

4.4.5 Nicht-Separabilität

Wir hatten oben argumentiert, dass die Unterscheidung zwischen einer kausalen Nicht-Lokalität, die impliziert, dass man Signale senden kann, und einer quasi-kausalen Nicht-Lokalität, die es nicht erlaubt, Signale zu senden, nicht überzeugend ist. Viel einleuchtender ist es, die Tatsache, dass man mit der Quanten-Nicht-Lokalität keine Signale senden kann, dadurch zu erklären, dass es eine Feinabstimmung der kausalen Parameter gibt.

Dennoch scheint an der Intuition, dass die Nicht-Lokalität der Quantenwelt keine kausale Relation im üblichen Sinne ist, etwas dran zu sein. Um diese Idee genauer zu begründen, müssen wir etwas weiter ausholen und einige Begriffe einführen. Der folgende Gedankengang stützt sich auf eine von Einstein (1948) aufgebraute und durch Howard (1985) für die moderne Diskussion wiederentdeckte Unterscheidung zwischen *Separabilität* und *Lokalität*. Einstein formuliert damit die grundlegenden Prinzipien einer lokalen Weltsicht, wie sie in der Relativitätstheorie und den Feldtheorien zum Ausdruck kommen. Mit Lokalität ist das oben eingeführte Prinzip der kausalen Einstein-Lokalität gemeint, dass es keine Wirkungen schneller als Licht geben darf, d.h. keine kausalen Relationen zwischen raumartig getrennten Raumzeit-Punkten. Einstein macht aber deutlich, dass es für eine lokale Welt nicht genügt, dass die *Dynamik* in dem genannten Sinne lokal ist. Man muss auch fordern, dass die *Zustände* in folgendem Sinne *lokalisiert* sind (Howard, 1989):

(Raumzeitliche) Separabilität: Für jedes Paar nicht-überlappender Raum-Zeit-Regionen A und B gilt:

1. Jede der Regionen hat ihren eigenen, getrennten Zustand, und
2. der gemeinsame Zustand, d.h. der Zustand der Gesamtregion $A \cup B$, ist durch den Zustand von A und den Zustand von B und den raumzeitlichen Relationen dazwischen festgelegt.

Da dies für jedes Paar von Raumzeit-Regionen gelten soll, bedeutet das Prinzip letztlich, dass jeder Raumzeit-Punkt seinen eigenen Zustand mit intrinsischen Eigenschaften (im Gegensatz zu relationalen Eigenschaften) hat und dass die Zustände ausgedehnter Raumzeit-Regionen über denen ihrer punktförmigen Bestandteile und den raumzeitlichen Relationen dazwischen supervenieren.⁷ Dieses Prinzip ist in der klassischen Feldtheorie verwirklicht, gemäß der z.B. das elektrische und das

⁷ Der Begriff der Supervenienz hat seinen Ursprung in der Philosophie des Geistes und in der Metaethik. Cleland (1984) hat eine Variante des ursprünglichen Begriffs in die Debatte um Raum und Zeit eingeführt, und es ist diese Variante, die in der Debatte um verschränkte Quantensysteme angewandt wird (vgl. z.B. French 1989, Esfeld 2004). In nicht-technischer

magnetische Feld an jedem Punkt einen definierten Wert haben und das Gesamtfeld durch die Werte an den einzelnen Punkten festgelegt ist. Einstein misst dem Prinzip eine tiefe methodische Bedeutung zu:

Ohne die Annahme einer solchen Unabhängigkeit der Existenz (des „So-Seins“) der räumlich distanten Dinge voneinander, die zunächst dem Alltags-Denken entstammt, wäre physikalisches Denken in dem uns geläufigen Sinne nicht möglich. Man sieht ohne solche saubere Sondernung auch nicht, wie physikalische Gesetze formuliert und geprüft werden könnten. (Einstein, 1948, 321)

Auch aus philosophischer Sicht ist das Prinzip eine attraktive Forderung, weil seine Gültigkeit implizieren würde, dass man ontologisch alle physikalischen Zustände von ausgedehnten Regionen auf die intrinsischen Eigenschaften an den Raumzeit-Punkten reduzieren kann. Dies würde bedeuten, dass man ontologisch besonders sparsam sein kann – was generell als attraktive Eigenschaft betrachtet wird. D. Lewis hat ein ähnliches Prinzip unter dem Label „Humesche Supervenienz“ in die philosophische Literatur eingeführt:⁸

Humean supervenience is named in honour of the great denier of necessary connections. It is the doctrine that all there is to the world is a vast mosaic of local matter of particular facts, just one little thing and then another. [...] We have geometry: a system of external relations of spatio-temporal distance between points. Maybe points of spacetime itself, maybe point-sized bits of matter or aether or fields, maybe both. And at those points we have local qualities: perfect natural intrinsic properties which need nothing bigger than a point at which to be instantiated. For short: we have an arrangement of qualities. And that is all. There is no difference without difference in the arrangement of qualities. All else supervenes on that. (Lewis, 1986, ix-x)

Form besagt die Definition: Eine dyadische Relation R ist supervenient über einer determinablen, nicht-relationalen Eigenschaft P genau dann, wenn (i) jedes der Relata von R die Eigenschaft P auf determinierte Weise instanziiert und (ii) die Instanzierungen der Eigenschaft P die Relation R festlegen.

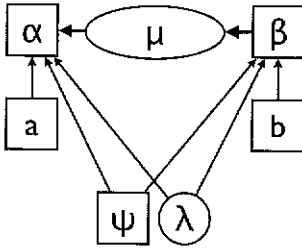
⁸ Obwohl ähnlich, decken sich die beiden Prinzipien nicht. Humesche Supervenienz ist einerseits stärker als das Prinzip der Nicht-Separabilität, weil sie fordert, dass *alles* über den Zuständen von Raumzeit-Punkten superveniert, also nicht nur die Zustände von ausgedehnten Raumzeit-Regionen, sondern auch Entitäten, die nicht unbedingt in Raum und Zeit verortet sein müssen, wie z.B. mentale Zustände oder Zahlen. Humesche Supervenienz ist andererseits aber auch schwächer als Nicht-Separabilität, weil sie im Gegensatz zu letzterem nicht fordert dass die Supervenienz *lokal* ist. Die Frage, ob z.B. ein Ereignis in Region A ein anderes Ereignis in Region B verursacht, wird bei Lewis nicht durch den Zustand der betreffenden Raumzeit-Regionen festgelegt, sondern durch die gesamten Raumzeiten aller möglichen Welten.

Soweit zur Bedeutung des Separabilitätsprinzips.

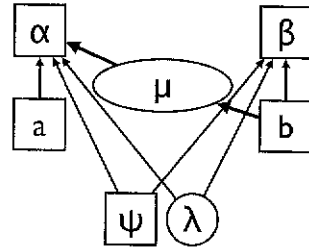
Wenn man nun durch das Bell-Argument findet, dass es eine Nicht-Lokalität auf fundamentaler Ebene geben muss, ist es eine interessante und wichtige Frage, ob diese Nicht-Lokalität durch eine nicht-lokale kausale Relation (Verletzung des Lokalitätsprinzips) oder durch einen nicht-lokalen Zustand (Verletzung des Separabilitätsprinzips) realisiert ist. Ersteres entspricht dem Fall, den wir bisher still vorausgesetzt hatten, dass die Zustände, d.h. die Variablen in den kausalen Diagrammen, tatsächlich lokalisiert sind, d.h. ganz bestimmten beschränkten Raumzeit-Regionen zukommen. Sofern sie makroskopische Variablen sind, die sich über eine endliche Raumzeit-Region erstrecken, gehen wir davon aus, dass sie über den Zuständen ihrer Subregionen supervenieren. In einem solchen Fall wäre Separabilität erfüllt, und es wären vielmehr die kausalen Relationen, die sich nicht-lokal erstrecken (siehe die Diagramme in Abbildung 4.6). Der zweite Vorschlag hingegen liefe auf den bisher nicht diskutierten Fall hinaus, dass alle kausalen Relationen rein lokal sind, aber manche der Variablen in der kausalen Struktur nicht lokalisiert sind. Dies würde bedeuten, dass es Zustände gibt, die sich über eine ausgedehnte Raumzeit-Region erstrecken, aber nicht durch die Zustände der Subregionen beschreibbar sind. Solche Zustände heißen „(raumzeitlich) nicht-separabel“.

Wir haben die Prototypen nicht-lokaler kausaler Erklärungen, die eine Nicht-Separabilität involvieren, in Abbildung 4.7 dargestellt. In den Abbildungen 4.7a und 4.7b haben wir eine Zwischenvariable μ eingeführt, die sich nicht-lokal erstreckt. Aus der Sicht kausaler Graphen ist dies immer möglich: Kausale Graphen müssen nicht alle Zwischenvariablen für einen kausalen Pfad auflisten (und tun dies in der Regel auch nicht). Dennoch bleibt aus physikalischer Sicht die Frage, welcher physikalische Zustand durch μ eigentlich repräsentiert sein soll. Des Weiteren ist die Struktur in Abbildung 4.7a, wie wir in Abschnitt 4.4.4 erläutert haben, gar nicht möglich, weil sie zu schwach ist, Bellsche Ungleichungen zu verletzen. Am plausibelsten unter diesen Strukturen erscheint deshalb die indirekte Struktur in Abbildung 4.7c. Die verborgene gemeinsame Ursache λ spielt hier nicht mehr die Rolle einer verborgenen Variablen an der Quelle, sondern die eines nicht-lokalen Zustandes, der sich aus dem Zustand ψ an der Quelle entwickelt (entsprechend haben wir eine leichte Modifikation zur indirekten Struktur in Abbildung 4.6c eingeführt: ψ beeinflusst die Ergebnisse nicht mehr direkt, sondern vermittelt durch λ).

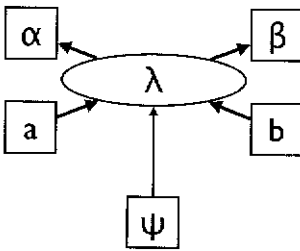
Sollten wir die Nicht-Lokalität der Quantenwelt nun eher durch nicht-lokale kausale Relationen oder durch eine Nicht-Separabilität verstehen? Tatsächlich nehmen die meisten Autoren in der Debatte an, dass es sich um eine Nicht-Separabilität handelt, und meinen oft auch, dieses aus dem Bell-Argument ableiten zu können. Es ist jedoch schwierig, dieses Ergebnis in einer überzeugenden Weise aus dem Resultat des Bell-Arguments zu begründen. Das Bell-Argument ist, wie wir gezeigt haben, ein Argument darüber, welche Variablen von welchen abhängen, letztlich also ein kausales Argument. Dass es eine Abhängigkeit zwischen raumartig



(a) Direkte Struktur



(b) Nicht-lokale gemeinsame Ursache



(c) Indirekte Struktur

Abb. 4.7: Prototypen nicht-separabler kausaler Strukturen

getrennt Variablen geben muss, sagt uns aber nichts darüber, ob diese Abhängigkeit nun durch eine Verletzung der Lokalität oder durch eine Verletzung der Separabilität zustande kommt. Im Bell-Argument selbst kann man demnach keine Begründung für diese Sicht finden.

Manche Autoren haben versucht zu argumentieren, dass es sich um eine Nicht-Separabilität handeln muss, weil es eine empirische Tatsache ist, dass man mit der Verbindung keine Signale senden kann. Dies ist aber ein Missverständnis, denn die Frage, ob man Signale senden kann oder nicht, hat nichts mit der vorliegenden Frage zu tun, wie die Nicht-Lokalität metaphysisch realisiert ist. Zum Beispiel kann man mit der nicht-separablen kausalen Struktur in Abbildung 4.7b ebenso gut Signale senden, wenn keine Feinabstimmung der kausalen Parameter vorliegt, wie mit der entsprechenden nicht-lokalen Struktur in Abbildung 4.7c. Auch diese Überlegung erweist sich somit als nicht überzeugender Ansatz.

Auf abstrakter Ebene scheint schließlich nur ein Argument zu bleiben, das für eine Nicht-Separabilität spricht, nämlich der genannte Konfliktpunkt 3 mit der Relativitätstheorie, dass eine nicht-lokale kausale Verbindung in manchen Bezugssystemen vorwärts, in manchen aber rückwärts in der Zeit laufen würde. Dieser

Konflikt mit der Asymmetrie der Kausalität scheint nahezulegen, dass die nicht-lokale Relation eine symmetrische und damit keine kausale sein sollte. Eine Nicht-Separabilität hingegen kann eine perfekt symmetrische Relation sein und umgeht diesen Konfliktpunkt.

Dieses einleuchtende, aber nicht ganz schlagende Argument bekommt schließlich Unterstützung aus einem anderen Gedankengang, der sich auf die Quantentheorie beruft. Hiermit verlassen wir die Ebene von Bells theorieunabhängigem, abstraktem Beweis und beziehen uns explizit auf eine Theorie. Tatsächlich scheint es so zu sein, dass manche der Autoren, die behauptet haben, eine Nicht-Separabilität aus Bells Argument abzuleiten, immer schon die Quantentheorie im Blick gehabt haben und sich bei den Folgerungen aus den abstrakten Tatsachen des Bell-Arguments davon haben leiten lassen.

Gemäß der Quantentheorie erstreckt sich der verschränkte Quantenzustand (4.9) zwischen den Flügeln des Experiments (und bis ins Unendliche). Man kann dies daran sehen, dass der Zustand durch Messungen sowohl an einem als auch am anderen Flügel verändert werden kann (er kollabiert dann auf einen der Terme in der Superposition), d.h. der Quantenzustand als ganzer kann von jedem Punkt seiner Ausdehnung lokal beeinflusst werden. Wenn wir die Raumzeit-Region um die linke Messung mit A bezeichnen und die Raumzeit-Region um die rechte Messung mit B, dann verletzt die Quantentheorie klarerweise die erste Bedingung des Separabilitätsprinzips: Es ist nicht der Fall, dass A und B eigene, getrennte Zustände haben, weil es einen Zustand gibt, nämlich den des verschränkten Photonenpaares, der sich über beide Regionen erstreckt. (Eine Verletzung der ersten Bedingung zieht übrigens aus logischen Gründen auch eine Verletzung der zweiten Bedingung nach sich: Wenn die Regionen keine getrennten, unabhängigen Zustände haben, kann man auch nicht davon sprechen, dass der Gesamtzustand auf den getrennten Zuständen superveniert.) Kurz gesagt: Nicht-lokale Zustände verletzen Separabilität, also stellt der nicht-lokale Quantenzustand eine Nicht-Separabilität dar. Man kann zeigen, dass der quantenmechanische Formalismus eine kausale Struktur wie die in Abbildung 4.7c gezeigte hat. Alle kausalen Relationen sind lokal, und es ist der nicht-lokale Quantenzustand, der die Wirkung vom einen Flügel zum anderen vermittelt.

Manchmal wurde behauptet, dass eine Erklärung der EPR/B-Korrelationen mithilfe einer solchen Nicht-Separabilität einen Bruch mit einer kausalen Erklärung bedeutet. Unsere Überlegungen zeigen aber, dass dies nicht der Fall ist: Die nicht-separable Variable ist wie jede andere Variable auf eine klare Weise in eine kausale Struktur eingebettet. Auf Ebene der abstrakten kausalen Struktur ist sie eine Variable wie jede andere. Ihre Besonderheit ergibt sich erst aus ihrer speziellen und ungewöhnlichen raumzeitlichen Einbettung – diese ist aber kein kausales Charakteristikum. Insofern ist eine Nicht-Separabilität kein Bruch mit kausalen Prinzipien, sondern ein Bruch mit raumzeitlichen Annahmen, nämlich dass Variablen oder Zustände immer lokalisiert sein müssen.

Wenn die Quantenmechanik also die korrekte Theorie unserer Welt ist, gibt es eine Nicht-Separabilität. Für diese Erkenntnis hätte man aber nicht unbedingt Bells Theorem gebraucht. Hier hätte eine solide Interpretation des quantenmechanischen Formalismus genügt. Wenn man sich rein auf Bells Argument stützt und sich auf keine bestimmte Theorie verpflichtet, kann man hingegen nicht verlässlich sagen, welcher Art die resultierende Nicht-Lokalität ist: Eine andere Theorie der Mikrowelt als die Quantentheorie könnte möglicherweise die unvermeidbare Nicht-Lokalität über nicht-lokale kausale Relationen realisieren. Dies ist z.B. in manchen Interpretationen der De-Broglie-Bohm-Theorie der Fall (wenn man nämlich dem nicht-separablen Quantenpotenzial keine Realität zuschreibt).