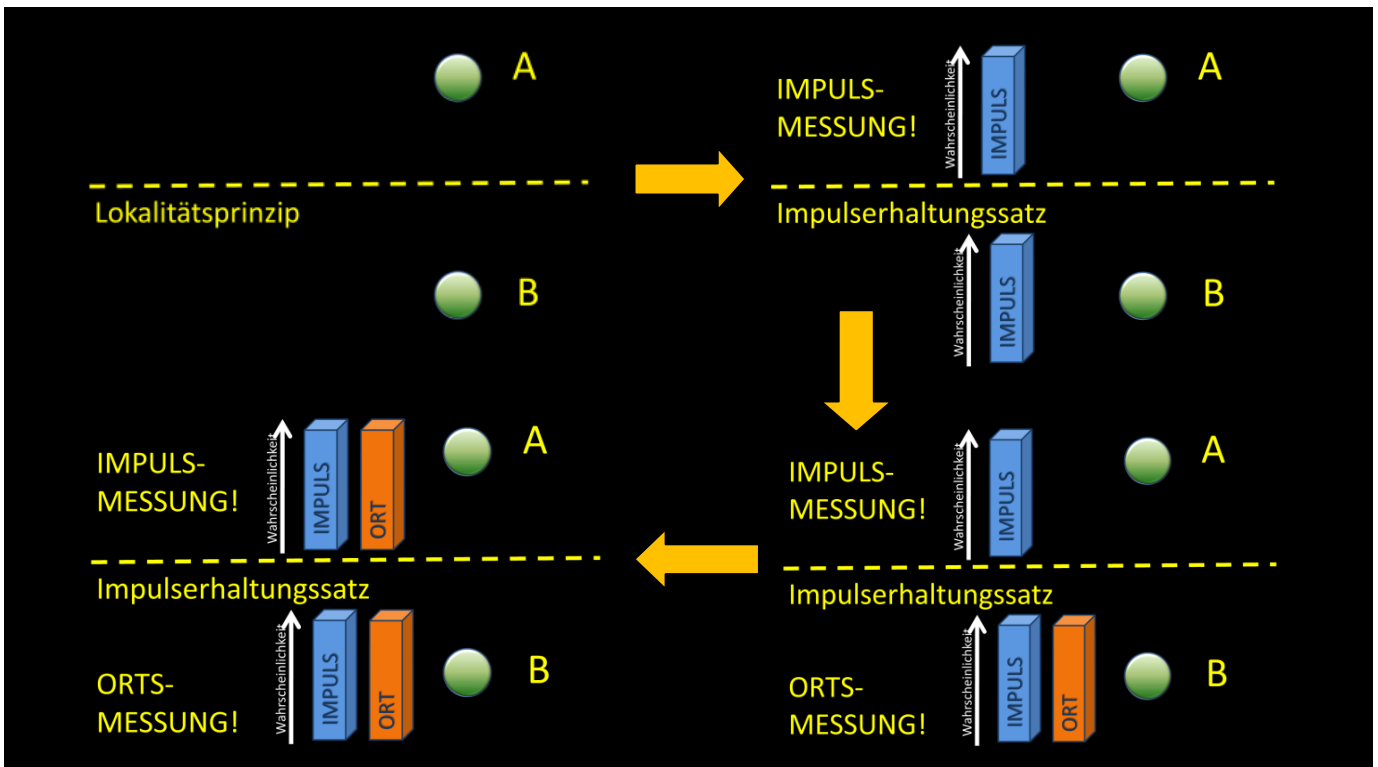
Wie kann die Theorie vollständig sein, wenn sie doch in so vielen Punkten dem naturwissenschaftlichen Weltbild widerspricht?



Dazu nenne ich nur einige Kritikpunkte, die Einstein im Laufe dieser Debatte aufgebracht haben: Da wäre mal das Realitätskriterium, von dem ich vorher gesprochen habe. Eine realistische Theorie, so wie wir sie alle kennen (und lieben)- beruht darauf, dass wir aus einigen untersuchten Fällen auf die Gesamtheit schließen können; wenn es aber jetzt- laut Quantenmechanik- dazukommt, dass ich

das, was ich nicht beobachte, als nicht real behandeln muss, so kann es sich auch nicht um eine Theorie handeln. Mit anderen Worten: Das *Induktionsprinzip* würde einfach nicht mehr anwendbar sein. So, was noch? Der objektive Zufall- grundsätzlich müssen wir davon ausgehen, dass selbst das Werfen einer Münze nicht nur reiner Zufall ist- da spielt ja alles mit, Windzug, die Art, wie du die Münze hältst, die Technik mit der man sie wirft—es ist quasi nur scheinbarer Zufall. Der sog. objektive Zufall ist aber absolut, d.h. nichts führt dazu, dass dieses Ergebnis- eben der Kollaps der Wellenfunktion- zufällig erscheint, sondern es ist tatsächlich zufällig. Und jetzt kommt das Essentielle: Einstein hat trotz allem gesehen, dass die Mathematik hinter der Quantentheorie und die Ergebnisse der entsprechenden Experimente tatsächlich funktionieren; das Ganze zu verwerfen wäre hinrissig. Ob die Quantentheorie jedoch bereits vollständig ist, ist eine andere Sache: All diese Wissenschaftler haben sich ständig Briefe geschrieben, wobei Einstein besonders seine Korrespondenz mit Herrn Schrödinger schätzte. Und im Laufe dieses Briefwechsels ist ein Gedankenexperiment von Einstein entstanden, wo eine explosionsfähige Substanz in einer geschlossenen Box entweder explodiert ist oder eben nicht explodiert ist. Schrödinger hat daraufhin geantwortet: „Du, ich hab ein noch lustigeres Gedankenexperiment aufgestellt.“- und dann kam eben Schrödingers Katze.

Das waren jetzt mal grob die wichtigsten Kritikpunkte von Einstein und mit dem Ziel v.a. die Vollständigkeit mit guter Argumentation anzuzweifeln ersann er sich dann mit seinen postdoc-Kollegen Podolsky und Rosen das sogenannte EPR-Paradoxon. Ok, folgendes **Gedankenexperiment** (siehe nächste Seite): Wir haben ein größeres Teilchen in einem geschlossenen System, das in genau zwei Teilchen A und B zerfällt, die ab dem Zerfall nicht mehr miteinander wechselwirken und in unterschiedliche Richtungen davonfliegen. Was passiert jetzt, wenn ich den Impuls von A messe? Gemäß Heisenberg kann ich den Impuls von A 100%ig bestimmen, weiß aber dann nicht über den Ort des Teilchens Bescheid. Ok, schön und gut, aber da der Impulserhaltungssatz gilt, kann ich doch- wenn ich den Impuls von A sicher kenne, den Impuls von B bestimmen, ebenfalls mit einer 100%igen Wahrscheinlichkeit. Ihr seht schon auf was das hinausläuft: Ich habe noch keine Messung an Teilchen B durchgeführt; wenn ich jetzt die Koordinate hier bestimme mit Wahrscheinlichkeit von 1, dann kann ich- weil ja der Erhaltungssatz gilt- die genaue Koordinate von Teilchen A bestimmen. Also das Schockierende an diesem Experiment ist, dass der Beobachter offenbar dazu fähig ist bei jedem Teilchen mit einer 100%igen Wahrscheinlichkeit sowohl den Impuls als auch den Ort zu messen; es werden beiden Parameter zwei völlig reale Werte zugeteilt.



Und dann kam die provokante Schlussfolgerung:

We are thus forced to conclude that the quantum-mechanical description of physical reality given by wave functions is not complete.

Und wie auch im Übrigen zu erwarten war, hat der Text natürlich viele Geister aufgewühlt; sogar Einstein selbst hat diesen Artikel nicht kommen sehen: Es war eigentlich so, dass er mit Podolsky und Rosen über das Problem geredet hat, Podolsky aber dann die Schreibe übernahm, und irgendwie im Endeffekt nicht ganz das rausgekommen ist, was Einstein ursprünglich mit seiner Argumentation bezwecken wollte. Er hat dann sogar wieder in einem Brief an Schrödinger gemeint: „Ja, dieses Gedankenexperiment ist ja schön und gut, aber das man inkompatible Parameter zugleich mit der Wahrscheinlichkeit 1 bestimmen kann, das ist mir wurst.“ Und das mit dem „wurst“, das war jetzt zitiert; da war er nicht mehr sehr förmlich 😊. Bevor wir jetzt allerdings über Einsteins Argumentation reden, sollten wir dieses EPR-Experiment nicht einfach so dastehen lassen, als mögliches Gegenargument zur Heisenbergschen Unschärferelation: Im Internet meinen dann einige, dass dieses EPR-Argument gegen die Heisenbergsche Unschärferelation spricht, und das ist einfach falsch! Denn die eigentliche Unschärferelation bezieht sich ja auf eine Messung, die auf ein Quantenobjekt durchgezogen wird; in diesem Experiment gilt dies für jedes Teilchen, nur das man mehr Parameter über Voraussagen mit dem Erhaltungssatz ebenfalls sehr präzise bestimmen kann. Das eigentlich Paradoxe an diesem Experiment- und das ist dann das, was Einstein später weitaus mehr betonte- das kommt erst zustande, wenn wir berücksichtigen, dass beide Systeme sowohl A als auch B sich mit Wellenfunktionen beschreiben lassen sollen, also nur mit Wahrscheinlichkeiten. Und dabei können sie allerdings jeweils zwei zu 100% definierte Parameter aufweisen!

Einstein ist mit Bohr ca. 20 Jahre im Disput gewesen, ob es nun richtig ist, dass die Wellenfunktion eine ausreichende Beschreibung für ein Quantensystem liefert oder ob wir vielleicht annehmen könnten, dass es sozusagen eine deterministische Subebene gibt, die die ganzen komischen Phänomene erklärt. So hat er sich gefragt: Wie kann es sein- jetzt im übertragenen Sinne- dass die Wellenfunktion in B obwohl die Messung in A erfolgt auf einmal kollabiert? Mit anderen Worten: Warum vergisst die Wellenfunktion in B

auf einmal ihre tollen Wahrscheinlichkeitsfunktionen, nur weil eine Messung in A durchgeführt wird? Betrachten wir uns also eben nur einen einzigen Parameter- den Impuls des Teilchens. Wenn wir nicht von einer überschnellen informationsübertragung ausgehen wollen, dann müssen wir annehmen, dass noch bevor die Messung in A erfolgt, B bereits einen definitiven Impuls besitzt. Aber jetzt kommt der Haken: Wie

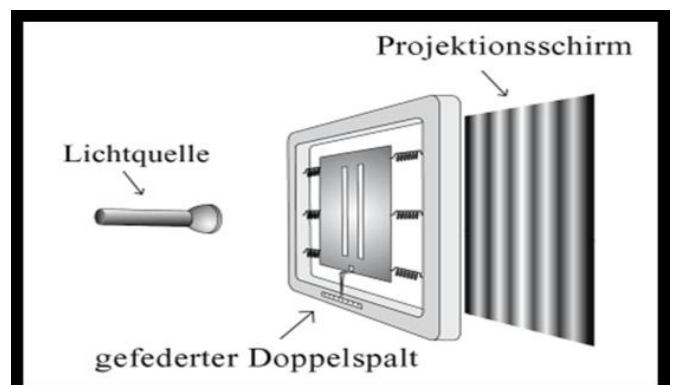


geht das, wenn doch die Wellenfunktion B ja erst einen definitiven Impuls annehmen kann, wenn eine Messung am System B gemacht wurde? Wenn also die Quantenmechanik wirklich wahr wäre, dann muss es eine „geisterhafte“ **Fernwirkung** geben, tja und das hat Einstein überhaupt nicht gefallen. Das ist dann auch der Moment, wo die sog. verborgenen Variablen ins Spiel kommen, also irgendwelche Größen, mit deren Hilfe der Zufall in der nicht-deterministischen Standardinterpretation erklärt werden kann, de facto der Windzug beim Münzwerfen z.B. Nur weil die

Experimentalphysiker schlicht und einfach nicht in der Lage sind, Systeme so zu präparieren, dass man diese verborgenen Variablen nicht messen kann, heißt es ja noch lange nicht, dass sie nicht existieren. Einstein hat dann noch weiter gedacht- natürlich, wie könnte es auch anders sein: Die Wellenfunktion von B müsste sozusagen noch dazu wissen, wie sie kollabieren muss, d.h. sie weiß welche Messung überhaupt durchgeführt wird in A. Es ist ja nicht so, dass wir wenn wir den Impuls in A messen, den genauen Ort vom Teilchen B erhalten, sondern Teilchen B „weiß“, dass es jetzt einen definitiven Impuls haben muss. Woher? Auch schon wieder diese **spooky interaction** at distance, und unserem- in dem Sinn- lokalen Realismus vollkommen zuwider.


Stellt sich nun die berechtigte Frage: Ist die Quantenmechanik überhaupt noch zu retten? Niels Bohr musste sich schnell Argumente gegen Einsteins Einwürfe überlegen; es war zwar klar, dass die Quantentheorie gut fundiert ist und auch vieles mit ihr erklärt werden konnte, aber es gab dann z.B. dieses Paradoxon und da wurden die konservativen Wissenschaftler natürlich stutzig. Bohrs Antwort kam auch sofort, aber der Artikel war schwer zu deuten- ist ja auch klar, es sind Konzepte dargelegt, die gegen jeden gesunden Menschenverstand sind, gegen jedes Ursache- Wirkungs-Prinzip. Aber genau dieser „gesunde Menschenverstand“ – jetzt in Form des Realitätskriteriums und der Lokalität einer Messung- stören uns laut Bohr die Quantenmechanik zu verstehen; mehr noch, wir müssen die Messung selbst ebenfalls „quantenmechanisch“ betrachten: Was heißt das? Betrachten wir mal wieder unser altbewährtes **Doppelspaltexperiment**: Auch wenn hier ein Elektron durchfliegt, müssen wir berücksichtigen, dass der

Impulserhaltungssatz gilt, d.h. das Elektron weist einen Impuls auf, aber in die andere Richtung gibt es auch einen Rückstoß auf den Doppelspalt oder halt die Maske. Natürlich wird das ganze Ding nicht erschüttert, wenn ein lächerliches Elektron durchfliegt, also in klassischen Experimenten könnten wir diese Impulsänderung ruhig vernachlässigen. Wenn wir aber nun fähig wären, diesen Impuls an der Maske zu messen, dann könnten wir doch- ohne das Interferenzmuster zu



stören- mehr über das Teilchen herausfinden, als die Wellenfunktion uns verrät. Und das würde dann auf jeden Fall der Quantentheorie widersprechen. Naja, aber wenn wir jetzt so eine empfindliche Apparatur aufbauen, die auf ein sooo kleines Teilchen- wie ein Elektron- reagiert- so über sensible Metallfedern- dann können wir diese Messapparatur selbst nicht mehr als klassisch betrachten; es wird auch ein Quantenobjekt. Und für jedes Quantenobjekt gilt die Heißenbergsche Unschärferelation, also damit wir diesen Doppelspalt wirklich genau fixieren wollen, x auf 100% sozusagen bringen, wird uns das Ding hin- und herzappeln wie wild, weil der Impuls ja verändert wird durch solch eine Interaktion!

Im Endeffekt läuft es also darauf hinaus, dass Bohr und Einstein in vielerlei Hinsicht aneinander vorbeigeredet haben: Während Einstein immer noch von einer Realität ausgeht, die unabhängig vom Beobachter existiert, geht Bohr davon aus, dass dieser Realitätsbegriff völlig umgestaltet werden muss weil allein schon die Mess-Apparatur zu einem Quantenobjekt wird. Der Dialog eskaliert mit Einsteins weltberühmter Aussage: **GOD DOES NOT PLAY DICE!** Unterschiedliche Reaktionen sind bekannt: Bohr mit



Bohr: Who are you to tell God what to do?

Hawking: God does not play dice, but sometimes throws them where they cannot be seen :)

Pratchett: God does not play dice; it's rather a complex version of poker in a pitch-dark room, with blank cards, for infinite stakes, with a Dealer, who won't tell you the rules and who smiles all the time :D

„WHO ARE YOU TO TELL GOD WHAT TO DO?“ Hawking wiederum meint dazu: “God does not only play dice, but sometimes throws them where they cannot be seen.” und Terry Pratchett weist in seiner literarischen Ironie auf folgendes hin: “God does not play dice with the universe; it's rather a complex version of poker in a pitch-dark room, with blank cards, for infinite stakes, with a Dealer, who won't tell you the rules and who smiles all the time.” Und zu dieser Zitatsammlung hier möchte ich ehrlich gesagt nichts mehr hinzufügen 😊