

## 4.4 Nicht-Lokalität

### 4.4.1 Lokalität vs. Hintergrundannahmen

Welche der Annahmen aus der Herleitung der Bellschen Ungleichung gilt nicht? Wir hatten zwei Ebenen in der Herleitung unterschieden, eine probabilistische und eine kausale, und auf jeder Ebene muss mindestens eine Annahme falsch sein. Es

scheint fast unmöglich zu sein, auf rein probabilistischer Ebene ein Argument dafür zu finden, welche Annahme plausiblerweise verletzt ist. Praktisch alle Autoren, selbst wenn es explizit anders aussieht, beziehen sich mindestens implizit auf die kausale Ebene, weil nur dort Kriterien zu finden sind, die Stoff für mögliche Gründe liefern.

Das wird auch unser Weg hier sein: In diesem Abschnitt werden wir zunächst die Lokalisationsannahme und im folgenden dann die Hintergrundannahmen auf der gehaltvolleren kausalen Ebene überprüfen. Zum einen müssen wir bei jedem Prinzip untersuchen, ob eine Verletzung des Prinzips wirklich die Verletzung der Bellschen Ungleichung erklären kann. Die Verletzung mindestens eines Prinzips ist ja nur eine notwendige Bedingung für die Verletzung der Ungleichung. Zum anderen müssen wir bei den Prinzipien, für die das der Fall ist, diskutieren, ob ihre Aufgabe plausibel ist und welche Konsequenzen dies hätte. Hierbei dürfen wir nicht erwarten, dass wir eine eindeutige und nicht mehr anzweifelbare Lösung erhalten. G. Graßhoff hat das Vorgehen in der Debatte um die Bellsche Ungleichung in einem Vortrag einmal mit einer Detektivgeschichte verglichen: Es gibt verschiedene Personen, die unter Verdacht stehen, und es gilt herauszufinden, wer der Mörder ist. In den seltensten Fällen kann der Detektiv in einem strengen Sinne beweisen, wer die Tat begangen hat, aber oft lassen wir uns auch von guten Indizien überzeugen.

Die weitaus meisten Autoren interpretieren die Verletzung der Bellschen Ungleichung als Zeichen einer Nicht-Lokalität: Es muss eine irgendwie geartete Verbindung zwischen den beiden Flügeln des Experiments geben, die mit Überlichtgeschwindigkeit wirkt. Diese These folgt aus dem Bell-Argument, wenn man voraussetzt, dass diejenigen Annahmen gelten, die wir als „Hintergrundannahmen“ bezeichnet haben. Was sind die Gründe, die Lokalisationsannahme und nicht eine der Hintergrundannahmen aufzugeben? Bei der Entwicklung dieser Position spielt es sicherlich eine große Rolle, dass zwei Hauptpositionen in der Philosophie der Quantenphysik – die GRW-Theorie und die De-Broglie-Bohm-Theorie – explizit nicht-lokal sind. So theoriefrei das Bellsche Projekt von seinen Annahmen her aufgezogen ist: Bei der Bewertung, welche der Annahmen fehlerhaft ist, scheinen die Autoren doch auf die existierenden Theorien zu schießen. Dies verhindert andererseits aber auch, dass der Lösungsvorschlag als ad hoc abgetan werden kann.

Im folgenden Abschnitt werden wir dann diskutieren, was es heißen würde, statt der Lokalisationsannahme eine der Hintergrundannahmen aufzugeben. Solche Vorschläge spielen in der Diskussion aber eher die Rolle von alternativen Lösungsvorschlägen. Ihr hartnäckiges Fortbestehen jedoch zeigt, dass der Vorschlag einer Nicht-Lokalität nicht ohne problematische Konsequenzen ist. Insbesondere die Vereinbarkeit mit der Relativitätstheorie ist, wie wir sehen werden, nach wie vor ein großes Thema. Dennoch ist die Annahme einer Nicht-Lokalität die weitgehend akzeptierte Konsequenz aus Bells Theorem. Die Tatsache, dass sich herausstellen wird, dass alle alternativen Lösungsvorschläge ebenfalls große (wenn

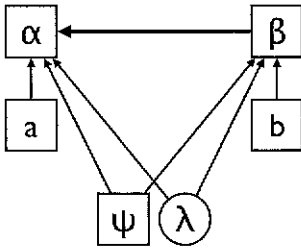
nicht größere) Probleme aufweisen, ist ein weiterer Grund, die Lösung in einer Nicht-Lokalität zu suchen.

#### 4.4.2 Konfliktfelder mit der Relativitätstheorie

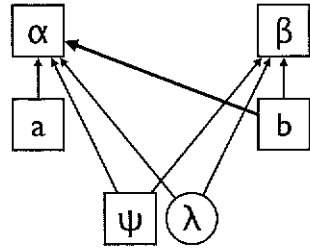
Wie genau ist es zu verstehen, dass die Lokalitätsannahme in der Quantenwelt verletzt ist? Wir haben schon erwähnt, dass Nicht-Lokalität heißt, dass es einen Einfluss zwischen Variablen gibt, die raumartig zueinander gelegen sind, so dass der Einfluss zwischen ihnen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit propagieren müsste. In EPR/B-Experimenten ordnet man die Messgeräte absichtlich so an, dass die eine Messung raumartig zu der anderen liegt, um Beeinflussungen zwischen den beiden Messungen auszuschließen. Unsere Argumentation scheint uns jetzt aber an einen Punkt gebracht zu haben, an dem wir diese Annahme aufgeben müssen. Es scheint, dass es auf eine zu bestimmende Weise einen Einfluss zwischen den beiden Flügeln geben muss. Hierbei gibt es drei Prototypen (siehe Abbildung 4.6): Entweder gibt es einen Einfluss von einem Messergebnis auf das andere (was in der Debatte mit dem Schlagwort „outcome dependence“ assoziiert wurde) oder es gibt einen direkten Einfluss zwischen einer Messeinstellung und dem entfernten Ergebnis („parameter dependence“) oder es gibt einen indirekten Einfluss von einem Messergebnis auf das andere, und zwar vermittelt über die verborgene gemeinsame Ursache  $\lambda$ .

Zu letztgenanntem Fall sollten wir anmerken, dass  $\lambda$  durch die Aufgabe der Lokalitätsannahme nicht mehr unbedingt einen Zustand an der Quelle beschreiben muss und auch nicht mehr unbedingt verborgene Variablen der Photonen bedeutet. Aus abstrakt-kausaler Sicht war  $\lambda$  von Anfang an einfach eine verborgene gemeinsame Ursache der Messergebnisse und ist ansonsten eine Art „Joker-Variable“ im Diagramm. In einer lokalen Welt muss eine gemeinsame Ursache der Messergebnisse natürlich im Schnitt der Vergangenheitslichtkegel der Messergebnisse liegen, und das plausibelste Szenario ist, dass  $\lambda$  an der Quelle positioniert ist und verborgene Variablen der Photonen beschreibt. In einer nicht-lokalen Welt hingegen müssen die Zustände, die  $\lambda$  beschreibt, nicht im Vergangenheitslichtkegel der Messergebnisse liegen; vielmehr können sie nun überall in der Raumzeit-Region zwischen den Messflügeln liegen (also auch raumartig zu den Messergebnissen) und dennoch gemeinsame Ursache der Messergebnisse sein.

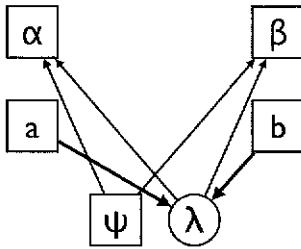
Das Hauptproblem für solche nicht-lokalen Modelle ist, dass sie in einem ernsthaften Konflikt mit der Vorstellung von Raum und Zeit zu stehen scheinen, die die Relativitätstheorie nahelegt. Wir hatten oben die Standard-Interpretation der Relativitätstheorie zugrunde gelegt, in der das Prinzip der Einstein-Lokalität gilt. Wenn es, wie diese Interpretation behauptet, richtig ist, dass die Relativitätstheorie das Prinzip der Einstein-Lokalität impliziert, dann gibt es eine echte Inkonsistenz der Relativitätstheorie mit solchen nicht-lokalen Modellen. Ein nicht-lokales



(a) Direkte Struktur



(b) Nicht-lokale gemeinsame Ursache



(c) Indirekte Struktur

Abb. 4.6: Prototypen nicht-lokaler kausaler Strukturen

Modell für EPR/B-Experimente zu vertreten, würde dann bedeuten, die Relativitätstheorie in einem gewissen Sinne aufzugeben. Diese radikale Konsequenz wollen die meisten Autoren aber vermeiden. Ihre Idee ist, eine Lösung zu finden, die einerseits eine Nicht-Lokalität beinhaltet, um die EPR/B-Korrelationen zu erklären, andererseits aber nicht die Relativitätstheorie verletzt. Solche Vorschläge müssen annehmen, dass die Relativitätstheorie das Prinzip der Einstein-Lokalität nicht strikt impliziert. In einem gewissen, beschränkten Sinne muss die Relativitätstheorie kompatibel damit sein, dass es Einflüsse mit Überlichtgeschwindigkeit gibt. Im Folgenden wollen wir nun prüfen, ob nicht-lokale Modelle mit einer relativistischen Vorstellung von Raum und Zeit in Einklang zu bringen sind. Dazu müssen wir etwas näher betrachten, inwiefern das Prinzip der Einstein-Lokalität, das durch erstere verletzt wird, durch die Relativitätstheorie begründet ist.

Zunächst einmal sollten wir sagen, dass es in klassischen, vor-relativistischen Vorstellungen von Raum und Zeit (vgl. Newtons Konzeption) kein Problem darstellt, wenn Dinge sich mit Überlichtgeschwindigkeit beeinflussen. Solange die Beeinflussungsgeschwindigkeit endlich ist, kann es immer einen kontinuierlichen Prozess von der Ursache zur Wirkung geben. Beeinflussungen zwischen entfern-

ten Ereignissen, die *simultan* geschehen, schließen hingegen solche kontinuierlichen Prozesse aus; es handelt sich dann um klassische Fernwirkungen (häufig werden auch klassische Fernwirkungen als nicht-lokal bezeichnet, aber wir wollen unseren Begriff von Nicht-Lokalität hier nicht verwässern). Ob Fernwirkungen in der klassischen Physik zulässig sind, ist lange debattiert worden.

Dieser Debatte wurde durch die Formulierung der Relativitätstheorie ein Ende gesetzt. Erstens wird in der Relativitätstheorie jede Wirkung, die mit Überlichtgeschwindigkeit propagiert, eine nicht-lokale Wirkung, und zweitens scheinen alle solche Wirkungen gemäß der Theorie verboten zu sein. Das Ergebnis ist, dass die Relativitätstheorie eine durch und durch lokale Theorie ist. Diese beiden Punkte müssen wir etwas erläutern. Wie kommt es, dass alle Einflüsse, die schneller als Licht propagieren, gemäß der Relativitätstheorie als nicht-lokal gelten? Wir hatten definiert, dass solche Einflüsse raumartig getrennte Ereignisse verbinden. Der entscheidende Punkt ist nun, dass die zeitliche Ordnung raumartig getrennter Ereignisse in der Relativitätstheorie keine objektive Tatsache mehr ist. Simultaneität wird ein bezugssystemabhängiger (oder beobachterabhängiger) Begriff, und für jedes Paar von raumartig getrennten Ereignissen A und B gibt es Bezugssysteme, in denen A früher geschieht als B, wie auch Bezugssysteme, in denen B früher geschieht als A, und genau ein Bezugssystem, in dem beide simultan sind. Deshalb gibt es für jede Wirkung, die mit Überlichtgeschwindigkeit vonstatten geht, genau ein System, in dem die Wirkung simultan ist. Das erklärt auch, warum solche Einflüsse im Rahmen der Relativitätstheorie als „nicht-lokal“ bezeichnet werden.

Zum zweiten Punkt, dass die Relativitätstheorie alle kausalen Einflüsse mit Überlichtgeschwindigkeit verbietet (kausale Einstein-Lokalität), sollten wir uns etwas näher die Gründe ansehen, warum dies der Fall ist:

1. Gemäß der Relativitätstheorie ist die Lichtgeschwindigkeit eine obere Grenzgeschwindigkeit für die Bewegung von Materie und Energie. Es ist ausgeschlossen dass Materie- oder Energietransport schneller als mit Lichtgeschwindigkeit stattfindet. Wenn also kausale Prozesse an Materie- oder Energietransport gebunden sind, kann es keine kausalen Wirkungen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit geben.
2. Es ist eine Konsequenz der relativistischen Raumzeit-Struktur, dass man mit Signalen, die mit Überlichtgeschwindigkeit gesendet werden, eine Signalschleife erzeugen könnte, und dass solche Schleifen Paradoxien ergeben. Wenn deshalb eine kausale Verbindung zur Signalübertragung genutzt werden kann, kann sie nicht zwischen raumartig getrennten Ereignissen bestehen (Arntzenius, 1994).
3. Nach der Relativitätstheorie gibt es für raumartig getrennte Ereignisse A und B sowohl Bezugssysteme, in denen A früher ist als B, wie auch Bezugssysteme mit B früher als A. Deshalb kann es, wenn eine kausale Verbindung in allen Bezugssystemen vorwärts in der Zeit sein muss, keine kausalen Verbindungen zwischen raumartig getrennten Ereignissen geben.

4. Das Relativitätsprinzip gebietet, dass alle Bezugssysteme gleichberechtigt sind. Nicht-lokale Verbindungen zeichnen aber das Bezugssystem aus, in dem sie simultan sind. Deshalb kann es keine nicht-lokalen Verbindungen geben.

Dies sind die Gründe, die gegen nicht-lokale kausale Verbindungen in einer relativistischen Raumzeit sprechen. Wenn man die Verletzung der Bellschen Ungleichung durch eine solche Nicht-Lokalität erklären will, muss man zu diesen Argumenten Stellung beziehen. Entweder muss man zeigen, dass sie nicht gelten, oder man muss zeigen, dass die Verbindung, die man als Lösung vorschlägt, die problematische Eigenschaft nicht besitzt.

Es ist klar, dass Argument 1 nicht schlagend ist: Es könnte kausale Verbindungen geben, die einfach nicht auf Materie- oder Energiefluss beruhen. Auch wenn die typischen kausalen Verbindungen, die wir kennen, nicht von dieser Art sind, scheinen viele Autoren diese Möglichkeit zuzugestehen. So spielt das Argument kaum eine Rolle in der Debatte, wahrscheinlich auch weil gemäß den theoretischen Beschreibungen, die wir in der Quantentheorie und in der De-Broglie-Bohm-Theorie haben, der Zusammenhang zwischen den Messflügeln nicht mit Materie- oder Energiefluss verbunden ist.

---

<sup>6</sup> Dazu müsste es eine Korrelation zwischen einer kontrollierbaren Variable an einem und einer detektierbaren Variable am anderen Flügel geben. Die ist aber nicht der Fall: Einerseits sind die Messergebnisse korreliert, aber keines der beiden ist kontrollierbar (jedes Ergebnis variiert zufällig von Durchgang zu Durchgang). Andererseits kann man die Messeinstellungen zwar kontrollieren, aber es gibt keine Korrelation zwischen einer Einstellung und einer Variable am anderen Flügel. Insbesondere ist eine Einstellung (unkonditional) unabhängig vom entfernten Messergebnis. (Gegeben das lokale Messergebnis gibt es zwar eine Korrelation zwischen Einstellung und entferntem Ergebnis, aber das lokale Ergebnis kann man nicht kontrollieren, und so kann man auch diese bedingte Abhängigkeit nicht nutzen, um Signale zu senden.)