

V. Die Herausforderung der Quantenphysik

Die Herausforderung der Quantenphysik besteht in Folgendem: Quantensysteme sind in der Regel nicht lokalisiert. Viele ihrer charakteristischen Eigenschaften sind keine intrinsischen Eigenschaften. Es ist vielmehr von Zustandsverschränkungen zwischen Quantensystemen auszugehen. Zustandsverschränkungen beinhalten Korrelationen zwischen Quantensystemen, die unabhängig von deren räumlichem oder raumzeitlichem Abstand sind. Aufgrund dessen sind Quantensysteme keine voneinander unterscheidbaren Individuen. In der Quantenfeldtheorie entfallen sogar einzelne Quantensysteme als Träger von Eigenschaften. Die Möglichkeit von Alternativen zur Quantentheorie und das Messproblem werden angesprochen. Abschließend wird auf das Thema der Zeitrichtung vor dem Hintergrund der Quantenphysik eingegangen.

1. Vier Prinzipien der klassischen Physik und Naturphilosophie

Die Quantentheorie ist die am meisten umstrittene, aber auch die erfolgreichste Theorie der Physik des 20. Jahrhunderts. Sie wurde in den 1920er Jahren insbesondere von Niels Bohr (1885–1962) und Werner Heisenberg (1901–1976) in Form der Quantenmechanik entwickelt. Die heutige Quantentheorie umfasst neben der Quantenmechanik auch die Quantenfeldtheorie. Die folgende Darstellung orientiert sich an der Quantenmechanik. Auf die philosophisch relevanten Besonderheiten der Quantenfeldtheorie gehe ich in Kapitel V.2.c kurz ein.

Entwicklung der
Quantentheorie

Wir können verstehen, weshalb die Quantenmechanik naturphilosophisch so bedeutsam ist, indem wir Einsteins Bedenken betrachten. Albert Einstein ist der prominenteste Kritiker der Quantentheorie. Er akzeptiert den physikalischen Erfolg und damit die Voraussagen der Quantentheorie für experimentelle Ergebnisse. Aber er lehnt die naturphilosophischen Prinzipien ab, die in der Quantentheorie zum Ausdruck kommen. Die Prinzipien seiner eigenen, an der klassischen Physik orientierten Naturphilosophie bringt er am deutlichsten in dem Aufsatz *Quanten-Mechanik und Wirklichkeit* von 1948 zum Ausdruck. Dort heißt es:

Einsteins Prinzipien

„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, d. h. es sind Ideen von Dingen gesetzt, die eine von den wahrnehmenden Subjekten unabhängige ‚reale Existenz‘ beanspruchen (Körper, Felder, etc.), welche Ideen andererseits zu Sinneseindrücken in möglichst sichere Beziehung gebracht sind. Charakteristisch für diese physikalischen Dinge ist ferner, daß sie in

ein raum-zeitliches 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‘. Ohne die Annahme einer solchen Unabhängigkeit der Existenz (des ‚So-seins‘) der räumlich distanten Dinge voneinander, die zunächst dem Alltagsdenken 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. Die Feldtheorie hat dieses Prinzip zum Extrem durchgeführt, indem sie die ihr zugrunde gelegten, voneinander unabhängig existierenden elementaren Dinge sowie die für sie postulierten Elementargesetze in den unendlich-kleinen Raumelementen (vierdimensional) lokalisiert. Für die relative Unabhängigkeit räumlich distanter Dinge (A und B) ist die Idee charakteristisch: Äußere Beeinflussung von A hat keinen *unmittelbaren* Einfluss auf B ; dies ist als ‚Prinzip der Nahewirkung‘ bekannt, das nur in der Feldtheorie konsequent angewendet ist. Völlige Aufhebung dieses Grundsatzes würde die Idee von der Existenz (quasi-)abgeschlossener Systeme und damit die Aufstellung empirisch prüfbarer Gesetze in dem uns geläufigen Sinne unmöglich machen“ ([5–1], S. 321–322).

Gehen wir dieses lange Zitat Schritt für Schritt durch, um dann verstehen zu können, was neu und philosophisch bedeutsam an der Quantentheorie ist. Aus diesem Zitat sind vier Prinzipien ersichtlich, die für die gesamte klassische Physik und die an ihr orientierte Naturphilosophie gelten. Klassisch sind alle physikalischen Theorien außer der Quantentheorie. Damit eine physikalische Theorie klassisch ist, braucht sie nicht zeitlich vor der Quantentheorie entwickelt worden zu sein. Klassisch ist eine physikalische Theorie allein deshalb, weil die vier Prinzipien, die in diesem Zitat zum Ausdruck kommen, in ihr gelten. Die Quantentheorie ist nicht klassisch, weil einige dieser Prinzipien in ihr nicht gelten. Diese Prinzipien sind unabhängig davon, ob wir eine klassische Teilchentheorie oder eine klassische Feldtheorie betrachten.

Lokalisiertheit

Abgesehen von der erkenntnistheoretischen Einleitung ist das erste Prinzip, das Einstein in dem Zitat anspricht, die „Lokalisiertheit“. Ich spreche nicht von Lokalität, da der Begriff „Lokalität“ auch im Sinne dessen gebraucht wird, was unten als das Prinzip der Nahewirkung besprochen werden wird. Mit Lokalisiertheit ist gemeint, dass die fundamentalen physikalischen Systeme an Punkten oder punktförmigen Gebieten der Raumzeit lokalisiert sind. Mit anderen Worten: Physikalische Systeme haben immer einen wohldefinierten Ort. Es ist wichtig, von „Lokalisiertheit“ und nicht bloß von „Lokalisierbarkeit“ zu sprechen; denn lokalisierbar zu sein, impliziert nicht, immer lokalisiert zu sein. Lokalisierbar ist ein System auch dann, wenn es beispielsweise durch eine Messung in einen Zustand gebracht werden kann, in dem es lokalisiert ist; daraus folgt aber nicht, dass dieses System lokalisiert ist in dem Sinne, dass es immer – also auch unabhängig von Messungen – einen wohldefinierten Ort hat. Auch die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie sind lokale Theorien im Sinne des Prinzips der Lokalisiertheit (zur Definition einer lokalen Raumzeit-Theorie siehe [4–33],

S. 517–518). Alle Eigenschaften, die in der Relativitätsphysik betrachtet werden, sind an Punkten der Raumzeit lokalisiert.

Wichtiger noch als Lokalisiertheit ist das Prinzip, das Einstein in dem Zitat so beschreibt, dass die physikalischen Systeme eine voneinander unabhängige Existenz beanspruchen, sofern sie räumlich oder raumzeitlich voneinander getrennt sind. In einem Brief an Erwin Schrödinger (1887–1961) vom 19. Juni 1935 gebraucht Einstein die Ausdrücke „Trennungsprinzip“ und „Trennungshypothese“ (zitiert in [5–2], S. 179–180). Heute spricht man vom Prinzip der Separabilität. Dieses Prinzip setzt voraus, dass es eine Vielzahl physikalischer Systeme gibt. Das müssen nicht Teilchen sein. Es kann sich auch um Punkte der Raumzeit handeln, an denen Feldgrößen auftreten. Nennen wir alles dieses einschließlich von Punkten, an denen physikalische Eigenschaften auftreten, „physikalische Systeme“. Damit etwas ein physikalisches System ist, ist es notwendig und hinreichend, dass der betreffenden Sache irgendwelche physikalischen Eigenschaften zukommen. Es wird am Ende von Kapitel V.2.b deutlich werden, dass es sinnvoll ist, nicht mehr als dieses minimale Kriterium zu fordern, damit etwas ein physikalisches System ist.

Damit, dass die physikalischen Systeme unabhängig voneinander sind, ist Folgendes gemeint: *Jedes der Systeme hat seine grundlegenden, charakteristischen Eigenschaften unabhängig von allen anderen Systemen.* Das heißt, es hat diese Eigenschaften unabhängig davon, ob es in der Tat andere physikalische Systeme gibt oder ob es solche nicht gibt. Es handelt sich also um innere Eigenschaften eines Systems. Wie schon in Kapitel II.1 erwähnt wurde, werden solche Eigenschaften in der philosophischen Fachterminologie „intrinsische Eigenschaften“ genannt (siehe [5–3]). Ferner besagt das Prinzip der Separabilität Folgendes: *Die Beziehungen (Relationen), die zwischen physikalischen Systemen bestehen, sind durch die intrinsischen Eigenschaften der betreffenden Systeme festgelegt.* Nehmen wir an, dass die Masse eine intrinsische Eigenschaft ist. Paul hat eine Masse von 80 kg, und Peter hat eine Masse von 70 kg. In diesem Fall ist die Beziehung, dass Paul schwerer ist als Peter, durch die Massen festgelegt, die Paul und Peter unabhängig voneinander haben. Es genügt, wenn man die Massen von Paul und Peter angibt; man braucht nicht hinzuzufügen, dass Paul schwerer als Peter ist. Analog kann man annehmen, dass der räumliche Abstand zwischen zwei Systemen durch den Ort von jedem der beiden Systeme festgelegt ist; der Ort ist in der klassischen Physik in dem Sinne eine intrinsische Eigenschaft, dass der Ort jedes Systems unabhängig von dem aller anderen Systeme ist.

Physikalisch können wir das, was Separabilität besagt, so zusammenfassen: *Jedes System hat für sich genommen einen Zustand, der die vollständige Information über die zeitabhängigen Eigenschaften dieses Systems enthält. Wenn wir ein Gesamtsystem betrachten, das aus mehreren Teilsystemen besteht, dann ist der Zustand des Gesamtsystems durch die Zustände der Teilsysteme festgelegt.* Zeitabhängig sind alle und nur diejenigen Eigenschaften, deren Wert sich während der Existenz des Systems ändern kann – wie zum Beispiel Ort und Geschwindigkeit, aber nicht Masse und Ladung. (Die fundamentalen physikalischen Systeme sind durch eine Masse charakterisiert – die so genannte Ruhemasse –, deren Wert sich während der Existenz des Systems nicht ändert). Die zeitabhängigen Eigenschaften können wir auch „zustandsabhängige Eigenschaften“ nennen. Der Zustand eines Sys-

Separabilität

tems zu einer Zeit ist die Weise, in der dieses System zu dieser Zeit zeitabhängige Eigenschaften hat.

Nicht nur die klassische Mechanik, deren Gegenstand Teilchen sind, sondern auch die Feldtheorie des Elektromagnetismus entspricht dem Prinzip der Separabilität. Wenn wir den Zustand mehrerer Punkte oder eines größeren Gebietes eines klassischen Feldes betrachten, dann gilt, dass dieser Zustand durch die Zustände der einzelnen Punkte oder der Teilgebiete festgelegt ist. Einstein spricht in dem Zitat oben davon, dass die klassischen Feldtheorien einschließlich der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie dieses Prinzip der Separabilität zum Extrem durchgeführt haben.

Nahewirkung

Im Anschluss an die Separabilität hat ein weiteres Prinzip in dem Zitat oben großes Gewicht: das Prinzip der Nahewirkung. Dieses Prinzip betrifft die Veränderung der Zustände physikalischer Systeme. Kausale Wirkungen (Interaktionen, Kräfte) breiten sich von einem Punkt zum benachbarten Punkt mit einer begrenzten Geschwindigkeit aus. Gemäß der speziellen Relativitätstheorie ist die Lichtgeschwindigkeit die Obergrenze für die Ausbreitung von Wirkungen. Das Prinzip der Nahewirkung ist nur dann anwendbar, wenn das Prinzip der Separabilität gilt: Das Prinzip der Nahewirkung betrifft Veränderungen in Systemen, die je für sich genommen einen Zustand im angegebenen Sinne haben. Alle bekannten Interaktionen genügen dem Prinzip der Nahewirkung. Einstein sagt in dem Zitat oben, dass dieses Prinzip nur in einer physikalischen Feldtheorie konsequent angewendet wird. Newtons Physik ist auf die Gravitation als Fernwirkung festgelegt; allerdings hält Newton selbst die Annahme, dass es eine Fernwirkung gibt, für absurd ([3–4], S. 254; siehe Kapitel III.1).

Individualität

Aus den drei Prinzipien der Lokalisiertheit, der Separabilität und der Nahewirkung ergibt sich ein weiteres Prinzip, das Einstein in dem Zitat oben allerdings nicht explizit anspricht: das Prinzip der Individualität. Alle physikalischen Systeme sind in folgendem Sinne Individuen: Für jedes System gilt, dass es Eigenschaften beziehungsweise Werte von Eigenschaften gibt, durch die sich dieses System von allen anderen Systemen unterscheidet. Aufgrund des Prinzips der Lokalisiertheit sind zwei beliebige physikalische Systeme zumindest durch den Wert des Ortes voneinander unterschieden. Es ist theoretisch möglich, jedes physikalische System, das eine Zeit lang existiert, in seiner Bewegung durch Raum und Zeit (Veränderung des Ortes) zu verfolgen, so dass man das betreffende individuelle System jederzeit wiedererkennen kann.

Zusammenhang der vier Prinzipien

Diese vier Prinzipien bauen aufeinander auf. Wenn wir davon ausgehen, dass physikalische Systeme im Raum und in der Zeit sind, dann ist deren raumzeitliche Lokalisiertheit eine notwendige Bedingung dafür, dass jedem dieser Systeme für sich genommen ein Zustand zukommt und dass der Zustand eines Gesamtsystems durch die Zustände der Teilsysteme festgelegt ist. Wie schon erwähnt wurde, setzt die Anwendbarkeit des Prinzips der Nahewirkung das Prinzip der Separabilität voraus, ohne dass allerdings das Prinzip der Separabilität das Prinzip der Nahewirkung impliziert. Mit anderen Worten: Separabilität ist eine notwendige Bedingung für die Anwendbarkeit des Prinzips der Nahewirkung. An diesem Überblick wird deutlich, dass zusammen mit der Lokalisiertheit die Separabilität das wichtigste Prinzip der klassischen Physik und der an dieser orientierten Naturphilosophie ist.

Einstein sagt in dem Zitat oben, dass das, was heute als das Prinzip der Separabilität bekannt ist, dem Alltagsdenken entstammt. Philosophisch können wir dieses Prinzip bis zu Aristoteles zurückverfolgen. Wie in Kapitel II.1 dargestellt wurde, ist es eine zentrale Aussage in Aristoteles' *Metaphysik*, dass die Welt aus einer Vielzahl von einzelnen Dingen (Substanzen) besteht, von denen jedes durch intrinsische Eigenschaften gekennzeichnet ist. Eine solche Naturphilosophie gehört keineswegs der Vergangenheit an. Eine plastische zeitgenössische Formulierung finden wir bei dem schon erwähnten amerikanischen Philosophen David Lewis:

Bedeutung des
Prinzips der Separabilität

„Wir haben eine Geometrie: ein System von externen Relationen raumzeitlichen Abstands zwischen Punkten. Vielleicht sind es Punkte der Raumzeit selbst, vielleicht punktkleine Stücke der Materie oder des Äthers oder von Feldern, vielleicht beides. Und an diesen Punkten haben wir lokale Qualitäten: völlig natürliche intrinsische Eigenschaften, die nicht mehr als einen Punkt benötigen, um auftreten zu können. Kurz gesagt: Wir haben ein Arrangement von Qualitäten. Und das ist alles“ ([54], S. IX–X, eigene Übersetzung).

Der fundamentale physikalische Bereich ist demnach durch Systeme mit intrinsischen Eigenschaften gekennzeichnet. Abgesehen von raumzeitlichen Relationen sind alle Beziehungen zwischen den physikalischen Systemen durch deren intrinsische Eigenschaften festgelegt. Es zeigt sich an dieser Stelle wiederum, dass es für diese Naturphilosophie nicht entscheidend ist, ob die physikalischen Systeme Teilchen oder punktförmige Teile von Feldern sind oder ob die physikalischen Systeme mit Punkten der Raumzeit identifiziert werden. Entscheidend ist der durch die Prinzipien der Lokalisierung und der Separabilität bestimmte Aufbau der Materie.