

## Indeterminismus und Nichtlokalität

Eine Vorlesung “von“ John S. Bell

J. B.: Ich mache ein Experiment: ich schieße eine kleine Kugel gegen ein (mikroskopisches) Metallgitter; ich wiederhole das Experiment stets in genau derselben Weise oftmals. Manchmal geht die Kugel durch, manchmal nicht. Ich habe eine Situation von **Unvorhersagbarkeit**. Ein klassischer Physiker (einer der die klassische Mechanik als Theorie benutzt) wird dies dadurch erklären, daß er sagt: Die Unvorhersagbarkeit ist verursacht durch einen **Mangel an Kontrolle**. Er sagt, daß ich nicht bei jedem Versuch dasselbe Experiment mache, ich sei praktisch nicht in der Lage die Kugel jedesmal im genau gleichen Anfangszustand (Ort und Impuls) zu präparieren. Die Unvorhersagbarkeit ist eine Folge dieses Mangels an Kontrolle. Die Natur ist (wie die benützte Theorie sagt) sehr wohl perfekt deterministisch, die Unvorhersagbarkeit ist eine Spiegelung meiner experimentellen Schwäche.

Student: Wir müssen wohl beide dieser Erklärung zustimmen, da wir davon ausgehen, daß das Experiment im Rahmen einer bestimmten Theorie, der **klassischen Mechanik**, beschrieben wird.

J. B.: Einverstanden. Nun betrachten wir ein ganz ähnliches Experiment mit 1 Photon:

1 Photon, das hier aus der Lampe des Overheadprojektors strömt, gehe durch das Polarisationsfilter, das ich dazwischenhalte, und treffe dann auf die Wand. Wir finden, daß das Photon manchmal durchgeht, manchmal nicht. Wir haben wieder eine Situation von Unvorhersagbarkeit. Ein klassischer Physiker würde das wieder mit einem Mangel an Kontrolle erklären; auch für mich wäre dies die natürliche Erklärung. Einstein war auch dieser Ansicht, er sagte: “Gott würfelt nicht.“ Einstein vertrat den Glaubenssatz, daß die Natur deterministisch ist; wir müssen nur alles kontrollieren, dann hat jedes Ereignis eine eindeutige Ursache.

Die **Quantentheorie** erklärt dies anders; sie sagt, wir sind hier mit einem Fall von unaufhebbarer **Unbestimmtheit** (Indeterminismus) konfrontiert: Der Auftritt eines bestimmten Ereignisses (im Rahmen aller, die bei der vorliegenden experimentellen Anordnung möglich sind) ist nicht kausal bestimmt.

Einstein wollte das nicht akzeptieren und sagte deshalb: Die Quanten-

theorie ist **unvollständig**. Die Quantenmechanik sollte daher durch hypothetische “verborgene Variable“ ergänzt werden, die durch Beobachtung nicht erkannt werden können, über die wir also Hypothesen machen müssen. Wenn diese verborgenen Variablen gefunden wären, wäre wieder alles perfekt determiniert.

1935 fanden EPR (Einstein Podolsky Rosen) ein sehr gutes Argument für diese Hypothese. EPR gingen aus von einer Hypothese, die von den meisten Physikern akzeptiert wird: von der Hypothese, daß es **keine Fernwirkung** geben kann. ( Sie nannten diese Hypothese auch **lokale Kausalität** oder **Lokalität**). EPR zeigten, daß es Experimente gibt, in welchen aus dieser Hypothese (und gewissen Annahmen) Determinismus folgt. Nach diesem Argument ist also Determinismus keine Hypothese mehr, sondern ein Theorem: **Lokalität**  $\rightarrow$  **Determinismus**

Das Experiment, das EPR diskutierten, ist (in einer einfacheren Variante) das folgende:

Man erzeugt mit einer geeigneten Quelle (deren Funktion hier nicht im Detail besprochen wird) “**Zwillingsphotonen**“. Wenn man einen “Knopf drückt“ erzeugt die Quelle 2 Photonen, je eines fliegt zum Polarisator P1 bzw. P2. (Abb. 1)

Wenn P1 und P2 parallel zueinander orientiert sind, dann findet man, daß die von dieser Quelle ausgesandten Zwillingsphotonen die Eigenschaft haben: Immer wenn 1 Photon durch P1 geht, geht der Zwilling durch P2, und immer wenn 1 Photon nicht durch P1 geht, geht der Zwilling nicht durch P2. Dieses Resultat ergibt sich immer, egal wie P1 und P2 um die Quellenachse verdreht sind, vorausgesetzt, sie sind zueinander parallel orientiert. Dieses Experiment zeigt eindeutig, daß der Durchgang 1 Photons durch den Polarisator **kein Zufall** ist. Wenn der Durchgang durch P1 durch das Werfen eines Würfels bestimmt werden würde und auch der Durchgang durch P2 durch das Werfen eines anderen Würfels - wie könnten da die Ergebnisse bei P1 und P2 immer übereinstimmen?

Die Situation erinnert eher an 1-eiige menschliche Zwillinge: Alle Babys werden mit blauen Augen geboren, aber manche bekommen später braune Augen. Das ist aber kein Zufall, es ist genetisch bedingt. 1-eiige Zwillinge seien weit voneinander gebracht, bevor sie ihre endgültige Augenfarbe bekommen. Bekommt der eine braune Augen, so auch der andere. Niemand sagt: das ist eine Fernwirkung - alle sagen: das ist Genetik.

Analog könnte man bei den Zwilling photons argumentieren. Eine "genetische Hypothese" für Photonen würde annehmen, daß jedes Zwilling photon eine uns unbekanntes Eigenschaft mit sich trägt, jedes dieselbe, weil sie gleichzeitig in derselben Quelle entstanden sind. Dies ist das EPR-Argument:

**keine Fernwirkung  $\rightarrow$  Determinismus**

Wenn man dieses Argument nicht akzeptiert, muß man, glaube ich, notwendigerweise akzeptieren, daß 2 Objekte auf weite Entfernung auf irgendeine Art übereinstimmen können. Dies wäre für EPR ein Widerspruch zu **keine Fernwirkung** gewesen.

Student: Dem letzten Satz möchte ich widersprechen. Wohl hat Einstein 1935 sich so ausgedrückt. Aber 1954 sagt er in einem Brief an Born explizite:

"Bei der probabilistischen Interpretation der Quantentheorie (die er als die einzig mögliche ansieht) zwingt uns der "Lokalisationsatz" dazu, die  $\psi$ -Funktion allgemein als die Beschreibung eines "Ensemble" aufzufassen" (die Einstein aber nicht als die vollständige Beschreibung eines individuellen Einzelsystems anzusehen vermag). " Bei dieser Interpretation **verschwindet auch die Paradoxie einer scheinbaren Kopplung von räumlich getrennten Systemteilen**. Die so interpretierte Beschreibung ist eine **objektive Beschreibung**, deren Begriffe unabhängig vom Beobachter einen klaren Sinn haben."

J. B.: Jedenfalls war für Einstein die Quantentheorie unvollständig. Sie ist nicht die ganze Wahrheit: Die "Gene" fehlen. Es ist eine große Ironie, daß das EPR Argument, das ich für sehr schlagend halte, und welches alle Physiker heutzutage akzeptieren sollten, zum Bumerang wurde. Es wurde zum schlagenden Argument gegen die Position von Einstein, und dies ergibt sich folgendermaßen:

Wir führen das Experiment mit den Zwilling photons mit nicht zueinander parallelen Polarisatoren durch: P1 sei um den Winkel  $\alpha$  gegen die von der Quelle ausgezeichnete  $z$ -Richtung verdreht, P2 um den Winkel  $\beta$ .

(Abb. 2)

Man bekommt in diesem Fall keine vollkommene Übereinstimmung mehr. Manchmal wird 1 Photon P1 durchqueren, aber sein Zwilling nicht P2, und umgekehrt. (Keine sichere Koinzidenz)

a) Die Quantentheorie gibt eine Formel für den Grad der Nichtübereinstimmung in Abhängigkeit von den Verdrehungswinkeln  $\alpha, \beta$ :

$$N(\alpha, \beta) = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha \cdot \cos 2\beta)$$

Die speziellen Fälle  $\alpha = \beta = 0$  oder  $\alpha = \beta = \pi$  liefern  $N = 0$ , also vollkommene Übereinstimmung.

Es ist eine gut gesicherte Tatsache, daß die experimentellen Ergebnisse mit dieser Vorhersage übereinstimmen.

b) Legt man die "genetische Hypothese", die für parallele Polarisatoren anscheinend alles erklärt, zu Grunde, dann liefert diese ein Ergebnis, welches für nichtparallele Polarisatoren in Widerspruch zur Erfahrung steht. Für die speziellen Winkel  $\alpha, \beta = 0, \pm 30$  erhält man z. B. die Aussage:

$$N(+30, -30) \leq N(+30, 0) + N(0, -30)$$

experimentell ergeben sich jedoch die Werte

$$\frac{3}{8} \leq \frac{1}{8} + \frac{1}{8}$$

dies ist offensichtlich falsch. Damit ist das EPR-Argument an der Erfahrung gescheitert.

Keine Fernwirkung führt nach dem EPR-Argument zu Determinismus; aber Determinismus führt im Fall von nichtparallelen Polarisatoren zurück zur Fernwirkung.

Student: Wollen Sie damit behaupten, daß man es als erwiesen ansehen muß, daß es in der Natur Fernwirkungen gibt?

J.B.: Ich kann nicht sagen, daß echte Fernwirkungen in der Physik benötigt werden, aber ich kann sagen: Man kann nicht ohne eine "Art von Fernwirkung" auskommen; man kann das, was an einem Platz passiert, nicht trennen von dem, was an einem anderen Platz (auch einem sehr fernen) passiert. Es bedarf einer gemeinsamen Beschreibung bzw. Erklärung.

Student: Gerade dies leistet ja die Quantentheorie: Der Zustandsvektor, der die 2 Photonen beschreibt, enthält alle Korrelationen zwischen den 2 Teilchen. Diese Korrelationen wurden in der Quelle, bei der Aussendung, hergestellt und bleiben bei der Ausbreitung über beliebige Entfernungen aufrecht. Eine Fernwirkung beim Auftritt der Ereignisse findet da nicht statt. Dies sagt Einstein auch ausdrücklich in seinem Brief an Born 1954: "...verschwindet auch die Paradoxie einer scheinbaren Kopplung von räumlich getrennten Systemteilen."

J.B.: Die Frage der Fernwirkung ist für die Physik von fundamentaler Wichtigkeit. Für Einstein, Bohr u. die anderen großen Physiker war es unvorstellbar, daß durch eine Tätigkeit hier sofort die Situation an einem weit entfernten Platz geändert werden kann. Ich glaube, daß die Quantentheoretiker sich nicht ernsthaft mit dem Problem der Fernwirkung auseinandergesetzt haben; sie sehen weg. Es könnte aber sein, daß wir lernen müssen, daß es ohne Fernwirkungen nicht geht.

Student: Wenn Sie mit Fernwirkungen die Korrelationen meinen, bin ich einverstanden. Doch scheint mir das Wort "Fernwirkung" in diesem Zusammenhang sehr irreführend. Echte Fernwirkung kann es wegen der einsteinschen Relativitätstheorie ja nicht geben.

J.B.: Die statistischen Vorhersagen der Quantentheorie scheinen richtig zu sein. Die Korrelationen sind Tatsache, sie schreien nach einer Erklärung, aber wir haben keine.

Im Zusammenhang mit der Relativitätstheorie sehe ich folgendes Problem: Gleichzeitigkeit ist relativ; Ereignisse, welche für einen Beobachter gleichzeitig stattfinden, tun dies nicht für einen anderen Beobachter, welcher sich relativ zum ersten bewegt. So hat es für weit entfernte Situationen keinen Sinn zu sagen, daß ein Ereignis vor einem anderen stattgefunden hat. Wenn das Ergebnis auf Platz 1 unseres Experimentes davon abhängt, was auf Platz 2 passiert, haben wir ein Rätsel, da das, was auf Platz 2 passiert eine Auswirkung hat, bevor es überhaupt getan ist. Denn wenn ich sage A hat einen Effekt auf B, so kann ich immer einen Beobachter finden, wo A nach B kommt. Es gibt also Situationen, wo die Wirkung vor der Ursache kommt.

Student: Dies ist kein gültiges Argument: es steht ja absolut fest, welches Ereignis 2 in der Zukunft (im Inneren des Zukunftskegels) von Ereignis 1

stattfindet. Außerdem: Das Bestehen einer Korrelation zwischen entfernten Ereignissen bedeutet nicht, dass der Auftritt eines Ereignisses auf Platz 2 den Auftritt eines Ereignisses auf Platz 1 verursacht.

J.B.: Wir müssen jedenfalls eine Quantentheorie finden, die nicht in Konflikt gerät mit der speziellen Relativitätstheorie – und dies ist noch nicht geschehen.

Student: Ich stimme Ihnen zu, daß die relativistische Quantentheorie noch unzulänglich entwickelt ist. Die Quantenfeldtheorie mit der Existenz von Antiteilchen ist ein schwieriges Problem. Es scheint mir aber wenig fruchtbar, diese neue Art von Schwierigkeit mit dem Problem einer befriedigenden Interpretation der Quantenmechanik zu vermischen. Sie selbst, werter Herr Bell, haben ja dargetan, daß eine Signalübertragung mittels der Fernkorrelationen nicht möglich ist.

J.B.: Ja, aber ich habe auch gezeigt, daß wir das Dilemma haben, daß einerseits entfernte Dinge irgendwie verbunden sein müssen, andererseits nicht das Gefühl vorhanden ist, daß wir irgendwie zusammenhängen:

“But if we’re really together baby,  
how can I feel so all alone.“

Wir können nicht einfach sagen: “Die Natur ist halt so.“ Ich glaube, wir müssen ein Bild finden, in dem perfekte Korrelationen natürlich sind, ohne Determinismus zur Folge zu haben, weil dieser zu Nichtlokalität führt. Dieses Bild muß auch unsere persönliche Erfahrung der Unabhängigkeit vom Rest der Welt in natürlicher Weise beinhalten. Die Verbindungen (Korrelationen) eines Teilsystems der Welt (z.B. meiner Person) mit dem Rest der Welt müssen sehr subtil sein; und ich habe Ihnen alles gesagt, was ich darüber weiß.