

16 Bertlmanns Socken und das Wesen der Realität

16.1 Einleitung

Der Hobbyphilosoph, der niemals einen Kurs über Quantenmechanik ertragen musste, ist völlig unbeeindruckt von den Einstein-Podolsky-Rosen-Korrelationen [1]. Er kann viele Beispiele ähnlicher Korrelationen im alltäglichen Leben aufzählen. Der Fall von Bertlmanns Socken ist oft berichtet worden.

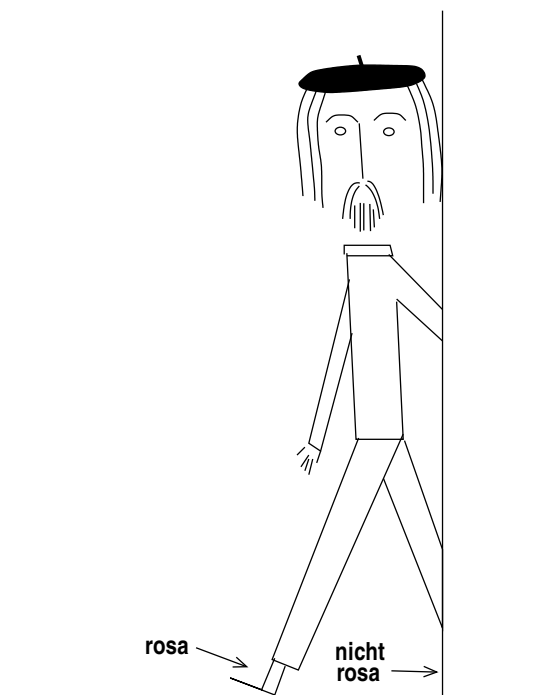


Abb. 16.1: Die Socken von Dr. Bertlmann

Dr. Bertlmann trägt gern Socken verschiedener Farben. Welche Farbe er an einem bestimmten Tag an einem bestimmten Fuß trägt, ist völlig unvorhersehbar. Aber wenn Sie sehen (Abb. 16.1), dass die Socke am ersten Fuß rosa ist, können Sie schon sicher

sein, dass die zweite nicht rosa sein wird. Die Beobachtung der ersten und die Kenntnis Bertlmanns gibt sofortige Informationen über die zweite. Über Geschmack lässt sich (nicht) streiten, aber abgesehen davon gibt es hier kein Geheimnis. Und ist die EPR-Geschichte nicht genau das gleiche?

Betrachten Sie zum Beispiel das spezielle EPR-Gedankenexperiment von Bohm [2] (Abb. 16.2). Zwei geeignete Teilchen, die geeignet vorbereitet sind (im „Singulett-Spinzustand“), werden von einer gemeinsamen Quelle auf zwei weit voneinander getrennte Magnete gelenkt, auf die Detektorschirme folgen. Jedesmal wenn das Experiment ausgeführt wird, wird jedes der beiden Teilchen am entsprechenden Magnet entweder nach oben oder unten abgelenkt. Ob eines der beiden Teilchen bei einer bestimmten Gelegenheit nach oben oder unten geht, ist völlig unvorhersehbar. Aber wenn ein Teilchen nach oben geht, geht das andere nach unten und umgekehrt. Mit ein wenig Praxis reicht es aus, eine Seite zu beobachten, um über die andere Bescheid zu wissen.

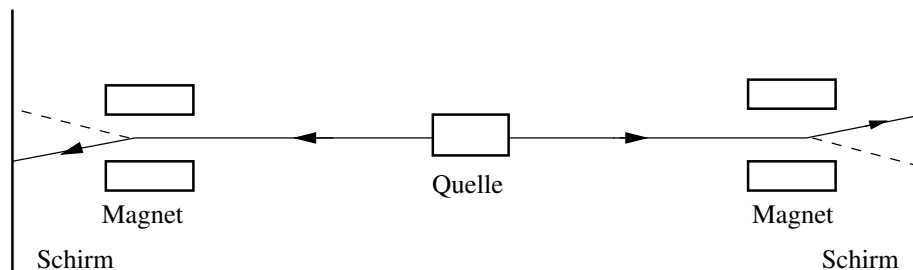


Abb. 16.2: Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm-Gedankenexperiment (EPRB) mit zwei Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen und zwei Stern-Gerlach-Magneten

Na und? Folgern wir nicht einfach, dass die Teilchen Eigenschaften einer bestimmten Art haben, die durch die Magnete irgendwie ermittelt werden, ausgewählt an der Quelle à la Bertlmann – verschieden für die beiden Teilchen? Ist es möglich, diese simple Angelegenheit als undurchsichtig und geheimnisvoll anzusehen? Wir müssen es versuchen.

Hier ist es nützlich zu wissen, wie sich Physiker Teilchen mit „Spin“ intuitiv vorstellen, denn mit solchen Teilchen haben wir es hier zu tun. In einem groben, klassischen Bild stellt man sich vor, dass irgendeine innere Bewegung dem Teilchen einen Drehimpuls um eine Achse verleiht und damit eine Magnetisierung entlang dieser Achse erzeugt. Das Teilchen ist dann wie ein kleiner, rotierender Magnet mit Nord- und Südpol, die auf der Rotationsachse liegen. Wenn auf den Magneten ein Magnetfeld einwirkt, wird der Nordpol in eine Richtung gezogen und der Südpol in die entgegengesetzte. Wenn das Feld gleichförmig ist, ist die Gesamtkraft auf den Magneten gleich Null. Aber in einem ungleichförmigen Feld wird ein Pol mehr als der andere gezogen und der Magnet als Ganzer in die entsprechende Richtung gezogen. Das besagte Experiment benutzt solche ungleichförmigen Felder – erzeugt mit sogenannten „Stern-Gerlach“-

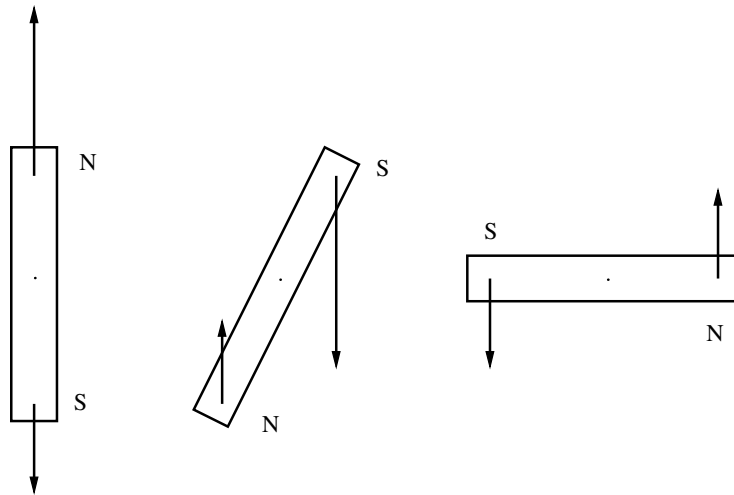


Abb. 16.3: Kräfte auf einen Magneten in einem ungleichförmigen Magnetfeld. Das Feld weist nach oben und seine Stärke wächst in dieser Richtung

Magneten.¹ Nehmen wir an, das Magnetfeld zeigt nach oben und die Stärke des Feldes nimmt in der Aufwärtsrichtung zu. Dann würde ein Teilchen mit nach oben zeigender Süd-Nord-Achse nach oben gezogen werden (Abb. 16.3). Eines mit nach unten zeigender Achse würde nach unten gezogen werden. Eines mit einer Achse senkrecht zum Feld würde das Feld ohne Ablenkung passieren. Und eines mit einem dazwischenliegenden Winkel, würde um ein Maß dazwischen abgelenkt werden. (Das alles gilt für ein Teilchen ohne elektrische Ladung; wenn ein geladenes Teilchen ein Magnetfeld durchläuft, gibt es eine zusätzliche Kraft, die die Situation verkompliziert.)

Ein Teilchen einer gegebenen Art soll eine gegebene Magnetisierung besitzen. Aber wegen des variablen Winkels zwischen der Teilchenachse und dem Feld wäre trotzdem ein Bereich von Ablenkungen in einem gegebenen Stern-Gerlach-Magneten möglich. Man könnte erwarten, dass dann eine Abfolge von Teilchen ein Muster wie in Abb. 16.4 auf einem Detektorschirm erzeugen würde. Aber was im einfachsten Fall beobachtet wird, ist eher wie in Abb. 16.5, mit zwei getrennten Gruppen von Ablenkungen (d. h. „up“ oder „down“), anstelle eines mehr oder weniger kontinuierlichen Bandes. (Dieser einfachste Fall mit nur zwei Gruppen von Ablenkungen, ist der von sogenannten „Spin- $\frac{1}{2}$ “-Teilchen; für „Spin- j “-Teilchen gibt es $(2j + 1)$ Gruppen).

Das Muster in Abb. 16.5 ist unter den naiven, klassischen Bedingungen sehr schwer zu verstehen. Man könnte zum Beispiel annehmen, dass das Magnetfeld die kleinen Magnete zunächst in seiner eigenen Richtung ausrichtet wie Kompassnadeln. Aber

¹AdÜ: Das „Stern-Gerlach“-Experiment wurde erstmals von den Physikern Otto Stern und Walter Gerlach im Jahre 1922 in Frankfurt mit Silberatomen ausgeführt, die den Gesamtspin $\frac{1}{2}$ haben.

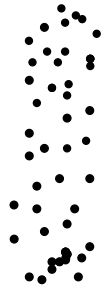


Abb. 16.4: Muster auf dem Detektorschirm hinter einem vertikalen Stern-Gerlach-Magneten nach naiver, klassischer Erwartung



Abb. 16.5: Quantenmechanisches Muster auf dem Schirm hinter einem vertikalen Stern-Gerlach-Magneten

selbst wenn das dynamisch korrekt wäre, es würde nur eine Gruppe von Ablenkungen ergeben. Zur Erklärung der zweiten Gruppe wären Kompassnadeln nötig, die in die falsche Richtung zeigen. Und ohnehin ist es dynamisch nicht korrekt. Der innere Drehimpuls würde durch die Kreiselwirkung den Winkel zwischen der Teilchenachse und dem magnetischen Feld stabilisieren. Nun gut, könnte es dann nicht sein, dass die Quelle aus irgendeinem Grund Teilchen liefert, deren Achsen nur in die eine oder andere Richtung weisen und nicht dazwischen? Aber das kann man einfach testen, indem man den Stern-Gerlach-Magnet dreht. Was wir erhalten (Abb. 16.6), ist genau dasselbe zweigeteilte Muster wie zuvor, nur gedreht wie der Stern-Gerlach-Magnet. Um die Quelle für das Fehlen von dazwischen liegenden Ablenkungen verantwortlich zu machen, müssten wir annehmen, dass sie irgendwie die Orientierung des Stern-Gerlach-Magneten vorausahnt.

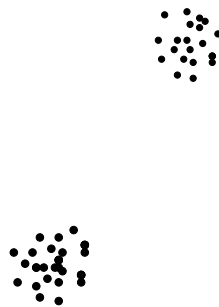


Abb. 16.6: Quantenmechanisches Muster mit einem gedrehten Stern-Gerlach-Magneten

Phänomene dieser Art [3] ließen die Physiker verzweifeln bei der Suche nach einem konsistenten Raumzeit-Bild dessen, was im atomaren und subatomaren Bereich abläuft. Um aus der Not eine Tugend zu machen, und beeinflusst durch positivistische

und instrumentalistische Philosophien [4], kamen viele zu der Ansicht, dass es nicht nur schwierig ist, ein kohärentes Bild zu finden, sondern dass es falsch ist, danach zu suchen – wenn nicht gar unsittlich, dann sicherlich unprofessionell. Noch weitergehend, behaupteten manche, dass atomare und subatomare Teilchen vor der Beobachtung überhaupt keine definierten Eigenschaften *haben*. Das heißt, es gibt nichts in den Teilchen, die sich dem Magnet nähern, um diejenigen die später nach unten abgelenkt werden von denen zu unterscheiden, die später nach oben abgelenkt werden. Tatsächlich sind die Teilchen sogar nicht wirklich dort.

Zum Beispiel [5] „erklärte Bohr einmal, als er gefragt wurde, ob der quantenmechanische Algorithmus als etwas betrachtet werden könne, was irgendwie eine zugrundeliegende Quantenrealität abbildet: ‚Es gibt keine Quantenwelt. Es gibt nur eine abstrakte quantenmechanische Beschreibung. Es ist falsch zu denken, dass es die Aufgabe der Physik ist, herauszufinden wie die Natur *ist*. Physik befasst sich damit, was wir über die Natur sagen können‘“.

Und Heisenberg [6] „...bei den Experimenten mit atomaren Ereignissen haben wir es mit Dingen und Fakten zu tun, mit Phänomenen, die genauso real sind wie jedes Phänomen im täglichen Leben. Aber Atome oder Elementarteilchen sind nicht so real; sie formen eine Welt von Eventualitäten oder Möglichkeiten, anstelle von Dingen oder Fakten“.

Und [7] „Jordan erklärte mit Nachdruck, dass Beobachtungen das, was zu messen ist, nicht nur *stören*, sondern es *produzieren*. Zum Beispiel bei einer Positionsmessung, die mit einem Gammastrahlen-Mikroskop ausgeführt wird, wird das Elektron zu einer Entscheidung gezwungen. Wir zwingen es, *eine bestimmte Position anzunehmen*; vorher war es im allgemeinen weder hier noch da; es hatte seine Entscheidung für eine bestimmte Position noch nicht getroffen. . . Wenn mit einem anderen Experiment die *Geschwindigkeit* des Elektrons gemessen wird, bedeutet das: Das Elektron wird gezwungen, sich für einen genau definierten Wert der Geschwindigkeit zu entscheiden. . . Wir selbst produzieren die Ergebnisse der Messungen‘“.

Im Kontext solcher Ideen muss man sich die Diskussion der Einstein-Podolsky-Rosen-Korrelationen vorstellen. Dann ist es etwas weniger unverständlich, dass der EPR-Artikel derartigen Wirbel verursacht hat und sich der Staub sogar bis heute noch nicht gelegt hat. Es ist so, als ob wir dazu gekommen sind, die Realität von Bertlmanns Socken zu leugnen, oder zumindest ihrer Farben, wenn sie nicht betrachtet werden. Und wie ein Kind gefragt: Wie kommt es, dass sie immer verschiedene Farben wählen, wenn sie betrachtet *werden*? Woher weiß die zweite Socke, was die erste getan hat?

In der Tat paradox! Jedoch für die anderen, nicht für EPR. EPR benutzten das Wort „Paradoxon“ nicht. Sie waren in dieser Angelegenheit auf der Seite des Mannes auf der Straße. Für sie zeigten diese Korrelationen einfach, dass die Quantentheoretiker voreilig die Realität der mikroskopischen Welt fallengelassen haben. Insbesondere Jordan hätte unrecht mit der Annahme, dass in dieser Welt vor der Beobachtung nichts real oder festgelegt ist. Denn nach der Beobachtung nur eines Teilchens, ist das Ergebnis

der nachfolgenden Beobachtung des anderen (möglicherweise an einem weit entfernten Ort) sofort vorhersagbar. Könnte es sein, dass die erste Beobachtung irgendwie festlegt, was vorher nicht festgelegt war, oder real macht, was vorher nicht real war; nicht nur für das nahe Teilchen, sondern auch für das entfernte? Für EPR wäre das eine undenkbbare „spukhafte Fernwirkung“ [8]. Um eine solche Fernwirkung zu vermeiden, müssen sie den fraglichen Raumzeit-Gebieten *reale* Eigenschaften vor der Beobachtung zuschreiben, korrelierte Eigenschaften, die die Resultate dieser speziellen Beobachtungen *vorherbestimmen*. Da diese realen Eigenschaften, festgelegt vor der Beobachtung, nicht im Quantenformalismus [9] enthalten sind, ist dieser Formalismus für EPR *unvollständig*. Er kann korrekt sein, solange er anwendbar ist; aber der übliche Quantenformalismus kann nicht die ganze Wahrheit sein.

Es ist wichtig zu beachten, dass in dem begrenzten Maß, in dem *Determinismus* im EPR-Argument eine Rolle spielt, er nicht vorausgesetzt, sondern *gefolgert* wird. Was heilig bleibt, ist das Prinzip der „lokalen Kausalität“ – oder „keine Fernwirkung“. Natürlich impliziert die bloße *Korrelation* zwischen entfernten Ereignissen selbst keine Fernwirkung, sondern nur die Korrelation zwischen Signalen, die die zwei Stellen erreichen. Diese Signale, im idealisierten Beispiel von Bohm, müssen genügen, um zu *bestimmen*, ob die Teilchen nach oben oder unten gehen. Denn ein eventueller Indeterminismus könnte nur die perfekte Korrelation zerstören.

Es ist bemerkenswert schwierig, diesen Punkt zu vermitteln, dass Determinismus keine *Voraussetzung* der Analyse ist. Es gibt die weitverbreitete und fehlerhafte Überzeugung, dass für Einstein [10] der Determinismus immer *das* heilige Prinzip war. Sein berühmtes und gern zitiertes „Gott würfeln nicht“ war in dieser Hinsicht nicht hilfreich. Unter denen, die große Schwierigkeiten hatten, Einsteins Position zu erkennen, war Born. Pauli versuchte, ihm in einem Brief von 1954 zu helfen [11]:

... er war gar nicht ärgerlich gegen Sie, sondern sagte von Ihnen nur, Sie seien ein Mensch, der nicht zuhören kann. Dies stimmte insofern mit meinem eigenen Eindruck überein, als ich in Ihrem Brief sowohl als auch in Ihrem Manuskript immer dann, wenn Sie von Einstein reden, diesen nicht wieder erkennen konnte. Es schien mir, Sie hätten sich irgendeinen Strohhalm-Einstein aufgebaut, den Sie dann mit großem Pomp widerlegen. Insbesondere hält Einstein (wie er mir ausdrücklich wiederholte) den Begriff „Determinismus“ nicht für so fundamental wie es oft geschieht und leugnete energisch, dass er jemals ein solches Postulat aufgestellt habe...

Ebenso *bestreitet* er, dass er als „Kriterium für eine zulässige Theorie“ die Frage benutzt: „ist sie streng deterministisch?“

Besondere Schwierigkeiten hatte Born mit der Einstein-Podolsky-Rosen-Diskussion. Hier ist seine Zusammenfassung, viel später, als er die Born-Einstein-Korrespondenz editierte [12]:

Die Wurzel der Meinungsverschiedenheit zwischen Einstein und mir liegt in seinem Axiom, dass Ereignisse, die an verschiedenen Orten A und B stattfinden, unabhängig voneinander sind, in dem Sinne, dass eine Beobachtung des Zustandes bei B nichts darüber lehrt, wie der Zustand bei A ist.

Das Missverständnis könnte kaum vollkommener sein. Einstein hatte keine Schwierigkeit damit, zu akzeptieren, dass Zustände an verschiedenen Orten korreliert sein können. Was er nicht akzeptieren konnte, war, dass ein Eingriff an einem Ort den Zustand an einem anderen unmittelbar *beeinflussen* konnte.

Diese Bemerkungen über Born sind nicht dazu gedacht, eine der überragenden Persönlichkeiten der modernen Physik herabzuwürdigen. Sie sind dazu gedacht, die Schwierigkeiten zu illustrieren, vorgefasste Meinungen beiseite zu legen und zuzuhören, was tatsächlich gesagt wird. Sie sind dazu gedacht, *Sie*, lieber Zuhörer, zu ermuntern, genauer zuzuhören.

Hier ist schließlich eine Zusammenfassung von Einstein selbst [13]:

II.) Fragt man, was unabhängig von der Quanten-Theorie für die physikalische Ideenwelt charakteristisch ist, so fällt zunächst folgendes auf: die Begriffe der Physik beziehen sich auf eine reale Außenwelt,... Charakteristisch für diese physikalischen Dinge ist ferner, dass sie in ein raumzeitliches Kontinuum eingeordnet gedacht sind. Wesentlich für diese Einordnung der in der Physik eingeführten Dinge erscheint ferner, dass zu einer bestimmten Zeit diese Dinge eine voneinander unabhängige Existenz beanspruchen, soweit diese Dinge „in verschiedenen Teilen des Raumes liegen“...

Für die relative Unabhängigkeit räumlich distanter Dinge (A und B) ist die Idee charakteristisch: äußere Beeinflussung von A hat keinen unmittelbaren Einfluss auf B;...

Es scheint mir keinem Zweifel zu unterliegen, dass die Physiker, welche die Beschreibungsweise der Quanten-Mechanik für prinzipiell definitiv halten, auf diese Überlegung wie folgt reagieren werden: Sie werden die Forderung II von der unabhängigen Existenz des in verschiedenen Raum-Teilen vorhandenen physikalisch-Realen fallen lassen; sie können sich mit Recht darauf berufen, dass die Quanten-Theorie von dieser Forderung nirgends explicit Gebrauch mache.

Ich gebe dies zu, bemerke aber: Wenn ich die mir bekannten physikalischen Phänomene betrachte, auch speziell diejenigen, welche durch die Quanten-Mechanik so erfolgreich erfasst werden, so finde ich doch nirgends eine Tatsache, die es mir als wahrscheinlich erscheinen lässt, dass man die Forderung II aufzugeben habe.

Deshalb bin ich geneigt zu glauben, dass ...die Beschreibung der Quanten-Mechanik als eine unvollständige und indirekte Beschreibung der Realität anzusehen sei, die später wieder durch eine vollständige und direkte ersetzt werden wird.

16.2 Veranschaulichung

Lassen Sie uns veranschaulichen, was Einstein als *Möglichkeit* im Sinn hatte – im Zusammenhang mit den speziellen quantenmechanischen Vorhersagen, die bereits für das EPRB-Gedankenexperiment erläutert wurden. Diese Vorhersagen machen es schwer, an die Vollständigkeit des Quantenformalismus zu glauben. Aber natürlich machen sie, außerhalb dieses Formalismus, keine Schwierigkeit irgendeiner Art für den Begriff der lokalen Kausalität. Um das explizit zu zeigen, stellen wir ein triviales *ad-hoc*-Raumzeit-Bild dessen dar, was ablaufen könnte. Es ist eine Modifikation des schon beschriebenen, naiven klassischen Bildes. Zweifellos muss darin etwas modifiziert werden, um die Quantenphänomene zu reproduzieren. Zuvor haben wir implizit für die Gesamtkraft in der Richtung des Feldgradienten (die wir immer in derselben Richtung wie das Feld nehmen) eine Form angenommen

$$F \cos \theta, \quad (1)$$

worin θ der Winkel zwischen dem magnetischen Feld (und dem Feldgradient) und der Teilchenachse ist. Wir ändern das zu

$$F \cos \theta / |\cos \theta|. \quad (2)$$

Während die Kraft zuvor mit θ über einen kontinuierlichen Bereich variierte, nimmt sie jetzt nur zwei Werte an: $\pm F$, wobei das Vorzeichen davon bestimmt wird, ob die magnetische Achse des Teilchens näher an der Richtung des Feldes liegt als an der entgegengesetzten Richtung. Es wird kein Versuch unternommen, diese Änderung des Kraftgesetzes zu erklären. Es ist einfach ein *ad-hoc*-Versuch, um die Beobachtungen zu begründen. Natürlich erklärt er unmittelbar das Erscheinen von nur zwei Gruppen von Teilchen, abgelenkt entweder in Richtung des Magnetfeldes oder in die entgegengesetzte Richtung. Um dann die Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm-Korrelationen zu erklären, müssen wir nur annehmen, dass die zwei Teilchen, die von der Quelle emittiert werden, entgegengesetzt gerichtete Magnetachsen haben. Wenn dann die Magnetachse eines Teilchens näher an der Richtung (als der Gegenrichtung) eines Stern-Gerlach-Feldes ist, wird die Magnetachse des anderen Teilchens näher an der Gegenrichtung eines parallelen Stern-Gerlach-Feldes sein. Wenn also ein Teilchen nach oben abgelenkt wird, wird das andere nach unten abgelenkt und umgekehrt. Es gibt bei diesen Korrelationen, mit parallelen Stern-Gerlach-Analysatoren, überhaupt nichts Problematisches oder Verwirrendes, vom Einsteinschen Standpunkt.

So weit, so gut. Aber gehen wir nun etwas weiter als zuvor und betrachten *nicht*-parallele Stern-Gerlach-Magnete. Der erste sei von irgendeiner Standardposition um

einen Winkel a um die Teilchenfluglinie gedreht. Der zweite sei ebenso um einen Winkel b gedreht. Wenn dann die Magnetachsen jedes Teilchens zufällig orientiert sind, aber die Achsen eines gegebenen Paares immer entgegengesetzt orientiert sind, ergibt eine kurze Rechnung für die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen möglichen Ergebnisse in dem *ad-hoc*-Modell

$$\begin{aligned} P(\text{up,up}) = P(\text{down,down}) &= \frac{|a-b|}{2\pi} \quad \text{und} \\ P(\text{up,down}) = P(\text{down,up}) &= \frac{1}{2} - \frac{|a-b|}{2\pi}, \end{aligned} \quad (3)$$

wobei die „up“-s und „down“-s in Bezug auf die Magnetfelder der zwei Magnete definiert sind. Eine quantenmechanische Rechnung ergibt jedoch

$$\begin{aligned} P(\text{up,up}) = P(\text{down,down}) &= \frac{1}{2} \left(\sin \frac{a-b}{2} \right)^2 \quad \text{und} \\ P(\text{up,down}) = P(\text{down,up}) &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\sin \frac{a-b}{2} \right)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Demzufolge leistet das *ad-hoc*-Modell nur für $(a-b) = 0$, $(a-b) = \pi/2$ und $(a-b) = \pi$, das, was von ihm verlangt wird (d.h. es reproduziert die quantenmechanischen Ergebnisse), aber nicht für dazwischenliegende Winkel.

Natürlich war dieses triviale Modell nur das erste, was uns einfiel und es funktionierte bis zu einem bestimmten Punkt. Könnten wir nicht ein wenig cleverer sein und ein Modell entwerfen, das die Quantenformeln vollständig reproduziert? Nein. Das ist nicht möglich, solange die Fernwirkung ausgeschlossen ist. Dieser Punkt wurde erst später erkannt. Weder EPR noch ihre zeitgenössischen Opponenten waren sich dessen bewusst. In der Tat konzentrierte sich die Diskussion für lange Zeit ausschließlich auf die Punkte $|a-b| = 0, \pi/2$ und π .

16.3 Schwierigkeiten mit der Lokalität

Um die Auflösung dieses Knotens ohne Mathematik zu erklären, kann ich nichts Besseres tun, als d’Espagnat [14,15] zu folgen. Kehren wir für einen Moment zu den Socken zurück. Eine der wichtigsten Fragen zu einer Socke ist, „ist sie waschbar“? Eine Verbraucherorganisation könnte die Frage präziser stellen: Würde die Socke ein-tausend Waschzyklen bei 45°C überstehen? Oder bei 90°C? Oder bei 0°C? Dann ist eine angepasste Version der Wigner-d’Espagnat-Ungleichung [16] anwendbar. Für jede Kollektion neuer Socken ist

$$\left. \begin{array}{l} \text{(die Anzahl, die bei } 0^\circ \text{ bestehen kann und nicht bei } 45^\circ) \\ \text{plus} \\ \text{(die Anzahl, die bei } 45^\circ \text{ bestehen kann und nicht bei } 90^\circ) \\ \text{nicht kleiner als} \\ \text{(die Anzahl, die bei } 0^\circ \text{ bestehen kann und nicht bei } 90^\circ). \end{array} \right\} \quad (5)$$

Das ist trivial, weil jedes Mitglied der dritten Gruppe entweder 45° übersteht und deshalb auch in der zweiten Gruppe ist, oder es 45° nicht übersteht und deshalb auch in der ersten Gruppe ist.

Aber Trivialitäten wie diese, werden Sie einwenden, sind in der Verbraucherforschung nicht von Interesse! Sie haben recht; wir überstrapazieren hier die Analogie zwischen Verbraucherforschung und Quantenphilosophie etwas. Außerdem werden Sie darauf bestehen, dass die Aussage empirisch nicht überprüfbar ist. Es gibt keine Möglichkeit, zu entscheiden, ob eine gegebene Socke bei einer Temperatur übersteht und nicht bei einer anderen. Wenn sie den ersten Test nicht überstanden hat, wäre sie für den zweiten nicht verfügbar; und selbst wenn sie den ersten Test überstanden hat, wäre sie nicht mehr neu und nachfolgende Tests hätten nicht die ursprüngliche Bedeutung.

Nehmen wir jedoch an, dass die Socken in Paaren vorkommen. Und angenommen, wir wissen aus Erfahrung, dass es nur eine geringe Variation zwischen den beiden Socken eines Paares gibt; in dem Sinn, dass, wenn eine einen gegebenen Test besteht, auch die andere denselben Test bestehen würde, *wenn* er ausgeführt wird. Dann können wir aus der d'Espagnat-Ungleichung Folgendes schließen:

$$\left. \begin{array}{l} \text{(die Anzahl von Paaren, bei denen eine bei } 0^\circ \text{ bestehen kann und die} \\ \text{andere nicht bei } 45^\circ) \\ \qquad \qquad \qquad \text{plus} \\ \text{(die Anzahl von Paaren, bei denen eine bei } 45^\circ \text{ bestehen kann und die} \\ \text{andere nicht bei } 90^\circ) \\ \qquad \qquad \qquad \text{ist nicht kleiner als} \\ \text{(die Anzahl von Paaren, bei denen eine bei } 0^\circ \text{ bestehen kann und die} \\ \text{andere nicht bei } 90^\circ). \end{array} \right\} \quad (6)$$

Das ist noch nicht empirisch überprüfbar, denn obwohl die beiden Tests in jeder Klammer nun verschiedene Socken betreffen, erfordern verschiedene Klammern verschiedene Tests mit derselben Socke. Aber jetzt fügen wir die Zufallsauswahl-Hypothese hinzu: Wenn die Stichprobe von Paaren groß genug ist und wir eine ausreichend große Teilstichprobe für ein gegebenes Testpaar zufällig auswählen, dann können die bestanden/versagt-Anteile der Teilprobe mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Gesamtstichprobe ausgedehnt werden. Wenn wir diese Anteile in einem völlig üblichen Verfahren mit *Wahrscheinlichkeiten* identifizieren, haben wir nun

$$\left. \begin{array}{l} \text{(die Wahrscheinlichkeit, dass eine Socke bei } 0^\circ \text{ besteht und die} \\ \text{andere nicht bei } 45^\circ) \\ \qquad \qquad \qquad \text{plus} \\ \text{(die Wahrscheinlichkeit, dass eine Socke bei } 45^\circ \text{ besteht und die} \\ \text{andere nicht bei } 90^\circ) \\ \qquad \qquad \qquad \text{ist nicht kleiner als} \\ \text{(die Wahrscheinlichkeit, dass eine Socke bei } 0^\circ \text{ besteht und die} \\ \text{andere nicht bei } 90^\circ). \end{array} \right\} \quad (7)$$

Zudem ist das empirisch sinnvoll, weil Wahrscheinlichkeiten durch zufällige Stichproben bestimmt werden können.

Wir haben diese Überlegungen zunächst für Sockenpaare formuliert und konnten dabei mit großem Vertrauen in diese Alltagsobjekte operieren. Aber warum nicht ebenso für die Teilchenpaare des EPRB-Experimentes argumentieren? Durch Blockieren der „down“-Kanäle in den Stern-Gerlach-Magneten (was nur Teilchen passieren lässt, die nach oben abgelenkt wurden), unterziehen wir die Teilchen ebenso Tests, die sie entweder bestehen oder nicht. Anstelle von Temperaturen haben wir jetzt Winkel a und b , um die die Stern-Gerlach-Magnete gedreht sind. Der wesentliche Unterschied ist trivial: Die Teilchen sind paarweise à la Bertlmann – wenn eines einen gegebenen Test besteht, wird das andere ihn sicher *nicht* bestehen. Um das zu berücksichtigen, nehmen wir einfach die Umkehrung des zweiten Terms in jeder Klammer:

$$\left. \begin{array}{l} \text{(die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen bei } 0^\circ \text{ besteht und das} \\ \text{andere bei } 45^\circ \text{)} \\ \text{plus} \\ \text{(die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen bei } 45^\circ \text{ besteht und das} \\ \text{andere bei } 90^\circ \text{)} \\ \text{ist nicht kleiner als} \\ \text{(die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen bei } 0^\circ \text{ besteht und das} \\ \text{andere bei } 90^\circ \text{).} \end{array} \right\} \quad (8)$$

Für den Fall, dass jemand den Umweg über die Socken ein wenig lang findet, schauen wir direkt auf das Endergebnis und sehen wie trivial es ist. Wir nehmen an, dass Teilchen Eigenschaften haben, die ihre Fähigkeit festlegen, bestimmte Tests zu bestehen – ob diese Tests tatsächlich gemacht werden oder nicht. Um zu die perfekte Antikorrelation zu erklären, wenn an den zwei Teilen eines Paares identische Tests (parallele Stern-Gerlach-Magnete) angewendet werden, müssen wir die verallgemeinerte Paarbildung à la Bertlmann benutzen – wenn eines die Fähigkeit hat, einen bestimmten Test zu bestehen, hat das andere sie nicht. Dann ist die obige Behauptung über Paare äquivalent zur folgenden Behauptung über jedes Teil eines Paares:

$$\left. \begin{array}{l} \text{(die Wahrscheinlichkeit imstande zu sein, bei } 0^\circ \text{ zu bestehen und} \\ \text{nicht imstande bei } 45^\circ \text{)} \\ \text{plus} \\ \text{(die Wahrscheinlichkeit imstande zu sein, bei } 45^\circ \text{ zu bestehen und} \\ \text{nicht imstande bei } 90^\circ \text{)} \\ \text{ist nicht kleiner als} \\ \text{(die Wahrscheinlichkeit imstande zu sein, bei } 0^\circ \text{ zu bestehen und} \\ \text{nicht imstande bei } 90^\circ \text{).} \end{array} \right\} \quad (9)$$

Und das ist in der Tat trivial. Denn ein Teilchen, das imstande ist, bei 0° zu bestehen und nicht bei 90° (und das damit zur dritten Wahrscheinlichkeit in (9) beiträgt) ist entweder imstande, bei 45° zu bestehen (und trägt somit zur zweiten Wahrscheinlichkeit bei) oder nicht imstande, bei 45° zu bestehen (und trägt somit zur ersten Wahrscheinlichkeit bei).

So trivial diese Ungleichung jedoch auch sein mag, sie wird dennoch durch die quantenmechanischen Wahrscheinlichkeiten nicht eingehalten. Aus (4) ist die quantenme-

chanische Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen einen Magneten mit der Orientierung a und das andere einen Magneten mit der Orientierung b passiert (bezeichnet mit $P(\text{up}, \text{up})$)

$$\frac{1}{2} \left(\sin \frac{a-b}{2} \right)^2 .$$

Ungleichung (9) würde dann verlangen

$$\frac{1}{2}(\sin 22.5^\circ)^2 + \frac{1}{2}(\sin 22.5^\circ)^2 \geq \frac{1}{2}(\sin 45^\circ)^2$$

oder

$$0.1464 \geq 0.2500$$

was nicht wahr ist.

Wir fassen noch einmal die Logik zusammen, die in diese Sackgasse führte. Die EPRB-Korrelationen sind von der Art, dass das Ergebnis des Experiments an einer Seite unmittelbar das auf der anderen vorhersagt; immer dann, wenn die Analysatoren parallel sind. Wenn wir den Eingriff auf einer Seite nicht als kausalen Einfluss auf die andere akzeptieren, scheinen wir gezwungen zuzugeben, dass die Ergebnisse an beiden Seiten irgendwie im voraus bestimmt sind; durch Signale von der Quelle und durch die lokale Magneteinstellung. Aber das hat Auswirkungen für nichtparallele Einstellungen, die den Prognosen der Quantenmechanik widersprechen. Darum können wir den Eingriff auf einer Seite als kausalen Einfluss auf die andere *nicht* verwerfen.

Es wäre falsch zu sagen „Bohr gewinnt wieder“ (Anhang 1); das Argument war den Gegenspielern von Einstein, Podolsky und Rosen nicht bekannt. Aber sicherlich könnte Einstein nicht länger so einfach schreiben, wenn er von lokaler Kausalität spricht „... kann ich dennoch nirgendwo einen Fakt finden, der es wahrscheinlich erscheinen lässt, dass diese Voraussetzung aufgegeben werden muss.“

16.4 Allgemeine Beweisführung

Bis hierher war die Darstellung auf Einfachheit ausgerichtet. Jetzt ist das Ziel Allgemeinheit [17]. Wir listen zunächst einige Aspekte der einfachen Darstellung auf, die nicht wesentlich sind und weggelassen werden.

Die obige Diskussion beruht stark auf der Perfektion der Korrelation (oder genauer: Antikorrelation), wenn die zwei Magnete parallel ausgerichtet sind ($a = b$) und die anderen Bedingungen genauso ideal sind. Obwohl man hoffen kann, dieser Situation in der Praxis näherzukommen, kann man nicht hoffen, sie vollständig zu realisieren. Alle weiteren Mängel des Aufbaus würden die perfekte Antikorrelation verfälschen, und dann würden gelegentlich beide Teilchen nach unten abgelenkt oder beide nach oben. Darum werden wir in der anspruchsvolleren Beweisführung jede Hypothese über Perfektion vermeiden.

Nur im Kontext der perfekten Korrelation (oder Antikorrelation) konnte der *Determinismus* gefolgert werden – für die Relation der Beobachtungsergebnisse zu vorher vorhandenen Teilcheneigenschaften (weil jeder Indeterminismus die Korrelation zerstören würde). Ungeachtet meines Beharrens darauf, dass der Determinismus vielmehr gefolgert als angenommen wird, könnten Sie immer noch den leisen Verdacht haben, dass eine Voreingenommenheit für den Determinismus das Problem verursacht. Darum beachten Sie genau, dass die folgende Beweisführung den Determinismus in keiner Weise benutzt.

Sie könnten vermuten, dass es eine besondere Eigenart von Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen gibt. Aber tatsächlich gibt es viele andere Methoden, die problematischen Korrelationen zu erzeugen. Deshalb nimmt die folgende Beweisführung keinen Bezug auf Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen, oder irgendwelche anderen besonderen Teilchen.

Schließlich könnten Sie vermuten, dass die bloße Vorstellung von Teilchen und Teilchenbahnen, die oben bei der Einführung in das Problem des Öfteren benutzt wurden, uns in die Irre geführt haben. Dachte nicht Einstein in der Tat, dass eher Felder als Teilchen die Grundlage von Allem sind? Deshalb wird die folgende Beweisführung weder Teilchen noch Felder erwähnen, noch irgend ein anderes spezielles Bild dessen, was auf mikroskopischer Ebene abläuft. Noch wird sie in irgendeiner Weise die Worte „quantenmechanisches System“ benutzen, die eine ungünstige Auswirkung auf die Diskussion haben kann. Die Schwierigkeit wird nicht durch irgendeines dieser Bilder, oder irgendeinen dieser Begriffe, hervorgerufen. Sie wird hervorgerufen durch die Vorhersagen über die Korrelationen in den sichtbaren Ausgaben von bestimmten, denkbaren Versuchsanordnungen.

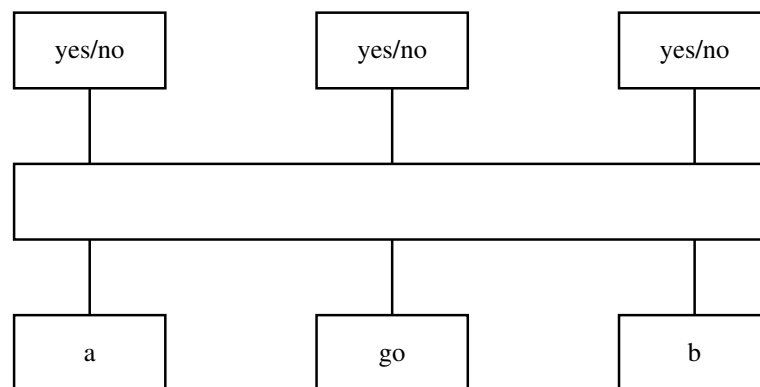


Abb. 16.7: Allgemeine EPR-Anordnung mit drei Inputs unten und drei Outputs oben

Betrachten wir die allgemeine Versuchsanordnung in Abb. 16.7. Um unwichtige Details zu vermeiden, ist sie nur als ein langer Kasten dargestellt, mit unspezifiziertem Inneren und mit drei Inputs und drei Outputs. Die Outputs, oben im Bild, können drei

Stücke Papier sein, auf denen entweder „yes“ oder „no“ ausgedruckt wird. Der mittlere Input ist einfach ein „go“-Signal, das den Versuch zur Zeit t_1 beginnen lässt. Kurz danach sagt der mittlere Output „yes“ oder „no“. Wir sind nur an den „yes“ interessiert, die bestätigen, dass alles gut gestartet ist (z.B. es gibt keine „Teilchen“, die in falsche Richtungen laufen, und so weiter). Zu einer Zeit $t_1 + T$ erscheinen die anderen Outputs, jeder mit „yes“ oder „no“ (zum Beispiel abhängig davon, ob auf der „up“-Seite eines Detektorschirms hinter einem lokalen Stern-Gerlach-Magneten ein Signal erschienen ist oder nicht). Dann ruht der Apparat und erholt sich intern in Vorbereitung auf eine folgende Wiederholung des Versuchs. Aber kurz vor der Zeit $t_1 + T$, sagen wir zur Zeit $t_1 + T - \delta$, werden die Signale a und b an den beiden Enden eingespeist. (Sie mögen zum Beispiel festlegen, dass die Stern-Gerlach-Magnete um die Winkel a und b von einer Standardposition weggedreht werden.) Wir können es einrichten, dass $c\delta \ll L$ ist, wobei c die Lichtgeschwindigkeit und L die Länge des Kastens ist; dann haben wir (wegen der mangelnden Zeit) nicht zu erwarten, dass das Signal an einem Ende irgendeinen Einfluss auf den Output des anderen hat, was auch immer für verborgene Verbindungen zwischen den beiden Enden vorhanden sind.

Ausreichend viele Wiederholungen des Versuchs erlauben uns Tests der Hypothesen über die verbundene, bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung

$$P(A, B|a, b)$$

für die Ergebnisse A und B an den beiden Enden, für gegebene Signale a und b .

Nun wäre es natürlich keine Überraschung festzustellen, dass die Ergebnisse A und B korreliert sind, d.h. dass P nicht in ein Produkt unabhängiger Faktoren zerfällt:

$$P(A, B|a, b) \neq P_1(A|a)P_2(B|b).$$

Aber wir werden darlegen, dass einige bestimmte Korrelationen, die gemäß der Quantenmechanik realisierbar sind, *lokal unerklärbar* sind. Das heißt, sie können nicht ohne Fernwirkung erklärt werden.

Um das „Unerklärbare“ zu erklären, erklären wir „erklärbar“. Zum Beispiel zeigt die Statistik der Herzattacken in Lille und Lyon starke Korrelationen. Die Wahrscheinlichkeit von M Fällen in Lyon und N Fällen in Lille an einem willkürlich ausgewählten Tag ist nicht zerlegbar:

$$P(M, N) \neq P_1(M)P_2(N).$$

Wenn zum Beispiel M über dem Mittelwert liegt, tendiert auch N dazu, über dem Mittel zu sein. Sie könnten mit den Schultern zucken und sagen, „Zufälle passieren immer wieder“, oder „so ist das Leben“. Ein solcher Standpunkt wird tatsächlich mitunter von ansonsten seriösen Leuten im Zusammenhang mit der Quantenphilosophie vertreten. Aber außerhalb dieses besonderen Zusammenhangs würde ein solcher Standpunkt als unwissenschaftlich abgetan werden. Der wissenschaftliche Standpunkt ist, dass Korrelationen nach Erklärungen schreien. Und im gegebenen Beispiel sind Erklärungen natürlich schnell gefunden. Das Wetter ist in beiden Städten sehr ähnlich und heiße

Tage sind schlecht für Herzattacken. Der Wochentag ist in beiden Städten genau derselbe und Sonntage sind besonders schlecht, wegen der Familienstreitereien und zuviel Essen. Und so weiter. Es scheint aber vernünftig zu erwarten, dass, wenn ausreichend viele solche kausalen Faktoren identifiziert und festgehalten werden, die *übrigen* Fluktuationen unabhängig sind, d.h.

$$P(M, N|a, b, \lambda) = P_1(M|a, \lambda)P_2(N|b, \lambda), \quad (10)$$

wobei a und b die Temperaturen in Lyon bzw. Lille sind; λ irgendeinen Satz von anderen Variablen bezeichnet, die relevant sein können, und $P(M, N|a, b, \lambda)$ ist die bedingte Wahrscheinlichkeit von M Fällen in Lyon und N in Lille für *gegebene* (a, b, λ) . Wohlgemerkt haben wir in (10) bereits die Hypothese der „lokalen Kausalität“, oder „keine Fernwirkung“, eingebaut. Denn wir erlauben weder, dass der erste Faktor von b abhängt, noch der zweite von a . Das heißt, wir lassen die Temperatur in Lyon nicht als kausalen Einfluss in Lille zu, und umgekehrt.

Lassen Sie uns dann annehmen, dass die Korrelationen zwischen A und B im EPR-Versuch in gleicher Art „lokal erklärbar“ sind. Das heißt, wir nehmen an, es gibt Variablen λ , die, wenn wir sie nur kennen würden, die Entkopplung der Fluktuationen gestatten würden:

$$P(A, B|a, b, \lambda) = P_1(A|a, \lambda)P_2(B|b, \lambda). \quad (11)$$

Dann haben wir eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(\lambda)$ über diese ergänzenden Variablen zu betrachten, und mit der gemittelten Wahrscheinlichkeit

$$P(A, B|a, b) = \int d\lambda f(\lambda)P(A, B|a, b, \lambda) \quad (12)$$

erhalten wir die quantenmechanischen Vorhersagen.

Aber nicht nur jede Funktion $P(A, B|a, b)$ kann in der Form (12) dargestellt werden, auch Kombinationen davon. Wir betrachten hier die Kombination:

$$E(a, b) = P(\text{yes, yes}|a, b) + P(\text{no, no}|a, b) - P(\text{yes, no}|a, b) - P(\text{no, yes}|a, b). \quad (13)$$

Dafür ist es einfach zu zeigen (Anhang 2), dass wenn (12) gilt (mit beliebig vielen Variablen λ und beliebiger Verteilung $f(\lambda)$), dann folgt die Clauser-Holt-Horne-Shimony-Ungleichung [18]

$$|E(a, b) + E(a, b') + E(a', b) - E(a', b')| \leq 2. \quad (14)$$

Gemäß der Quantenmechanik, zum Beispiel mit einer praktischen Näherung zur EPRB-Gedankenkonfiguration, können wir jedoch (aus (4)) näherungsweise erhalten

$$E(a, b) = \left(\sin \frac{a-b}{2} \right)^2 - \left(\cos \frac{a-b}{2} \right)^2 = -\cos(a-b). \quad (15)$$

Nehmen wir zum Beispiel

$$a = 0^\circ, \quad a' = 90^\circ, \quad b = 45^\circ, \quad b' = -45^\circ, \quad (16)$$

dann haben wir aus (15)

$$E(a, b) + E(a, b') + E(a', b) - E(a', b') = -3 \cos 45^\circ + \cos 135^\circ = -2\sqrt{2}. \quad (17)$$

Das ist im Widerspruch zu (14). Beachten Sie, dass es für diesen Widerspruch nicht nötig ist, (15) exakt zu realisieren. Eine genügend gute Approximation reicht aus, denn zwischen (14) und (17) liegt ein Faktor von $\sqrt{2}$.

Damit sind die Quantenkorrelationen lokal unerklärbar. Um die Ungleichung zu vermeiden, könnten wir erlauben, dass P_1 in (11) von b abhängt oder P_2 von a . Das heißt, wir könnten den Input an einem Ende als kausalen Einfluss auf das andere Ende zulassen. Für den beschriebenen Aufbau wäre das nicht nur ein geheimnisvoller Einfluss auf große Distanz – eine Nichtlokalität oder Fernwirkung im weiteren Sinne; sondern eine, die sich schneller als Licht fortpflanzt (weil $c\delta \ll L$); eine Nichtlokalität im engeren und unverdaulicheren Sinne.

Es ist bemerkenswert, dass in dieser Beweisführung nichts über die Lokalität oder gar Lokalisierbarkeit der Variablen λ gesagt wird. Diese Variablen können zum Beispiel durchaus quantenmechanische Zustandsvektoren beinhalten, die keine bestimmte Lokalisierung in der gewöhnlichen Raumzeit haben. Es wird lediglich angenommen, dass die Outputs A und B und die jeweiligen Inputs a und b genau lokalisiert sind.

16.5 Envoi

Zum Abschluss werde ich vier mögliche Positionen kommentieren, die in dieser Angelegenheit eingenommen werden können – ohne vorzugeben, dass sie die einzigen Möglichkeiten sind.

Erstens, und denjenigen von uns, die von Einstein inspiriert sind, würde das am besten gefallen: die Quantenmechanik mag in hinreichend kritischen Situationen *falsch* sein. Vielleicht ist die Natur nicht so sonderbar wie die Quantenmechanik. Aber die experimentelle Situation ist von diesem Gesichtspunkt aus [19] nicht sehr ermutigend. Es ist wahr, dass praktische Experimente weit vom Ideal entfernt sind – wegen der Zähler- und Analysator-Ineffizienzen, der geometrischen Ungenauigkeiten, und so weiter. Nur mit zusätzlichen Annahmen, oder der üblichen Anerkennung der Ineffizienzen und Extrapolation vom Realen zum Idealen, kann man behaupten, dass die Ungleichung verletzt wird. Obwohl es hier einen Ausweg gibt, fällt es mir schwer zu glauben, dass die Quantenmechanik für ineffiziente, praktische Aufbauten so gut funktioniert und dennoch völlig versagen soll, wenn ausreichende Verbesserungen gemacht werden. Von größerer Wichtigkeit ist nach meiner Meinung das völlige Fehlen des zentralen Faktors *Zeit* in den gegenwärtigen Experimenten. Die Analysatoren werden nicht während

des Fluges der Teilchen gedreht. Selbst wenn man genötigt ist, einen weit reichenden Einfluss zuzugeben, muss sich dieser nicht schneller als Licht bewegen – und wäre so viel weniger unverdaulich. Für mich ist es darum von größter Wichtigkeit, dass Aspect [19,20] an einem Experiment arbeitet, bei dem der Faktor „Zeit“ eingeführt wird.

Zweitens mag es sein, dass es nicht zulässig ist, die experimentellen Einstellungen der Analysatoren a und b als unabhängige Variablen zu betrachten, wie wir es taten [21]. Wir nahmen sie insbesondere als unabhängig von den zusätzlichen Variablen λ an, insofern, dass a und b geändert werden können, ohne die Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(\lambda)$ zu ändern. Auch wenn wir es arrangiert haben, dass a und b durch anscheinend zufällige radioaktive Geräte erzeugt werden, eingeschlossen in getrennten Kästen und dick abgeschirmt, oder durch Nationale Schweizer Lotteriemaschinen, oder durch ausgefeilte Computerprogramme, oder durch Experimentalphysiker mit anscheinend freiem Willen, oder durch irgendeine Kombination von alledem, können wir nicht *sicher* sein, dass a und b nicht wesentlich beeinflusst werden durch dieselben Faktoren λ , die A und B beeinflussen [21]. Aber dieser Weg, die quantenmechanischen Korrelationen einzuordnen, wäre noch verwirrender als einer, bei dem Kausalketten sich schneller als Licht bewegen. Anscheinend getrennte Teile der Welt wären zutiefst und konspirativ verschränkt, und unser anscheinend freier Wille wäre verschränkt mit ihnen.

Drittens mag es sein, dass wir einräumen müssen, *dass* sich kausale Einflüsse schneller als Licht bewegen. Die Rolle der Lorentzinvarianz in der vervollständigten Theorie wäre dann sehr problematisch. Ein „Äther“ wäre die billigste Lösung [22]. Aber die Unbeobachtbarkeit dieses Äthers wäre störend. Ebenso störend wäre die Unmöglichkeit von „Botschaften“ schneller als Licht, die aus der gewöhnlichen relativistischen Quantenmechanik folgt, insoweit sie widerspruchsfrei und adäquat für Prozeduren ist, die wir tatsächlich ausführen können. Die exakte Erhellung von Konzepten, wie „Botschaft“ und „wir“, wäre eine beachtliche Herausforderung.

Viertens und letztens mag es sein, dass Bohrs Intuition richtig war: dass es keine Realität unter einer „klassischen“ „makroskopischen“ Ebene gibt. Dann würde die fundamentale physikalische Theorie fundamental vage bleiben, bis Konzepte, wie „makroskopisch“, klarer als heute gemacht werden können.

Anhang 1 – Die Position von Bohr

Obwohl ich mir einbilde, die Position Einsteins [23,24] zu verstehen, was die EPR-Korrelationen angeht, habe ich sehr wenig Verständnis für die Position seines Hauptgegenspielers Bohr. Doch die meisten Theoretiker der Gegenwart haben den Eindruck, dass Bohr in der Diskussion mit Einstein die Nase vorn hat; und meinen, dass sie selbst Bohrs Ansichten teilen. Als einen Hinweis auf diese Ansichten zitiere ich eine Textpassage [25] aus seiner Antwort an Einstein, Podolsky und Rosen. Es ist eine Passage, die Bohr selbst als endgültig betrachtet zu haben scheint, denn er zitiert sie selbst, als er viel später resümiert [26]. Einstein, Podolsky und Rosen hatten angenommen, dass „... wenn wir, ohne ein System in irgendeiner Weise zu stören, mit Sicherheit den

Wert einer physikalischen Größe vorhersagen können, dann existiert ein Element der physikalischen Realität, das dieser physikalischen Größe entspricht.“ Bohr antwortete:

... die Formulierung im oben erwähnten Kriterium... enthält eine Unklarheit, was die Bedeutung des Ausdrucks „ohne ein System in irgendeiner Weise zu stören“ betrifft. Natürlich gibt es in einem Fall, wie dem gerade betrachteten, keine Frage einer mechanischen Störung eines untersuchten Systems während der letzten, kritischen Phase der Messprozedur. Aber sogar in dieser Phase, ist die Frage entscheidend nach *einem Einfluss auf die genauen Bedingungen, die die möglichen Typen von Vorhersagen definieren, das zukünftige Verhalten des Systems betreffend...* Ihre Argumentation rechtfertigt nicht ihre Schlussfolgerung, dass die quantenmechanische Beschreibung grundlegend unvollständig ist... Diese Beschreibung kann charakterisiert werden als rationale Ausnutzung aller Möglichkeiten eindeutiger Interpretationen von Messungen, die verträglich sind mit der endlichen und unkontrollierbaren Wechselwirkung zwischen den Objekten und den Messinstrumenten im Bereich der Quantentheorie.

In der Tat habe ich sehr wenig Ahnung, was das bedeutet. Ich verstehe nicht, in welchem Sinne das Wort „mechanisch“ benutzt wird; in der Charakterisierung der Störungen, die Bohr nicht in Erwägung zieht, im Unterschied zu denjenigen, bei denen er das tut. Ich weiß nicht, was die kursiv gesetzte Passage bedeutet: „ein Einfluss auf die genauen Bedingungen...“. Könnte es nur bedeuten, dass verschiedene Experimente mit dem ersten System verschiedene Arten von Informationen über das zweite geben? Aber das war nur einer der Hauptpunkte von EPR, die bemerkten, dass man *entweder* die Position *oder* den Impuls des zweiten Systems bestimmen kann. Und dann verstehe ich nicht den letzten Verweis auf die „unkontrollierbare Wechselwirkung zwischen den Objekten und den Messinstrumenten“; er scheint nur den grundlegenden Punkt von EPR zu ignorieren, dass man beim Fehlen einer Fernwirkung annehmen kann, dass allein das erste System durch die erste Messung gestört wird, und dennoch eindeutige Vorhersagen für das zweite System möglich werden. Verwirft Bohr nur die Voraussetzung – „keine Fernwirkung“ – anstatt den Streitpunkt zu widerlegen?

Anhang 2 – Clauser-Holt-Horne-Shimony-Ungleichung

Aus (13) und (11) folgt

$$\begin{aligned} E(a,b) &= \int d\lambda f(\lambda) \{P_1(\text{yes}|a,\lambda) - P_1(\text{no}|a,\lambda)\} \{P_2(\text{yes}|b,\lambda) - P_2(\text{no}|b,\lambda)\} \\ &= \int d\lambda f(\lambda) \bar{A}(a,\lambda) \bar{B}(b,\lambda) \end{aligned} \quad (18)$$

wobei \bar{A} und \bar{B} für die erste und zweite geschweifte Klammer stehen. Beachten Sie, dass, weil die P s Wahrscheinlichkeiten sind, gilt

$$0 \leq P_1 \leq 1, \quad 0 \leq P_2 \leq 1$$

und

$$|\bar{A}(a, \lambda)| \leq 1, \quad |\bar{B}(b, \lambda)| \leq 1. \quad (19)$$

Aus (18)

$$E(a, b) \pm E(a, b') \leq \int d\lambda f(\lambda) \bar{A}(a, \lambda) (\bar{B}(b, \lambda) \pm \bar{B}(b', \lambda))$$

und darum aus (19)

$$|E(a, b) \pm E(a, b')| \leq \int d\lambda f(\lambda) |\bar{B}(b, \lambda) \pm \bar{B}(b', \lambda)|$$

ebenso

$$|E(a', b) \mp E(a', b')| \leq \int d\lambda f(\lambda) |\bar{B}(b, \lambda) \mp \bar{B}(b', \lambda)|.$$

Nochmalige Benutzung von (19)

$$|\bar{B}(b, \lambda) \pm \bar{B}(b', \lambda)| + |\bar{B}(b, \lambda) \mp \bar{B}(b', \lambda)| \leq 2$$

und dann mit

$$\int d\lambda f(\lambda) = 1$$

folgt

$$|E(a, b) \pm E(a, b')| + |E(a', b) \mp E(a', b')| \leq 2 \quad (20)$$

was (14) mit einschließt.

Anmerkungen und Literatur

- [1] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, *Phys. Rev.* **46**, 777, (1935).² Zur Einführung siehe den beigefügten Artikel von F. Laloë
- [2] D. Bohm, *Quantum Theory*. Englewood Cliffe, New Jersey (1951).
- [3] Man beachte jedoch, dass diese *speziellen* Phänomene eigentlich aus anderen Phänomenen vor der Beobachtung gefolgert wurden.
- [4] Und vielleicht Romantizismus. Siehe P. Forman, Weimar culture, causality and quantum theory, 1918-1927, in *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol. 3, 1-115. R. McCormach, ed. University of Pennsylvania Press, Philadelphia (1971).
- [5] M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, John Wiley (1974), S. 204, zitiert A. Petersen, *Bulletin of the Atomic Scientist* **19**, 12 (1963).

²AdÜ: Eine deutsche Übersetzung des Artikels ist zu finden in: K. Baumann und R. U. Sexl, *Die Deutungen der Quantentheorie*, 3. überarbeitete Aufl., Vieweg, Braunschweig 1987.

- [6] M. Jammer, ebd. S. 205, zitiert W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, S. 160, Allen and Unwin, London (1958).
- [7] M. Jammer, ebd. S. 161, zitiert E. Zilsel, P. Jordans Versuch, den Vitalismus quantenmechanisch zu retten, *Erkenntnis* **5**, (1935) 56-64.
- [8] Der Ausdruck ist aus einem Brief von Einstein an Born, 1947, Ref. [11], S. 158. (dt. Ausgabe, S. 255).
- [9] Der beigegefügte Artikel von F. Laloë gibt eine Einführung in den Quanten-Formalismus.
- [10] Und seine Anhänger. Mein eigener erster Artikel über dieses Thema (*Physics* **1**, 195 (1965).) beginnt mit einer Zusammenfassung der EPR-Erörterung *von der Lokalität zu deterministischen verborgenen Variablen*. Aber die Kommentatoren haben fast einhellig berichtet, dass er mit deterministischen verborgenen Variablen beginnt.
- [11] M. Born (Editor), *The Born-Einstein-Letters*, S. 221. (Macmillan, London (1971)).³
- [12] M. Born, ebd., S. 176 (dt. Ausgabe, S. 283).
- [13] A. Einstein, *Dialectica*, 320, (1948). Eingefügt in einem Brief an Born, Ref. [11]. S. 168. (dt. Ausgabe, S. 274).
- [14] B. d'Espagnat, *Scientific American*, S. 158. November 1979.
- [15] B. d'Espagnat, *A la Recherche du Réel*. Gauthier-Villars, Paris (1979).
- [16] „Die Anzahl der jungen Frauen ist kleiner oder gleich der Anzahl von weiblichen Rauchern plus der Anzahl junger Nichtraucher.“ (Ref. 15, S. 27). Siehe auch: E.P. Wigner, *Am. J. Phys.* **38**, 1005 (1970).
- [17] Andere Diskussionen mit einigem Anspruch auf Allgemeinheit sind: J. F. Clauser and M. A. Horne, *Phys. Rev.* **10D** (1974) 526; J. S. Bell, CERN preprint TH-2053 (1975), nachgedruckt in *Epistemological Letters* (Association Ferd. Gonseth, CP 1081, CH-2051, Bienne) **9** (1976) 11; [Kapitel 7 im vorliegenden Buch] H. P. Stapp, *Foundations of Physics* **9** (1979) 1. Viele andere Referenzen sind in den Reviews von Clauser und Shimony, und Pipkin in Ref. 19. enthalten.
- [18] J. F. Clauser, R. A. Holt, M. A. Horne and A. Shimony, *Phys. Rev. Lett.* **23**, 880 (1969).
- [19] Die experimentelle Situation wird im beigegeführten Artikel von A. Aspect begutachtet. Siehe auch: J. F. Clauser and A. Shimony, *Rep. Prog. Phys.* **41**, 1881 (1978); F. M. Pipkin, *Ann. Rev. Nuc. Sci.* (1978).

³AdÜ: Deutsche Ausgabe *Albert Einstein – Max Born, Briefwechsel 1916 - 1955*, S. 348. (F.A. Herbig Verlagsbuchhandlung, München (1969, 3. Aufl. 2005)).

- [20] A. Aspect, *Phys. Rev.* **14D**, 1944 (1976).
- [21] Für eine explizite Diskussion dazu, siehe die Beiträge von Shimony, Horne, Clauser und Bell in *Epistemological Letters* (Association Ferdinand Gonseth, CP 1081, CH-2051, Bienne) **13**, S. 1 (1976); **15**, S. 79, (1977) and **18**, S. 1 (1978). Siehe auch: Clauser and Shimony in Ref. 19.
- [22] P. H. Eberhard, *Nuovo Cimento* **46B**, 392 (1978).
- [23] Aber Max Jammer meint, dass ich Einstein falsch darstelle (Ref. 5, S. 254). Ich habe meine Ansichten in Ref. 24 verteidigt.
- [24] J. S. Bell, in *Frontier Problems in High Energy Physics, in honour of Gilberto Bernardini*. Scuola Normale, Pisa (1976). [Kapitel 10 im vorliegenden Buch]
- [25] N. Bohr, *Phys. Rev.* **48**, 696 (1935).⁴
- [26] N. Bohr, in *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*. P. A. Schilpp, Ed., Tudor, N.Y., (1949).

⁴AdÜ: Eine deutsche Übersetzung des Artikels ist zu finden in: K. Baumann und R. U. Sexl, *Die Deutungen der Quantentheorie*, 3. überarbeitete Aufl., Vieweg, Braunschweig 1987.