

Physiker auf der Suche nach der Wirklichkeit

Zur Deutung des
Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxons

Ich möchte mich heute ganz unphilosophisch mit einem spezifischen Problem auseinandersetzen, von dem ich persönlich glaube, daß es ein Problem zumindest für die Physiker ist. Hierzu interessiert mich die Reaktion der Philosophen.

Der amerikanische Physiker David Mermin fragt in seinem schönen Buch "Boojums all the way through": "Ist der Mond da, wenn niemand hinschaut?" Ist der Mond also da, unabhängig davon, ob ihn jemand beobachtet? Die Frage lenkt meiner Meinung nach die Aufmerksamkeit auf einen Konfliktfall zwischen verschiedenen Spielregeln. Die Quantenmechanik liefert gewisse Spielregeln dafür, wie wir die Natur zu beschreiben haben. Ich sage absichtlich nicht: wie wir sie zu verstehen haben. Es gibt auch andere Spielregeln, grundlegendere als die aus der Quantenmechanik bekannten. Und zwischen den verschiedenen Spielregeln gibt es einen Konflikt.

Das Doppelspaltexperiment und das Problem

Die Quantenmechanik entstand im ersten Drittel unseres Jahrhunderts. Sie ist sicherlich einer der Eckpfeiler unserer heutigen Physik. Soviel gleich vorweg: Mit der Quantenmechanik gibt es, was ihre Richtigkeit betrifft, keinerlei Probleme. Es ist die phantastischste Theorie, die der Mensch je gefunden hat, was die Genauigkeit der experimentellen Vorhersagen anbelangt. Zahllose Experimente über viele Größenordnungen - vom Bereich des Kleinsten, den Elementarteilchen, bis zur Kosmologie - bestätigen die Vorhersagen. Es gibt bis heute kein einziges Experiment, das mit dieser Theorie in Konflikt geraten wäre. Die Quantenmechanik wirft jedoch auch Probleme auf.

Die Probleme der Quantenmechanik sind Fragen des Verstehens in einem ganz gewöhnlichen Sinne. Wie kann man verstehen, warum die Welt so eigenartig ist, wie die Quantentheorie es uns vorschreibt? Einer der ersten, der diese Probleme formuliert hat, war Albert Einstein. Bereits um 1910, also bevor die moderne Quantenmechanik tatsächlich etabliert war, begann er, sein Unbehagen über die neue Theorie zu formulieren. Der Erläuterung, worin dieses Unbehagen besteht, möchte ich vorausschicken, daß Einstein durchaus ein Berufener ist, um über Quantenphysik zu sprechen. Er hat, was viele nicht wissen, seinen Nobelpreis nicht für die Relativitätstheorie bekommen, sondern für einen Beitrag zur Quantenphysik. Einsteins Unbehagen beginnt damit, daß er der erste ist, der erkennt, daß in der Quantenmechanik der Zufall eine Rolle spielt, die über die Rolle des Zufalls in der klassischen Physik hinausgeht. Und die Rolle, die der Zufall in der Quantenmechanik spielt, möchte Einstein aus sehr grundsätzlichen Erwägungen heraus nicht akzeptieren.

Ich möchte Ihnen das an einem Beispiel erläutern: Eines der zentralen Experimente in der Quantenphysik ist das berühmte Experiment zur Beugung der Flugbahn von Teilchen am Doppelspalt. Das ist etwas ganz Einfaches. Man hat

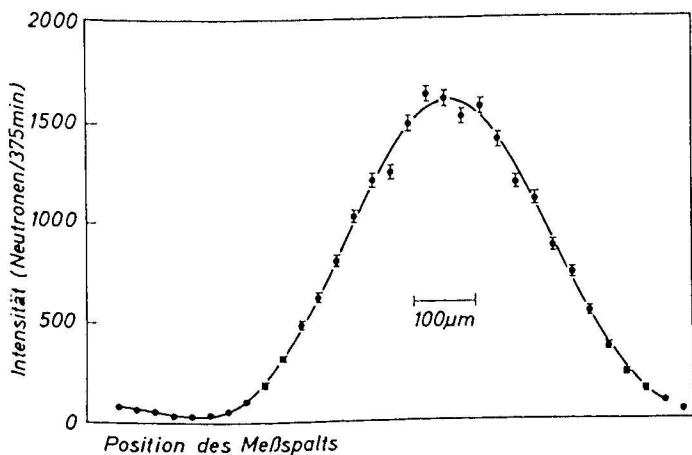


Fig. 1.: Einzelspaltverteilung

Verteilung der Neutronen auf dem Beobachtungsschirm (nach Durchtritt durch einen Einzelspalt, tatsächlich gemessen).

bewegte Teilchen, egal wie sie heißen, die von irgendwoher kommen - von woher interessiert uns auch nicht -, und auf ihrem Weg auf einen Schirm treffen, der zwei Löcher hat. Das nennt man einen Doppelspalt. Dahinter bringen wir noch einen Schirm an, einen Schirm ohne Löcher, der die Teilchen auffängt, die die Löcher des ersten Schirms passieren. Nun können unsere Teilchen, zum Beispiel Neutronen, entweder durch das eine Loch hindurchgehen oder durch das andere, und es erhebt sich die Frage: Wie sieht ihre Verteilung in der Beobachtungsebene auf dem zweiten Schirm aus? Rein naiv, solange wir diese Neutronen als Teilchen betrachten, erwarten wir, daß sie geradeaus durch einen Spalt fliegen, gegebenenfalls mit einer gewissen Streuung, weil sie etwas abgelenkt werden dadurch vielleicht, daß sie möglicherweise an den Schirm anstoßen. Die Verteilung der Teilchen nach Durchtritt durch einen Doppelspalt erwarten wir im Sinne eines klassischen Bildes, das gerade die Summe der Verteilungen zeigt, die wir für beide Spalten getrennt erwarten. Wenn beide Spalten, beide Löcher offen sind,

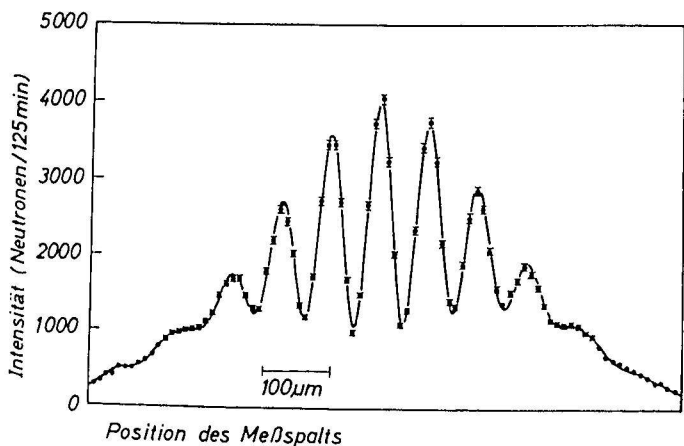


Fig. 2: Tatsächliche Doppelspaltverteilung, gemessen für Neutronen am Hochflußreaktor des Instituts Laue-Langewin in Grenoble/Frankreich.

sollte sich die Gesamtverteilung als die Summe von beiden ergeben. Nur ist die Natur eben nicht so. Die Natur ist eigenartiger.

Wenn wir das Experiment tatsächlich durchführen - es ist ein langsames Experiment von etwa 375 Minuten pro Meßpunkt -, sehen wir, wenn nur ein Spalt offen ist, die Zahl der Teilchen, der Neutronen, die in der Beobachtungsebene angekommen sind, in der Verteilung, die wir erwarten. Wird jetzt auch der zweite Spalt geöffnet, bekommen wir aber nicht die erwartete Summenverteilung, die sich aus den Verteilungen nach zwei Einzelspalten ergäbe, sondern wir bekommen etwas völlig Neues. Plötzlich gibt es Orte, an die unsere Neutronen einfach nicht mehr so gerne hingehen. Und das bloß deshalb, weil die zweite Spalte offen ist. Wie kann man das verstehen?

Verstehen in einem fundamentalen Sinn kann man es wahrscheinlich nicht. Aber man kann es formal erklären. Die Quantenmechanik sagt genau die Kurve voraus, die Sie in Fig. 2 sehen.

Für die Theorie gibt es also überhaupt kein Problem. Und man erklärt das durch das berühmte Wellenbild. Man sagt, daß die Neutronen zwar Teilchen sind, daß man ihnen aber auch eine Welleneigenschaft zuordnen kann. Eine Welle, die durch den zweiten Spalt geht, hat die Eigenschaft, daß sie eine Welle, die durch den ersten Spalt geht, an bestimmten Punkten auslöscht. Soweit so gut. Das hat mit Zufall nichts zu tun. Nun, wo kommt hier der Zufall hinein, der Einstein so sehr störte? Zufall ist, daß für ein einzelnes Teilchen, das durch einen Spalt durchgeht, in keiner Weise festgelegt ist, wo es auf meinem Beobachtungsschirm endet. Jedes einzelne Teilchen kann irgendwo hinkommen. Aber die Summe von allen Teilchen ergibt diese Interferenz. Das heißt, das eigentlich Interessante an dem Ganzen ist, daß das einzelne Teilchen im Prinzip, um das noch einmal zu wiederholen, überall hingehen kann, daß jedoch für alle Teilchen gemeinsam die Verteilung so sein muß, daß sich diese aus dem Wellenbild berechnete Verteilung ergibt. Vereinfacht ausgedrückt ist das genau das Problem, das Einstein anfangs mit der Rolle des Zufalls in der Quantenmechanik hatte. Im Rahmen des Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxons komme ich auf diese Fragen zurück.

Kurz, solch echte experimentelle Resultate zu zeigen, halte ich für notwendig, weil wir als Physiker immer über die Rolle des Experiments sprechen. Vielleicht ist es wichtig, auch einmal darauf aufmerksam zu machen, daß das, womit der Physiker zu tun hat, nicht irgendwelche esoterischen Dinge sind, die sich irgendwo in einer beschaulichen Kammer abspielen, sondern handfeste Dinge. Es sind schwere Apparate, mit denen er hantiert. Ein angesehener Experimentalphysiker meinte einmal, die wichtigste Eigenschaft des Experimentalphysikers bestehe darin, kräftig zu sein, alles andere sei sekundär. Der Physiker hantiert mit tonnenschweren Apparaten, Schrauben, Bolzen und mit Computern, die die Ergebnisse auf Papier ausdrucken. Das

alles sind Vorrichtungen, um Teilchen zu beeinflussen und zu registrieren. Da leuchten Lämpchen auf. Es wird gezählt. Und schließlich bekommt man Zahlen, das sind ausgedruckte handfeste Aussagen, nicht irgend etwas Diffuses, Unge-
naues. Allenfalls wirft dann die Interpretation dieser Aussagen Probleme auf.

Nun zum Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon. Ein Resultat des Problems, das Einstein mit der Rolle des Zufalls hatte, war der berühmte Bohr-Einstein-Dialog. Einstein versuchte, mit einer Serie wunderschöner Gedankenexperimente zu zeigen, daß die Quantentheorie nicht die letzte Antwort ist. Diese Gedankenexperimente wurden von Bohr immer sehr elegant widerlegt, so daß Einstein dann diese Argumentation aufgab und im berühmten Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon - benannt nach einer Publikation von Einstein, Podolsky und Rosen (EPR) aus dem Jahre 1935 - eine völlig neue Argumentationslinie bezog. Dieses Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon ist im Grunde sehr einfach. Einstein stellt sich die Frage, ob die Beschreibung der Natur, die die Quantentheorie liefert, eine vollständige ist. Das erscheint vielleicht als eine etwas akademische Fragestellung, aber wir werden sehen, daß es zu sehr interessanten Konsequenzen führt, die Sache durchzudenken. Wenn man eine solche Frage stellt, ob die Beschreibung der Natur durch eine Theorie vollständig ist, müssen wir uns klar werden, was wir unter Natur, Theorie und Vollständigkeit verstehen wollen.

Unter Natur verstehen wir Physiker offenkundig etwas anderes als viele andere Menschen. Die Natur ist für uns die Menge der meßbaren Erscheinungen in irgendeiner Form, wobei die Definition, wie ich glaube, je genauer sie ist, um so unpassender wird für die physikalische Praxis. Aber das sei dahingestellt. Einstein meint, wir müssen unterscheiden zwischen der Natur, den Erscheinungen und der Theorie, die die Beschreibung liefert. Vor allem aber müssen wir uns überlegen, was wir unter Vollständigkeit verstehen. Nehmen wir an, wir hätten eine bestimmte Theorie. Und nun müssen

wir in der Wirklichkeit, in der Realität, Elemente der Wirklichkeit identifizieren und sehen, was ihnen in der Theorie entspricht.

Eine Theorie ist dann vollständig, wenn jedem Element in dieser Wirklichkeit ein Element der Theorie entspricht. Ein Element der Wirklichkeit nennen wir zum Beispiel die Tatsache, daß diese Lampe auf dem Vortragspult derzeit leuchtet, oder die Tatsache, daß dieser Schirm weiß ist. Von einer vollständigen Theorie wird verlangt, daß sie Aussagen über diese Dinge enthält. Dann erhebt sich die Frage: Was sind Elemente der Wirklichkeit? Woher weiß ich, ob es ein Element der Wirklichkeit gibt? Und da kommt nun die berühmte Definition von Einstein, Podolsky und Rosen, die - wie man mittlerweile aus anderen Quellen weiß - ursprünglich von Einstein ist. Sie lautet in der zitierten Publikation folgendermaßen: "Wenn immer man den Wert einer physikalischen Größe mit Sicherheit, das heißt mit Wahrscheinlichkeit eins vorhersagen kann, dann existiert ein Element der Wirklichkeit, das dieser physikalischen Größe entspricht." Was heißt das, einfacher ausgedrückt? Wenn ich mit Sicherheit sagen kann, daß dieses Mikrophon hier steht, dann entspricht dem eben ein Element der Wirklichkeit: die Position dieses Mikrophons zum Beispiel. Die Entsprechung muß natürlich nicht absolut genau sein, sie kann innerhalb eines gewissen Intervalls vorgegeben sein. Oder: Wenn immer ich sagen kann, daß, wenn ich jetzt hinaufschau, ich dort den Mond sehe, dann entspricht dem eben ein Element der Wirklichkeit. Dann ist der Mond in diesem Sinne eben wirklich dort, und zwar unabhängig davon, ob ich tatsächlich hinschaue oder nicht. Nun, das scheint also eine, wie ich meine, sehr vernünftige Annahme zu sein, eine sehr vernünftige Definition. Sie führt aber zu gewissen Problemen, wie wir gleich sehen werden.

Einstein, Podolsky und Rosen argumentieren von dieser Definition aus weiter, daß die Quantenmechanik unvollständig sei, weil es zu gewissen Problemen kommen kann, wenn man nicht ein Teilchen, sondern zwei Teilchen betrachtet.

Ich möchte auf die Details der Originalinterpretation und -diskussion jetzt nicht so sehr eingehen, sondern Ihnen nur kurz die Essenz präsentieren: Es gibt Fälle in der Quantenphysik, wo wir zwei Teilchen haben - für Teilchen können Sie irgend etwas einsetzen, sie können vielleicht auch Bananen und Erdbeeren im Sinne von Schopper sein -, wo wir also zwei Dinge haben, die in ihren Eigenschaften auf eine interessante Weise verknüpft sind. Angenommen, wir hätten hier zwei solche Dinge, die ich "eins" und "zwei" nenne, die in ihrer Eigenschaft so definiert sind, daß sie zum Beispiel immer entgegengesetzte Geschwindigkeit haben, entgegengesetzten Impuls, und einen bestimmten wohldefinierten Abstand, daß aber nicht festgelegt ist, an welcher Position sie sind oder welchen Impuls sie besitzen.

Dann bedeutet das folgendes: Wenn ich jetzt eine Messung an einem der beiden Teilchen durchführe, zum Beispiel eine Messung, wo das Teilchen eins zu einem bestimmten Zeitpunkt ist, dann kann ich, da ich weiß, die beiden haben einen fixen Abstand, daraus die Position des Teilchens zwei schließen. Dann weiß ich sofort, wo das zweite Ding ist. Das kann ich jederzeit überprüfen. Solche Dinge darf ich auch in der Quantenmechanik machen. Das müssen Sie mir glauben, da ich Ihnen hier nicht die ganze Theorie präsentieren kann. Ich kann also jederzeit auch das entsprechende Experiment am zweiten Teilchen machen - mit entsprechend handfesten Apparaten, von denen ich zuvor gesprochen habe. Der Ort des zweiten Teilchens, sagt nun Einstein, muß ein Element der Realität sein. Er ist offenkundig festgelegt. Sobald ich am ersten Teilchen etwas messe, kann ich den entsprechenden Wert des zweiten exakt voraussagen. Und das kann ich überprüfen. Wesentlich daran ist, daß diese beiden Messungen beliebig weit voneinander entfernt sein können. Die eine Messung kann auf der Erde stattfinden und die andere vielleicht auf dem Sirius. Die Messungen selbst müssen - nach Einstein - aber unabhängig voneinander sein. Das Ergebnis hier darf nicht davon abhängen, wozu ich mich dort entscheide.

Der langen Rede kurzer Sinn: Unabhängig davon, ob ich hier den Ort des ersten Teilchens messe, liegt der Ort des zweiten Teilchens fest. Denn sobald ich diesen messe, weiß ich - nach Einsteins Argumentation - jenen auch. Nun kann ich mich entscheiden, am zweiten Teilchen nicht den Ort, sondern den Impuls zu messen, die Geschwindigkeit. Damit hätte ich zwei Dinge gleichzeitig, den Ort und den Impuls. Nun sagt die berühmte Heisenbergsche Unschärferelation: Man darf Ort und Impuls nicht gleichzeitig genau kennen. Und Einstein eben darum: "Die Quantenmechanik ist also unvollständig."

Das Theorem von John S. Bell

An spätere interessante Konsequenzen aus dieser Art der Überlegung haben Einstein, Podolsky, Rosen damals noch nicht gedacht. Diese Konsequenzen wurden aufgezeigt durch die Arbeiten von Bell, der die berühmten "Bell'schen Ungleichungen" entwickelte. Vorher hatte sich für lange Zeit die Ansicht durchgesetzt, daß die Fragen, die das EPR-Paradoxon aufgeworfen hatte, ob nämlich die Quantentheorie vollständig ist oder nicht und ob man sie ergänzen kann, ein Streiten um des Kaisers Bart ist, da man ohnehin nicht genauer messen kann als durch die Quantenmechanik vorgegeben ist. Von W. Pauli stammt das schöne Zitat: "Es hat genauso wenig Wert, sich über etwas den Kopf zu zerbrechen, das man nicht sehen kann, wie über die alte Frage, wie viele Engel auf der Spitze einer Nadel Platz hätten."

Nun kommt Bell und macht etwas Hochinteressantes. Es handelt sich sozusagen um ein Denksporträtsel. Es bedarf dazu keiner Kenntnis der Quantenmechanik. Ich baue die Argumentation in drei Stufen auf:

Erste Stufe: Nehmen wir an, wir hätten hier eine Quelle, aus der jeweils einzelne Teilchen herausfliegen. Und die fliegen entlang einer gewissen Strecke, die man durch Blenden definieren kann, bis zu einem von uns aufgestellten Apparat. Das ist ein Meßappa-

rat. Wie dieser Meßapparat intern funktioniert, interessiert uns nicht. Der Meßapparat hat aber zwei makroskopische Eigenschaften. Erstens hat er Schalter. Diesen Schalter kann man auf zwei Positionen stellen, auf die Position "O" (Oben) und "U" (Unten). Und der Apparat hat zwei Lämpchen, ein rotes und ein grünes. Wenn ein Teilchen in den Meßapparat eingetreten ist, leuchtet ein Lämpchen auf, entweder das rote oder das grüne. Wir beobachten den Apparat einige Zeit und stellen fest, daß die beiden Lämpchen nie gleichzeitig aufleuchten. Nun beginnen wir, mit dem Schalter zu spielen und versuchen festzustellen, ob wir beeinflussen können, wie oft das eine oder das andere Lämpchen aufleuchtet. In einem bestimmten Zeitintervall - wir nennen das eine Meßreihe - stellen wir fest, daß, wenn Sie den Schalter auf "O" stellen, das rote und das grüne Lämpchen ungefähr gleich oft aufleuchten:

Schalter auf "O" \rightarrow Meßreihe: R G G R G R R R G R G G usw.

Wenn Sie jetzt den Schalter auf "U" stellen, leuchtet nur das rote Lämpchen auf:

Schalter auf "U" \rightarrow Meßreihe: R R R R R R R R R R R usw.

Sie werden denken: Aha, dieser Apparat stellt offenbar eine Eigenschaft dieser Teilchen fest, die von der Quelle ausgesendet werden, eine Eigenschaft, die das rote Lämpchen aufleuchten läßt, wenn der Schalter auf "U" steht. Mit anderen Worten: Wenn der Schalter auf "U" steht, dann ist das wie die Anleitung für den Apparat: Schau nach, ob das Bananen sind. Ist die Antwort "ja",

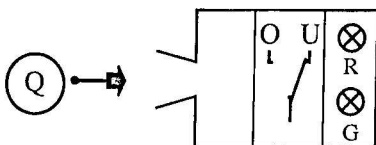


Fig. 3: Prinzipskizze des Experimentes mit einzelnen Teilchen: Die Quelle Q sendet nacheinander einzelne Teilchen aus, die von einem Meßapparat registriert werden. Der Apparat hat zwei Lämpchen "Rot" und "Grün", von denen jeweils eines leuchtet, wenn ein Teilchen registriert wurde, sowie einen Schalter mit zwei möglichen Positionen "O" und "U".

dann leuchtet das rote Lämpchen auf. Kleine Zwerge in dem Apparat überprüfen, ob es Bananen sind, und wenn es Bananen sind, schalten sie das rote Lämpchen an. Jetzt wissen Sie, da kommen also wirklich Bananen, eine Banane nach der anderen. Dem roten Lämpchen bei Schalterstellung "U" entspricht eine objektive Eigenschaft "Banane". Wir nennen es "eine objektiv realisierbare Eigenschaft". Soweit die erste Stufe der Argumentation: die Definition meines Meßapparates.¹

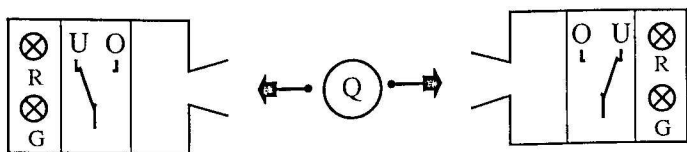


Fig. 4: Prinzipskizze eines Experimentes mit Teilchenpaaren: Die Quelle Q sendet Teilchenpaare aus, Teilchen 1 und Teilchen 2 jeweils gleichzeitig, die dann jedes in einem eigenen Meßapparat registriert werden. Im Prinzip können die Meßapparate beliebig weit voneinander und von der Quelle entfernt sein.

Zweite Stufe: Jetzt haben wir eine etwas kompliziertere Quelle, die gleichzeitig immer zwei Teilchen aussendet, sagen wir rote und blaue Bananen oder Teilchen und Antiteilchen, wie sie Herr Schopper erwähnt. Und wir haben zwei Meßapparate: Apparat 1 für Teilchen 1, Apparat 2 für Teilchen 2. Jeder wieder mit einem Schalter, jeder mit zwei Lämpchen. Wir fangen also wieder an zu spielen mit den Schaltern und machen zuerst die Beobachtung, daß die 3 Meßergebnisse jedes einzelnen Apparates, jeder für sich alleine betrachtet, keinerlei besondere Charakteristika aufweisen. An jedem der beiden Apparate leuchten nämlich, rein statistisch, mal das rote und mal das grüne Lämpchen auf, nie beide an einem Apparat gleichzeitig. Über längere Zeit beobachtet, leuchten das rote und das grüne Lämpchen etwa gleich oft an jedem der beiden

¹ Für den Physiker sei der Vollständigkeit halber erwähnt, daß wir hier angenommen haben, daß die Quelle die Teilchen in einem wohldefinierten Zustand präpariert, nämlich in einem Eigenzustand zum Apparat mit Schalterstellung "U".

Apparate auf, und dies auch noch völlig unabhängig von der Stellung des jeweiligen Schalters. Aus diesen Beobachtungen schließen wir, daß die Eigenschaften der beiden Teilchen, jedes für sich alleine betrachtet, rein statistisch verteilt sind. Wir stellen jedoch fest, daß immer gleichzeitig mit einem Lämpchen am Apparat 1 eines am Apparat 2 aufleuchtet, eine Tatsache, die wir verstehen, da ja die Quelle die Teilchen immer in Paaren aussendet. Wir beginnen nun also, uns dafür zu interessieren, welche Lämpchen jeweils gleichzeitig aufleuchten. Bringen wir zuerst die Schalter an beiden Apparaten in verschiedene Stellung, etwa den ersten Schalter in Stellung "O" und den zweiten Schalter in Stellung "U", so erhalten wir zum Beispiel folgende Meßergebnisse:

Schalter 1 auf "O" } → Meß-
 Schalter 2 auf "U" } reihe: $\begin{bmatrix} G \\ R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ G \end{bmatrix}$ usw.

wobei in einer Klammer oben das Meßergebnis am ersten Teilchen und unten das Meßergebnis am zweiten Teilchen dargestellt ist. Die erste Klammer bedeutet also, daß für das erste gemessene Teilchenpaar an Apparat 1 das grüne und an Apparat 2 das rote Lämpchen aufleuchtet. Bei Betrachtung einer längeren Meßreihe stellen wir fest, es tritt hier keine Korrelation zwischen den Meßergebnissen für beide Teilchen auf. Wir beobachten also in diesem Fall, daß, ganz egal ob wir an Apparat 1 das rote oder das grüne Lämpchen aufleuchten sehen, an Apparat 2 etwa gleich oft das rote und das grüne Lämpchen aufleuchten.

Bringen wir aber die beiden Schalter in gleiche Stellungen, so machen wir eine hochinteressante Entdeckung. Wir beobachten nun, daß, wenn die beiden Schalterpositionen gleich sind, immer ungleiche Lämpchen aufleuchten, also entweder an Apparat 1 das grüne Lämpchen und an Apparat 2 das rote Lämpchen oder umgekehrt, zum Beispiel:

Schalter 1 auf "O" } → Meß-
 Schalter 2 auf "U" } reihe: $\begin{bmatrix} R \\ G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ R \end{bmatrix}$ usw.

Der Physiker spricht hier von einer Antikorrelation. Das bedeutet beispielsweise, daß es sich um ein Teilchen-Antiteilchen Paar handelt oder daß, in Schoppers Sprache, das eine eine rote Banane, das andere eine blaue ist. Wir wissen also, wenn immer wir hier

auf der Erde an Apparat 1 eine rote Banane beobachten, dann beobachtet unser Kollege auf Sirius mit Apparat 2 eine blaue Banane. Das kann ich jederzeit überprüfen, indem ich das Meßprotokoll meines Kollegen durchsehe.

Nach Einstein kann ich also das Meßergebnis, das mit dem Apparat 2 erhalten wird, immer mit Sicherheit vorhersagen, sobald ich das Ergebnis der Messung mit Apparat 1 weiß, sofern die Schalter an beiden Apparaten in gleicher Position stehen. Diese letztere Bedingung kann selbstverständlich leicht erreicht werden, etwa dadurch, daß ich und mein Kollege auf Sirius einen genauen Zeitplan im vorhinein vereinbaren darüber, wann die Schalter in welcher Position sein müssen. Einstein, Podolsky und Rosen gehen nun weiter und fordern, daß das Meßergebnis an Teilchen 2 (d. h. Apparat 2) auch unabhängig davon sein muß, welche Messung ich an Teilchen 1 durchführe, und ebenso unabhängig davon, ob ich überhaupt eine Messung an Teilchen 1 mache. Diese Forderung ist für EPR selbstverständlich, da die beiden Messungen ja lange nach dem Aussenden der Teilchen von der Quelle stattfinden und durch beliebige Entfernungen voneinander getrennt sein können - so, daß kein Signal, das ja maximal mit Lichtgeschwindigkeit übermittelt werden kann, zwischen den beiden Apparaten ausgetauscht werden kann. Die Tatsache, daß mein Kollege auf Sirius für eine bestimmte Schalterstellung etwa "grün" erhält, liegt also fest, unabhängig davon, ob ich auf der Erde eine Messung am Teilchen 1 mit gleicher Schalterstellung durchführe oder nicht. Der Messung entspricht also ein Element der Realität. So weit, so gut.

Bisher sind wir in unserer Argumentation, in der wir strikt der Argumentationskette der EPR-Arbeit gefolgt sind, noch auf kein Problem gestoßen. Bell war der erste, der gezeigt hat, daß die konsequente Anwendung der EPR-Argumentation auf Messungen an Zweiteilchensystemen mit komplizierteren Apparaten, solchen nämlich, die mindestens 3 Schalterstellungen besitzen, in gewissen Fällen zu

einfacher zu präsentieren als die ursprünglichen Bell'schen Ungleichungen.

Wir haben also drei Apparate: 1, 2, 3, jeder wieder mit einem Schalter für "O" und "U" und mit je zwei Lämpchen, und eine Quelle, die gleichzeitig 3 Teilchen aussendet, oder Bananen in drei Farben. Und wir beobachten unsere Anordnung einige Zeit.

Zuerst bemerken wir, daß, solange wir nur einen Apparat beobachten, die Meßergebnisse, das Aufleuchten der roten oder grünen Lämpchen, wiederum rein statistisch verteilt sind, genauso, wie es oben bereits der Fall war. Also beobachten wir als Nächstes, ob ein Zusammenhang besteht zwischen dem Aufleuchten der Lämpchen an Apparat 1 und dem Aufleuchten der Lämpchen etwa an Apparat 2. In unserem Dreiteilchenfall werden wir sehen, daß es keinerlei Zusammenhang zwischen den Meßergebnissen an zwei Apparaten gibt. Es werden also an beiden Apparaten etwa gleich oft das rote und das grüne Lämpchen aufleuchten, und es gibt weder Korrelationen noch Antikorrelationen, unabhängig von den Schalterstellungen.

Wenden wir uns also der Untersuchung der Frage zu, ob es Zusammenhänge und ggf. welche es beim gleichzeitigen Aufleuchten der Lämpchen an den 3 verschiedenen Apparaten gibt. Jetzt wird die Sache natürlich komplizierter, da wir ja 3 Apparate haben, jeder mit zwei verschiedenen Schalterstellungen, also insgesamt 8 verschiedene Kombinationen. Für unsere Untersuchungen reicht es jedoch, wenn wir uns zuerst einmal auf die Fälle beschränken, in denen einer der Schalter auf "O" steht und die beiden anderen auf "U". Zum Beispiel :

Schalter 1 auf "O" }
 Schalter 2 auf "U" } →
 Schalter 3 auf "U"

→ Meßreihe: $\begin{bmatrix} R \\ G \\ G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ R \\ G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ R \\ R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ G \\ R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ R \\ G \end{bmatrix}$ usw.

Wir stellen also fest, daß wir nur folgende Arten von Ereignissen beobachten: Wenn ein Schalter auf "O" steht und die zwei anderen

auf "U", dann leuchten entweder alle drei roten Lämpchen auf, oder es leuchtet ein rotes und zwei grüne Lämpchen. Andere Kombinationen treten nicht auf. Das ist eine experimentelle Beobachtung. Was bedeutet sie?

Sobald ich die Meßergebnisse für zwei Teilchen kenne, kann ich mit Sicherheit sagen, was das Meßergebnis für das dritte Teilchen sein wird. Leuchtet zum Beispiel, wie für das erste Teilchentriplett in obiger Meßreihe, an Apparat 1 das rote Lämpchen auf und an Apparat 2 das grüne, so kann ich mit Sicherheit behaupten, daß mein Kollege da drüben an Apparat 3 das grüne Lämpchen aufleuchten sieht. Es müssen ja bei diesen Schalterstellungen entweder alle drei roten Lämpchen oder zwei grüne und ein rotes gemeinsam aufleuchten. Wie oben bereits für Zweiteilchensysteme argumentiert, muß nach EPR aus denselben Gründen das Ergebnis der Messung an Teilchen 3 wieder ein Element der Realität sein, unabhängig davon, welche Messung ich an den ersten beiden Teilchen durchführe. Dies gilt natürlich genauso für die Messungen an Teilchen 1 und 2, da ja die Reihenfolge der Messungen willkürlich ist.

Die Wirklichkeit verhält sich anders

Nun stellen wir uns eine ganz wichtige Frage: Welche Meßresultate würden wir erhalten, wenn wir andere Schalterstellungen an den Apparaten wählen würden? Sie werden jetzt vielleicht abwehren, weil das Ganze langsam unübersichtlich wird. Aber halten Sie jetzt nur noch bei einer kleinen Denksportaufgabe mit, die Sie in aller Ruhe durchdenken können.

Betrachten wir zum Beispiel alle jene Teilchentriplets, die das erste Resultat der obigen Liste ergeben, also bei den Schalterstellungen "O" am ersten Apparat das Resultat "R", bei "U" am zweiten Apparat das Resultat "G" und bei "U" am dritten Apparat auch

das Resultat "G". Wir schreiben dies in Erweiterung der obigen Schreibweise so:

$$\begin{bmatrix} R & ? \\ ? & G \\ ? & G \end{bmatrix}$$

In der ersten Spalte stehen hier die Ergebnisse für die Schalterstellung "O" und in der zweiten Spalte die Ergebnisse für die Schalterstellung "U". Für den Fall unseres Beispiels wissen wir natürlich nicht, welche Resultate bei anderen als den gewählten Schalterstellungen auftreten, daher die Fragezeichen in der Liste. Die Frage, welches Resultat wir für diese Teilchen bei anderen Schalterstellungen erhalten hätten, scheint jedoch, zumindest auf erste Sicht, durchaus legitim zu sein. Es gäbe im Prinzip eine ganze Menge Möglichkeiten, die Fragezeichen auszufüllen, jedoch erinnern wir uns daran, daß für den Fall eines Schalters auf "O" und der beiden anderen Schalter auf "U" die experimentelle Beobachtung ist, daß entweder alle 3 roten Lämpchen leuchten oder 1 rotes und 2 grüne. Sie können sich mit ein wenig Nachdenken überzeugen, daß daher die einzig möglichen Fälle die folgenden sind:

$$\begin{bmatrix} R & R \\ G & G \\ G & G \end{bmatrix} \text{ und } \begin{bmatrix} R & G \\ R & G \\ R & G \end{bmatrix}$$

Ähnliche Resultate erhalten wir, falls wir die anderen Fälle der oben angegebenen Resultatenliste für die Schalterstellungen O-U-U untersuchen. Das alles ist eine reine Denksportaufgabe und hat noch nichts spezifisch mit Physik zu tun. Sollten Sie diese tatsächlich für sich selbst zu Hause durchspielen, werden Sie erkennen, daß sich dadurch unser Endresultat nicht ändert. Was ist nun unser Endresultat? Dazu überlegen wir uns ganz einfach, welche Lämpchen an unseren Apparaten aufleuchten würden, wenn wir uns entscheiden sollten, alle 3 Schalter auf "O" zu stellen. Unser Modell, und das müssen Sie mir jetzt glauben, daß dies alle Fälle mit einschließt, sofern Sie die Möglichkeiten nicht selbst zu Hause durch-

gespielt haben, sagt also vorher (s. die Ergebnisse in der ersten Spalte der Listen), daß entweder nur ein rotes Lämpchen leuchtet und zwei grüne oder alle drei roten Lämpchen.

Soweit die Vorhersage nach unserem Modell: Entweder müssen alle drei rot sein oder eines rot und zwei grün. Wenn wir das Experiment nun tatsächlich durchführen, sehen wir aber, daß entweder alle drei grün leuchten oder zwei rot und einer grün. Das ist erstaunlich.

Warum ist das erstaunlich? Das ist deshalb erstaunlich, weil wir vorher davon ausgegangen sind, daß diese drei Messungen Messungen an Elementen der Realität sind, Messungen der Eigenschaften von Teilchen in unserem Modell, in dem wir immer, wenn wir zwei Resultate kennen, mit Sicherheit vorhersagen können, was mit dem dritten passiert ist, weil es eine festgelegte Eigenschaft hat, nämlich die Eigenschaft, daß in der entsprechenden Situation das rote oder grüne Lämpchen aufleuchtet.

Nun wurde aber plötzlich entschieden, am Meßapparat 2 und 3 etwas anderes zu messen, und am Meßapparat 1 leuchtet nicht mehr das rote, sondern das grüne Lämpchen. Nur aufgrund der Tatsache, daß meine beiden Freunde, die da draußen stehen, beide im Prinzip beliebig weit weg, sich plötzlich entscheiden, etwas anderes zu messen, kann hier nicht das rote, sondern nur das grüne Lämpchen leuchten. Die Quantenmechanik liefert den interessanten Konflikt, daß es eben objektiv realisierbare Zustände gibt, von denen ich mit der Quantenmechanik zwar mit Sicherheit sagen kann, was mein Kollege auf Sirius genau in diesem Moment beobachtet, wo ich aber dieses Meßresultat einer Eigenschaft des Teilchens, das von hier zum Sirius geflogen ist, nicht zuordnen kann.

Was bedeutet der Konflikt?

Ich habe einen Konflikt zwischen zwei Spielregeln. Die eine Spielregel ist die Spielregel der Quantenmechanik, die es mir gestattet auszurechnen, was passiert - auf dieser Ebene gibt es überhaupt kein Problem. Und die zweite Spielregel ist die Spielregel, nach der ich versuche, das Verhalten meines Apparates zu verstehen aufgrund seiner Eigenschaften und aufgrund dessen, was hier passiert, also unter Außerachtlassung dessen, was derzeit weit draußen geschieht. Der Konflikt entsteht ja nicht dadurch, daß Eigenschaften hier und dort in irgendeiner Form miteinander zusammenhängen, der Konflikt entsteht daraus, daß meine Beobachtung hier davon abhängt, welche Entscheidungen der Experimentator da draußen trifft, sie hängt davon ab, welche Messung er sich durchzuführen erlaubt und welches Resultat er dann erhält.

Was bietet sich an als Schlußfolgerung aus dem Ganzen? Was können wir lernen? Was bedeutet es? Nun, ich weiß es nicht, und ich würde wagen zu behaupten, daß es niemand weiß oder daß es - ich möchte nicht arrogant sein - vielleicht sehr wenige wissen. Es handelt sich jedoch gewiß um ein Problem. Evelyn Fox-Keller argumentiert, daß dieses Problem des Verstehens der Wirklichkeit von vielen Physikern verdrängt wird. Sie behauptet, daß es unter den Physikern Abwehrmechanismen dagegen gäbe, über solche Dinge zu diskutieren. Es gibt verschiedene Positionen, die man beziehen kann. Eine der Positionen wäre die, daß man die sogenannte Lokalitätsannahme aufgibt und sagt, meine Beobachtung hängt sehr wohl davon ab, was gleichzeitig woanders geschieht. Eine sehr radikale Position.

Eine weitere mögliche Position ist die Position Heisenbergs, der sagt, wir sollen uns eigentlich nicht den Kopf darüber zerbrechen, verstehen zu wollen, was es bedeutet. Es muß uns als Physikern reichen, die experimentellen Resultate vorhersagen, ausrechnen zu können. Man kann auch der Meinung sein, daß das Ganze überhaupt keinerlei Bedeutung hat, wie Schrödinger zum Beispiel in der Vorrede zu

seiner Weltansicht schreibt: "Hier lesen Sie nichts über Wellen, Teilchen, Raum, Zeit usw., weil ich der Meinung bin, daß das für unsere Weltansicht sehr viel weniger Bedeutung hat, als die meisten meiner Kollegen heutzutage glauben." Meine persönliche Überzeugung ist dagegen die, daß die oben diskutierte paradoxe Situation sehr wohl das Potential tiefgreifender Änderungen unseres Weltbildes in sich trägt, daß wir aber heute die Bedeutung dieser Dinge noch nicht erfaßt haben.

Ich glaube, es ist am fairsten, mit ein paar Zitaten zu schließen, die mir besonders gut gefallen und die die Komplexität und Widersprüchlichkeit der Situation recht gut beschreiben. Eines davon ist aus dem letzten bekannten Brief von Einstein an Schrödinger. Einstein war ja zeit seines Lebens der Meinung, daß es eine Wirklichkeit als Objekt der Physik gibt unabhängig davon, ob man hinschaut oder nicht, ob man ein Experiment durchführt oder nicht. In dem erwähnten Brief heißt es: "Du bist neben von Laue zur Zeit unter den Physikern der einzige, der sieht, daß man um die Setzung der Wirklichkeit nicht herumkommen kann, wenn man nur ehrlich ist... Es ist einigermaßen hart zu sehen, daß wir uns immer noch im Stadium der Wickelkinder befinden, und es ist nicht verwunderlich, daß sich die Kerle dagegen sträuben, es zuzugeben, auch sich selber." Im Stadium der Wickelkinder, so meine ich, was die Verstehbarkeit dieser Phänomene betrifft. So hat etwa auch Rabi, ein amerikanischer Nobelpreisträger für Physik, anlässlich einer Feier zum hundertsten Geburtstag von Niels Bohr, die in Cambridge in Massachusetts stattfand, in einer Diskussion erklärt: "Ich denke, wir übersehen einen wesentlichen Punkt in der Quantentheorie. Die nächste Generation wird sich an den Kopf klopfen, sobald sie diesen Punkt gefunden hat, und sagen: Wie konnten die das nur übersehen haben?" Das ist natürlich Spekulation, ob es sich bewahrheiten wird oder nicht, werden wir noch sehen.

Eine Position, die einzunehmen sicherlich vernünftiger und sozusagen auf der sicheren Seite ist, ist die Bohrs, der immer

betonte, daß wir in unserer Sprache eigentlich nur über die makroskopischen Apparate in allen Details, Bolzen, Schrauben etc. reden dürfen und uns nicht den Kopf darüber zerbrechen müssen, was dahintersteckt. Sollten wir uns doch den Kopf darüber zerbrechen, etwa über die Eigenschaften unserer Quantenteilchen, so müssen wir immer gleichzeitig den gesamten Meßapparat mitspezifizieren. Es gibt keine Eigenschaften der Quantenteilchen ohne genaue Definition des Meßapparates.

In eine ähnliche Kerbe schlagen meine zwei letzten Zitate, eines von Karl Kraus und das andere von Ludwig Wittgenstein. Beide wurden natürlich nicht im Zusammenhang mit der Quantentheorie formuliert, aber vielleicht werden Sie es mir gestatten, die Zitate auf die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik anzuwenden. Karl Kraus, ein österreichischer Schriftsteller um die Jahrhundertwende, sagt - es ist übrigens das einzige Zitat von ihm zum Stichwort Wissenschaft -: "Die Wissenschaft überbrückt nicht die Abgründe des Denkens, sie steht bloß als Warnungstafel davor. Zuwiderhandelnde haben es sich selber zuzuschreiben." Und Wittgenstein: "Wovon man nicht sprechen kann, darüber soll man schweigen."

Sich möglichst nahe an die Abgründe heranzuwagen beziehungsweise herauszufinden, wovon man noch sprechen kann und wovon nicht mehr, ist daher die uns permanent gestellte Herausforderung.

Das vorliegende Buch dokumentiert die Beiträge zu einem gleichnamigen interdisziplinären naturwissenschaftlich-philosophischen Colloquium des Kölner Lindenthal-Instituts (11. bis 13. Mai 1990). Die Ausrichtung des Colloquiums sowie die Textbearbeitung und Drucklegung des Buches erfolgten mit Förderung durch die Axel Springer Verlag AG Berlin, Bayer AG Leverkusen, Bayerische Vereinsbank AG München, Deutsche Bank AG Frankfurt, Mercedes-Benz AG Stuttgart, Rhein-Donau-Stiftung e.V. München sowie seitens privater Helfer und Förderer, denen sich das Lindenthal-Institut dankbar verpflichtet weiß.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Naturherrschaft : Wie Mensch und Welt sich in der Wissenschaft begegnen ; Colloquium, Köln 1990 ; [Beiträge zu einem gleichnamigen Interdisziplinären Naturwissenschaftlich-Philosophischen Colloquium des Kölner Lindenthal-Instituts (11.-13. Mai 1990)] / Bahnners... Hans Thomas (Hg). Lindenthal-Institut. – Herford : Busse Seewald, 1991

ISBN 3-512-03066-1

NE: Bahnners, Patrick; Thomas, Hans [Hrsg]; Interdisziplinäres Naturwissenschaftlich-Philosophisches Colloquium <1990, Köln>; Lindenthal-Institut <Köln>



Alle Rechte vorbehalten

© Lindenthal-Institut

Verlag Busse + Seewald GmbH, Herford 1991

Umschlag: Hannes Jähn

Fotos: Hartmut Vogler / Dr. Klaus Schmidt

Gesamtherstellung: Busse Druck, Herford

Printed in Germany

ISBN 3-512-03066-1

Inhaltsverzeichnis

Zur Einführung	7
<i>Herwig Schopper</i> (Genf)	
Was heißt Materie?	
Beiträge der Elementarteilchenphysik zum Weltverständnis	11
Aussprache	35
<i>Hans Thomas</i> (Lindenthal-Institut)	
Natur und Mensch - ein unvollständiges Verhältnis	51
<i>Reinhard Löw</i> (Hannover)	
Substanz oder Evolution	69
Aussprache	88
<i>Anton Zeilinger</i> (Wien)	
Physiker auf der Suche nach der Wirklichkeit	99
Aussprache	120
<i>Antoine Suarez</i> (Zürich)	
Nicht-lokale Kausalität - Weist die heutige Physik über die Physik hinaus?	131

Bahners · Bell · Küenzlen · Löw · Mittelstaedt · Pöltner
Schopper · Stehlik · Suarez · Thomas · Zeilinger

Naturherrschaft

Wie Mensch und Welt
sich in der Wissenschaft
begegnen

Hans Thomas (Hg)

Lindenthal-Institut
Colloquium · Köln 1990

Busse Seewald Herford

Hans Thomas (Hg)

Naturherrschaft

Wie Mensch und Welt
sich in der Wissenschaft
begegnen



BUSSESEEWALD