

b) Verschränkte Zustände

Wie im letzten Unterkapitel ausgeführt wurde, verletzt die Quantentheorie das Prinzip der Lokalisiertheit physikalischer Systeme. Die Inkompatibilität von Eigenschaften von Quantensystemen hat zur Folge, dass die Quantentheorie ebenfalls das Prinzip der Separabilität verletzt. Betrachten wir nun nicht mehr ein einzelnes Quantensystem für sich genommen, sondern zwei oder mehr Quantensysteme zusammen, von denen jedes mindestens zwei Eigenschaften hat, die inkompatibel sind. Es ist dann vom Formalismus der Quantentheorie her zulässig, dass die *Zustände* dieser Systeme *miteinander verschränkt* sind. In einer allerersten Näherung können wir Verschränkung so charakterisieren: Nicht nur sind zustandsabhängige Eigenschaften innerhalb eines Systems in dem Sinne voneinander abhängig, der im vorigen Unterkapitel ausgeführt wurde; eine Abhängigkeit erstreckt sich vielmehr auch auf Eigenschaften desselben Typs von mehreren Systemen. Es handelt sich um Korrelationen zwischen den definiten numerischen Werten der betreffenden Eigenschaften, genauer um Überlagerungen (Superpositionen) solcher Korrelationen. Infolge dieser Weise, wie diese Eigenschaften mehrerer Systeme aufeinander bezogen sind, ist es gar nicht möglich, jedem dieser Systeme für sich genommen einen Zustand zuzuordnen, der alle Informationen über dessen zustandsabhängige Eigenschaften beinhaltet (zu einführenden Darstellungen dessen, was mit Zustandsverschränkungen gemeint ist, siehe zum Beispiel die Arbeiten in [5–6] und [5–7] sowie allgemein für empfehlenswerte Gesamtdarstellungen [5–8], [5–9], [5–10] und [5–11]).

Der einfachste Fall von Verschränkung ist dieser: Stellen wir uns zwei Systeme von Spin $1/2$ derselben Art vor – wie zum Beispiel zwei Elektronen –, die zusammen von einer Quelle emittiert werden und die sich dann in voneinander entgegengesetzte Richtungen entfernen. Infolgedessen besteht keine nennenswerte Interaktion mehr zwischen diesen beiden Systemen. Nichtsdestoweniger hat keines der beiden Systeme für sich genommen einen Spin-Zustand. Der Gesamtzustand von beiden Systemen zusammen ist eine Überlagerung aller möglichen Spin-Werte der beiden Systeme in jeder Raumrichtung. Im Falle zweier Systeme von Spin $1/2$ derselben Art (wie zwei Elektronen) in einem Gesamtzustand von Gesamtspin null haben wir es mit einer Überlagerung aus „erstes System Spin plus und zweites System Spin minus“ mit „erstes System Spin minus und zweites System Spin plus“ in allen drei orthogonalen Raumrichtungen zu tun. Diesen Zustand kann man physikalisch so aufschreiben:

$$(V.2) \quad \Psi = 1/\sqrt{2} (\Psi_1^+ \otimes \Psi_2^- - \Psi_1^- \otimes \Psi_2^+)$$

In dieser Formel steht Ψ für den Spinzustand des Gesamtsystems; Ψ_1 und Ψ_2 beziehen sich auf die beiden Teilsysteme; + bedeutet Spin plus, – bedeutet

Spin minus. Das Zeichen \otimes steht für das Tensorprodukt der möglichen Spin-Zustände der beiden Teilsysteme. Dieser Gesamtzustand ist als Singulett-Zustand bekannt. In diesem Gesamtzustand hat die Eigenschaft des Gesamtspins des Gesamtsystems den definiten numerischen Wert null; aber keines der Teilsysteme hat einen definiten numerischen Wert des Spin in irgendeiner Raumrichtung.

Nehmen wir nun an, dass wir an diesen beiden Systemen den Spin in einer gegebenen Richtung messen, sagen wir, in Richtung der z-Achse (Spin z). In einer Messung wird eine der beiden Komponenten des Singulett-Zustands (Gleichung V.2) manifest. Das abgelesene Ergebnis ist entweder „erstes System Spin plus und zweites System Spin minus“ oder „erstes System Spin minus und zweites System Spin plus“. Es besteht also eine Korrelation zwischen den Messergebnissen: Wenn an dem einen System Spin plus abgelesen wird, dann wird an dem anderen System Spin minus abgelesen. Diese Korrelation besteht unabhängig davon, in welchem raumzeitlichen Abstand die beiden Messungen erfolgen. Diese beiden Messungen können durch einen raumartigen Abstand voneinander getrennt sein (so dass keine Signale zwischen den beiden Systemen ausgetauscht werden können). Nichtsdestoweniger gilt: Wenn das Ergebnis der Messung der einen Spin-Eigenschaft an dem einen System gegeben ist, dann – und nur dann – kann man das Ergebnis der Messung der gleichen Spin-Eigenschaft an dem anderen System mit Sicherheit voraussagen. Das Messergebnis an dem anderen System ist somit davon abhängig, was für ein Ergebnis eine Messung an dem einen System hat, obwohl beide Systeme beliebig weit voneinander entfernt sein können. Wenn an beiden Systemen nicht die gleichen Spin-Eigenschaften gemessen werden, dann ist, wenn das Ergebnis der Messung an dem einen System gegeben ist, immerhin noch die Wahrscheinlichkeit für das Ergebnis der Messung an dem anderen System verändert: Die Ergebnisse Spin plus und Spin minus sind nicht mehr gleich wahrscheinlich, sondern das eine Ergebnis ist wahrscheinlicher als das andere (es sei denn, es werden Spinkomponenten gemessen, die orthogonal zueinander stehen). Die entsprechenden Experimente werden in der Regel mit Photonen durchgeführt, die sich hier wie Systeme von Spin 1/2 verhalten.

Das Beispiel mit zwei Systemen von Spin 1/2 im Singulett-Zustand geht auf den Physiker David Bohm (1917–1992) zurück ([5–12], S. 611–622). Konzeptuell ähnliche Beispiele können mit den Eigenschaften des Ortes oder des Impulses zweier Systeme aufgebaut werden [5–13]. Nur haben wir es dann statt mit zwei mit unendlich vielen miteinander korrelierten Werten zu tun, die in die Verschränkung der Zustände eingehen. Die messbaren Korrelationen zwischen zwei oder mehr Quantensystemen, die auf der Verschränkung der Zustände dieser Systeme beruhen, sind als „Einstein-Podolsky-Rosen-Korrelationen“ bekannt; denn Einstein und seine Mitarbeiter haben in einer Arbeit von 1935 diese Korrelationen zuerst herausgestellt, indem sie das Beispiel der Zustandsverschränkung zweier Quantensysteme in Bezug auf Ort und Impuls betrachten [5–13]. Diese Korrelationen sind unabhängig von der räumlichen oder der raumzeitlichen Entfernung der betreffenden Systeme. Deshalb verletzen sie das Prinzip der Separabilität.

Umkehr des Prinzips
der Separabilität

Mehr noch, Zustandsverschränkungen bedeuten eine Umkehr des Prinzips der Separabilität: Statt dass den einzelnen Systemen je für sich genom-

men zustandsabhängige Eigenschaften und damit ein wohldefinierter Zustand zukommen, von dem aus der Zustand des Ganzen festgelegt ist, befindet sich nur das Ganze der betreffenden Systeme zusammengenommen in einem wohldefinierten Zustand: Nur das Gesamtsystem ist in einem reinen Zustand. Vom Zustand des Gesamtsystems aus – und nur von diesem aus – ist festgelegt, was von den Teilsystemen gilt, nämlich dass nur Relationen zwischen den Teilsystemen bestehen, genauer gesagt Korrelationen zwischen allen möglichen definiten numerischen Werten der betreffenden Eigenschaften der Teilsysteme.

Wir müssen zwischen zwei Arten von Relationen unterscheiden: (1) Korrelationen zwischen einem Quantensystem und einem Messgerät in dem Sinne, dass das Quantensystem einen definiten numerischen Wert einer bestimmten Eigenschaft relativ dazu hat, dass das Messgerät einen solchen Wert anzeigt. In diesem Falle ist jedes der beiden Systeme gemäß der standardmäßigen Darstellung der Quantentheorie in einem Zustand, in dem es wohldefinierte zustandsabhängige Eigenschaften hat (ein reiner Zustand). In was für einem Zustand das Quantensystem ist, ist relativ zu dem Zustand des Messgerätes. (2) Relationen der Zustandsverschränkung zwischen zwei oder mehr Quantensystemen im Sinne der Überlagerung von Korrelationen zwischen den möglichen definiten numerischen Werten der zustandsabhängigen Eigenschaften dieser Systeme. In diesem Falle ist nur das Ganze dieser Systeme zusammengenommen in einem reinen Zustand. Von dem Zustand des Ganzen her sind sich überlagernde Korrelationen zwischen den betreffenden Systemen festgelegt. Gemäß der standardmäßigen Darstellung der Quantentheorie werden die Relationen von Typ (2) in einer Messung auf Relationen von Typ (1) reduziert. Man spricht von Zustandsreduktionen. Diese Auffassung ist jedoch umstritten. Man kann stattdessen die Position vertreten, dass die Relationen von Typ (1) in Wirklichkeit auch Relationen von Typ (2) sind. Ich werde darauf bei der Diskussion des Messproblems in Kapitel V.6 zurückkommen.

Zwei Arten von
Relationen

Obwohl im Falle von Zustandsverschränkungen den beteiligten Systemen nicht je für sich genommen zustandsabhängige Eigenschaften zukommen, ist es möglich, von jedem der beteiligten Systeme für sich genommen eine Beschreibung zu geben, die man als eine Art Zustandsbeschreibung ansehen kann. Man spricht dann von einem „gemischten Zustand“ statt einem reinen Zustand. Wir müssen begrifflich zwischen einer Mischung von Zuständen („Gemenge“) und einem gemischten Zustand („Gemisch“) unterscheiden. In der englischen Fachliteratur hat der Physiker Bernard d’Espagnat die Ausdrücke „proper mixture“ und „improper mixture“ eingeführt ([5–14], Kapitel 6.3; vergleiche schon [5–15]). Eine Mischung von Zuständen („proper mixture“, „Gemenge“) ist ein Ensemble von Systemen, bei denen dem Beobachter der reine Zustand unbekannt ist, in welchem jedes einzelne dieser Systeme ist. Verschränkung ist jedoch keine Mischung von Zuständen. In dem betrachteten Beispiel des Singulett-Zustands gilt nicht, dass dem Beobachter unbekannt ist, ob das erste System Spin plus und das zweite System Spin minus hat oder umgekehrt. Keines der beiden Systeme ist vielmehr in einem Zustand, in dem es entweder Spin plus oder Spin minus in irgendeiner Richtung hat.

Gemischter Zustand

Der Ausdruck „gemischter Zustand“ („improper mixture“, „Gemisch“) wird verwendet, um eine solche Situation zu beschreiben. Ein gemischter

Zustand ist keine Mischung von irgendetwas. Es handelt sich um eine Beschreibung, die im Falle der Verschränkung der Zustände von zwei oder mehr Systemen alle diejenigen Informationen enthält, die über jedes dieser Systeme unabhängig von den anderen Systemen verfügbar sind. In dem Beispiel des Singulett-Zustands enthält diese Beschreibung für jede Spinkomponente von jedem der beiden Systeme eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für ein Messergebnis. Aber diese Beschreibung ignoriert die Korrelationen zwischen den möglichen Werten der Spinkomponenten beider Systeme. Folglich sagt die Beschreibung in Form eines gemischten Zustands nicht alles, was von den Spinkomponenten von jedem der beteiligten Systeme gilt. Denn diese Beschreibung enthält nicht die Information, dass dann, wenn an dem einen System eine Spin-Eigenschaft gemessen wird und wenn dieses Messergebnis gegeben ist, in Abhängigkeit von diesem Messergebnis die Wahrscheinlichkeiten für Messungen von Spin-Eigenschaften an dem anderen System verändert sind. Der gemischte Zustand ist für die beiden Systeme identisch. Bei dem, was „gemischter Zustand“ genannt wird, handelt es sich somit um eine unvollständige Beschreibung des betreffenden Systems und nicht um eine Beschreibung, die dem betreffenden System für sich genommen zustandsabhängige Eigenschaften zuspricht.

Holismus

Vom Formalismus der Quantentheorie her ist Folgendes zu erwarten: Wann immer man ein Gesamtsystem betrachtet, das mehrere Quantensysteme als Teile hat, sind die Zustände der Teilsysteme miteinander verschränkt. Aufgrund der Zustandsverschränkungen und mithin der Nicht-Separabilität von Quantensystemen spricht man von einem *Holismus* in Bezug auf die Quantentheorie: Die Quantensysteme sind durch Beziehungen miteinander verbunden, die sich in keiner Weise auf etwas zurückführen lassen, das den einzelnen Quantensystemen unabhängig voneinander zukommt (für begriffliche Analysen dessen, was dieser Holismus besagt, siehe [5–16], [5–17], [5–18] und [5–19], Kapitel 7 bis 9). Wenn man von der klassischen Physik und vom Prinzip der Separabilität ausgeht, dann kann man in der Quantenmechanik zwar an einzelnen physikalischen Systemen festhalten. Man kann auch Experimente an einzelnen Quantensystemen durchführen. Man muss aber das, was in der klassischen Physik als Eigenschaften angesehen wird, die diesen Systemen je einzeln zukommen, als Korrelationen – genauer gesagt als Überlagerungen von Korrelationen – zwischen diesen Systemen konzipieren.

Vereinbarkeit mit Nahewirkung

Während die Quantentheorie somit die Prinzipien der Lokalisiertheit und der Separabilität verletzt, widerspricht sie nicht dem Prinzip der Nahewirkung. Die Zustandsverschränkungen – und mit ihnen die Einstein-Podolsky-Rosen-Korrelationen – sind unabhängig von der räumlichen oder der raumzeitlichen Entfernung zwischen den beteiligten Systemen. Diese Korrelationen sind keine Wechselwirkungen (Interaktionen, Kräfte). Zustandsverschränkungen sind keine kausale Beziehung, weil es sich nicht um Korrelationen zwischen Zustandsänderungen von Systemen handelt, denen je für sich ein Zustand zukommt. Eine kausale Beziehung zwischen zwei oder mehr Systemen setzt voraus, dass jedes dieser Systeme einen Zustand hat, der dessen zustandsabhängige Eigenschaften vollständig bestimmt. Andernfalls könnte keine kausale Abhängigkeit zwischen Veränderungen von zustandsabhängigen Eigenschaften dieser Systeme formuliert werden. Im

Falle von Verschränkungen gibt es hingegen keine solche Separabilität. Alle Arten von Wechselwirkungen (Interaktionen, Kräfte), die in der Quantentheorie behandelt werden, entsprechen dem Prinzip der Nahewirkung.

Gegen das bisher Gesagte kann man folgendes Bedenken erheben: Die Zustandsverschränkungen betreffen nur die zustands- oder zeitabhängigen Eigenschaften – wie zum Beispiel Ort und Impuls und den Spin in jeder Raumrichtung. Quantensystemen kommen aber auch zustandsunabhängige Eigenschaften zu, wie zum Beispiel Ladung und Masse. Diese Eigenschaften gehören ebenfalls zu den grundlegenden Eigenschaften von Quantensystemen, und nichts verhindert, diese Eigenschaften als intrinsische Eigenschaften anzusehen, die jedem System für sich genommen zukommen. Es ist jedoch Folgendes zu beachten: Eigenschaften wie Masse und Ladung sind keine Basis, auf deren Grundlage die Zustandsverschränkungen zwischen den Quantensystemen festgelegt sein könnten. Wenn nur die Masse und die Ladung von Quantensystemen gegeben ist, wissen wir nichts über Zustandsverschränkungen. Ferner sind diese Eigenschaften nicht in der Lage, Quantensysteme derselben Art voneinander zu unterscheiden. Alle Elektronen zum Beispiel haben die gleiche Ladung und die gleiche Ruhemasse.

Zustands-
unabhängige
Eigenschaften

Vor diesem Hintergrund hat die Tatsache, dass Quantensysteme nicht dem Prinzip der Separabilität genügen, eine weitere Konsequenz: *Quantensysteme sind keine Individuen*. Wenn wir in der Quantenmechanik mehrere Quantensysteme derselben Art betrachten, deren Zustände miteinander verschränkt sind, dann sind diese Systeme ununterscheidbar. Sie unterscheiden sich nicht durch ihre zustandsunabhängigen Eigenschaften wie Ladung und Masse. Es gibt ferner keinerlei zustandsabhängige Eigenschaften – auch nicht einmal bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Eigenschaften irgendwelcher Art –, durch die sich ein System von anderen solchen Systemen unterscheidet (siehe [5–20]). In der klassischen Physik sind Systeme immer durch den Ortswert voneinander unterschieden: Jedes System besitzt immer einen definiten numerischen Wert des Ortes, und keine zwei Systeme können zur gleichen Zeit am gleichen Ort sein. Wenn hingegen die Zustände zweier oder mehrerer Quantensysteme in Bezug auf Ort und Impuls miteinander verschränkt sind – wie in dem ursprünglichen Beispiel von Einstein, Podolsky und Rosen [5–13] –, dann hat keines dieser Systeme einen definiten numerischen Wert des Ortes, und die Werte- oder Wahrscheinlichkeitsverteilung des Ortes (der oben erwähnte „gemischte Zustand“) ist für beide Systeme identisch. Daraus folgt: Quantensysteme haben keine Identität in der Zeit, die auf Eigenschaften beruht. Wir können nicht ein Quantensystem kennzeichnen und es später wiedererkennen.

Keine Individuen

Die Systeme der Quantenmechanik (Elektronen, Protonen, Neutronen, Photonen usw.) sind aber einzelne Systeme: Ein Gesamtsystem enthält stets eine definite Anzahl solcher Systeme. In der Quantenmechanik bestehen die Korrelationen der Zustandsverschränkung immer zwischen einer definiten Anzahl einzelner Systeme. In den genannten Beispielen haben wir es stets mit zwei Systemen zu tun. Ferner ist jedes dieser Systeme ein Subjekt der Prädikation von Eigenschaften – und seien es Eigenschaften wie „ist verschränkt mit anderen Systemen“, „hat Spin plus relativ zu dem Fall, dass das andere System Spin minus hat“ und so fort (siehe die Diskussion zwischen [5–21], [5–22] und [5–23] einerseits und [5–24] und [5–25] andererseits).

An dieser Stelle zeigt es sich, dass es sinnvoll ist, in folgender Weise zwischen physikalischen Systemen und Individuen zu unterscheiden: Nicht alles, was ein einzelnes physikalisches System ist, ist damit auch schon ein Individuum. Um ein einzelnes physikalisches System zu sein, reicht es hin, dass dem betreffenden Seienden physikalische Eigenschaften zugesprochen werden können. Diese Eigenschaften müssen nicht intrinsisch sein. Es kann sich auch um relationale Eigenschaften (Relationen) handeln. Um ein Individuum zu sein, ist es notwendig, dass dem betreffenden Seienden Eigenschaften – beziehungsweise zu jedem Zeitpunkt Werte oder Werteverteilungen von Eigenschaften – zugesprochen werden können, durch die sich das betreffende System von allen anderen Systemen unterscheidet. Folglich verfügen allein Individuen über eine Identität in der Zeit.

Es ist allerdings philosophisch möglich, die Systeme der Quantenmechanik trotz des Ausgeführten als Individuen anzusehen, wenn man bereit ist, eine so genannte primitive Diesheit anzuerkennen (siehe dazu [5–26]): Wenn man jedem einzelnen Quantensystem die Eigenschaft zuspricht, dieses System zu sein, dann hat man per definitionem eine Eigenschaft, die nur dem betreffenden System zukommt und die für dieses System eine physikalisch nicht nachweisbare Identität stiftet (vergleiche zu dieser Möglichkeit [5–20]). Die Frage ist jedoch, ob der Rückzug auf eine solche Position philosophisch sinnvoll ist.

Herausforderung der
Quantentheorie

Wenn wir das bisher Gesagte vor dem Hintergrund der Ausführungen in Kapitel V.1 zusammenfassen, dann sehen wir, dass die Quantentheorie in mindestens dreierlei Hinsicht eine Herausforderung für die Naturphilosophie ist:

- *keine Lokalisiertheit*: Quantensysteme und deren Eigenschaften sind in der Regel nicht an Punkten oder beliebig kleinen Gebieten des Raumes oder der Raumzeit lokalisiert.
- *keine Separabilität*: Die grundlegenden, zeitabhängigen Eigenschaften von Quantensystemen – wie Ort, Impuls und Spin im Sinne der Spinkomponenten – sind keine Eigenschaften, die jedem Quantensystem für sich genommen zukommen. Diese Eigenschaften kommen Quantensystemen in erster Linie in Form von Verschränkungen ihrer Zustände zu, das heißt Überlagerungen (Superpositionen) von Korrelationen (Einstein-Podolsky-Rosen-Korrelationen).
- *keine Individualität*: Quantensysteme sind keine Individuen in dem Sinn, dass Quantensysteme derselben Art, deren Zustände miteinander verschränkt sind, ununterscheidbar sind.

Die größte Herausforderung ist das Fehlen von Separabilität. Das Fehlen von Individualität ist eine Konsequenz der Nicht-Lokalisiertheit und der Nicht-Separabilität.