

Das Verhältnis der Quantenmechanik zur Philosophie Kants

Die moderne Physik hat philosophische Fragen aufgeworfen, die im Rahmen der bekannten philosophischen Systeme der Vergangenheit und der Gegenwart schwerlich eine vollständige Antwort finden werden. Die vorliegende Arbeit möchte der Vorbereitung einer sachgemäßen Antwort dienen, indem sie einige bereits bekannte philosophische Thesen prüft, die sich auf die Fragen der Physik beziehen. Sie stellt sich also keine historische, sondern eine vorbereitend-systematische Aufgabe. Die Beschränkung der besprochenen Physik auf die Quantenmechanik erfolgt nur, um den Kreis der Fragen nicht von vornherein zu weit zu ziehen; da die Quantenmechanik zugleich die empirisch am besten belegte und die radikalste der modernen Theorien ist, kann man aus ihr wohl gegenwärtig am meisten für die philosophischen Fragen lernen. Die Beschränkung der besprochenen philosophischen Lehren auf das System Kants ist nicht ausschließlich. Aber das Ungenügen der heute mit ihm konkurrierenden naiv-realistischen und positivistischen Ansichten drängt die Fragestellung von selbst in die Richtung, die Kant eingeschlagen hat. Die Antworten, die Kant auf seine Grundfragen gegeben hat, erweisen sich angesichts der modernen Physik weder als richtig noch als falsch, sondern als zweideutig. Indem wir versuchen, an Hand der heutigen Erkenntnisse eine richtige und eine unrichtige Deutung der Kantschen Thesen auseinanderzuhalten, gewinnen wir ein Prinzip der Kritik der Kantschen Philosophie und zugleich einen Ausgangspunkt für die weitere philosophische Bearbeitung der modernen Physik.

I. Der Inhalt der Quantenmechanik

Es ist zunächst notwendig, die Behauptungen der Quantenmechanik kurz zusammenzufassen. Dabei interessieren uns zunächst die Fragen, ob die Quantenmechanik, wie man oft gesagt hat, auf die Anschaulichkeit der Naturbeschreibung und auf das Kausalprinzip verzichtet habe. Wir werden

sehen, daß beide Thesen ungenau sind, und daß der entscheidende Punkt der Quantenmechanik im Verzicht auf die „Objektivierbarkeit“ des Naturgeschehens liegt. Wir prüfen schließlich, wieweit den Behauptungen der Quantenmechanik vom physikalischen Standpunkt aus Endgültigkeit zugesprochen werden kann.

— 1. *Anschaulichkeit.* Der Begriff der Anschaulichkeit ist vieldeutig. In der modernen Physik bekommt er einen eingeschränkten, aber genauen Sinn durch die Gleichsetzung von „anschaulich“ und „klassisch“. In welchem Sinn und mit welchem Recht werden beide Begriffe gleichgesetzt?

Als „klassische Physik“ bezeichnet man heute die Newtonsche Mechanik, die Maxwell'sche Elektrodynamik und alle die Disziplinen, die sich durch irgendeine modellmäßige Deutung ihrer Grundphänomene auf Mechanik und Elektrodynamik zurückführen lassen; so die Akustik (auf Grund der Deutung des Schalls als Wellenbewegung), die Wärmelehre (auf Grund der kinetischen Theorie der Wärme), die Optik (auf Grund der elektromagnetischen Lichttheorie). In welchem Sinne ist diese Physik nun „anschaulich“? Auf diese Frage pflegt man die Antwort zu erhalten: sie beschreibt alle physikalischen Phänomene als Zustände von Gebilden, die sich im dreidimensionalen euklidischen Raum befinden, und als Änderungen dieser Zustände in einer eindimensionalen, objektiven Zeit. Doch ist dies offenbar ein sehr abstrakter Begriff von Anschaulichkeit. Man denke einmal an das, was Goethe unter Naturwissenschaft verstand: das Anschauen der reinen Phänomene. Die klassische Physik bleibt gerade nicht beim Anschauen der Urphänomene Licht, Schall, Wärme stehen, sondern führt sie auf unanschauliche, nur indirekt beweisbare Bewegungsvorgänge zurück. Das Weltbild der klassischen Physik, für das diese Bewegungsvorgänge schließlich die einzigen Realitäten waren, leugnete somit geradezu die physische Realität des Angeschauten und überließ es den unfertigen Wissenschaften der Sinnesphysiologie und Psychophysik, nachträglich zu erklären, wie jene Phänomene der Anschauung „zustande kommen“. Die klassische Physik zahlt diesen Preis, um dafür die Einheitlichkeit des Weltbildes zu erkaufen. So projiziert gleichsam die anschaulich gegebene Welt auf eine Ebene reiner Begriffe.

Aber immerhin ist es eben die anschaulich gegebene Welt, die durch diese Projektion abgebildet wird. Zwar sind dem Anschauungsvermögen des normalen Menschen keineswegs alle Sätze der euklidischen Geometrie unmittelbar einleuchtend oder gar selbstverständlich; aber wenn man

unsere Anschauung von dem Raum, in dem wir die äußeren Gegenstände vorfinden, überhaupt in die Sprache einer axiomatisierten Geometrie übersetzen wollte, sah man sich eindeutig auf die euklidische Geometrie geführt. Zwar enthält das unmittelbare Erlebnis des Lichtes nichts von Wellenvorgängen; aber wenn man die Erscheinungen der Lichtausbreitung — bis in ihre durch die Worte Interferenz und Beugung angedeuteten Feinheiten hinein — überhaupt durch zusammenhängende Begriffe darstellen wollte, mußte man von einem räumlich und zeitlich periodisch modulierten Feld der Lichterregung reden. So bilden die Sätze der klassischen Physik die Struktur der durch die Anschauung gegebenen Welt ab; die Begriffe der klassischen Physik bilden die Präzisionsprache, in welcher der Physiker angibt, wie ein Apparat gebaut werden soll, und mitteilt, was er gesehen hat.

Die klassische Physik hat dadurch eine eigentümliche Mittelstellung zwischen der Welt der Empfindungen und der Welt der Dinge. Für eine Theorie der Empfindung und Wahrnehmung gibt sie die objektiven Dinge an, welche die Empfindung auslösen und in der Wahrnehmung erscheinen. Z. B. gestattet sie beim Vergleich von Reiz und Reaktion, den Reiz objektiv zu definieren. Umgekehrt liefert sie bei der Erforschung der Objekte der Außenwelt, die sich heute mehr und mehr jenseits des unmittelbar Wahrnehmbaren abspielt, die Sprache, in der jede Botschaft, die uns von jenen nicht direkt wahrgenommenen Objekten kommt, ausgedrückt werden muß. Da alles Angesehene mit der klassischen Physik beschrieben wird, ist die klassische Physik nun in der physikalischen Forschung der Repräsentant der Anschauung.

An dieser Stelle lernen wir zu unterscheiden zwischen zwei Bedeutungen der klassischen Physik: als Weltbild und als methodisches Hilfsmittel. In der Physik sind untrennbar miteinander verwoben Aussagen auf Grund unmittelbarer Wahrnehmung und Extrapolationen auf nicht Wahrgenommenes, ja in vielen Fällen auf praktisch nicht Wahrnehmbares. Das Weltbild der klassischen Physik nimmt an, auch alles Nichtwahrgenommene müsse — wenigstens in den Grundzügen — dieselben Eigenschaften haben wie das Wahrgenommene. Dies ist eine Hypothese, und zwar, wie die heutige Physik lehrt, eine in weitem Umfang falsche Hypothese. Die klassische Physik als methodisches Hilfsmittel bleibt von dieser Kritik unbetroffen. Denn immer verlangt die empirische Nachprüfung der physikalischen Sätze, daß wenigstens indirekt eine Verbindung zwischen dem Ob-

jekt und der Wahrnehmung hergestellt wird (z. B. durch Vergrößerungs- und Verstärkungseinrichtungen, deren bekanntestes Beispiel das Mikroskop ist). Der wahrgenommene Vorgang in der Natur oder im Meßapparat wird aber jedenfalls mit den Begriffen der klassischen Physik beschrieben. Aus dieser Tatsache ergibt sich sogar eine Vorbedingung für die Richtigkeit jeder neuen Theorie: sie muß in dem Grenzfall, in dem sie auf Gegenstände unserer täglichen Erfahrung angewandt wird, in die klassische Physik übergehen. —

Wodurch unterscheidet sich nun die Quantenmechanik von der klassischen Physik? Sie hat entdeckt, daß dasselbe physikalische Objekt zwei verschiedene, einander scheinbar ausschließende Erscheinungsformen besitzt: Teilchen und Feld (oder Welle). Diese beiden Formen, unter denen alle atomaren Objekte im Experiment erscheinen, sind nicht aus einer größeren Anzahl gleichwertiger Möglichkeiten herausgegriffen; sie bilden vielmehr eine vollständige Disjunktion. Ein Teilchen ist ein physikalisches Gebilde, das sich, wenn es sich an einem Ort befindet, nicht gleichzeitig an einem davon entfernten Ort befinden kann; ein Feld ist ein durch den Raum verbreitetes Gebilde. Die Teilchen-Natur eines Gebildes folgt aus allen Experimenten, die eine Lokalisation seiner Wirkungen beweisen (z. B. Nebelkammeraufnahmen); die Feld-Natur eines Gebildes folgt aus allen Experimenten, die ein Zusammenwirken mehrerer voneinander entfernter Orte beweisen (Interferenz). Welchen Sinn kann nun die Behauptung haben, ein Elektron sei sowohl Teilchen als auch Feld? Die Erfahrung zeigt zwar sowohl Lokalisations- als auch Interferenzeffekte der Elektronen. Wie wird aber der hierin scheinbar liegende Widerspruch vermieden? Der Widerspruch besteht nicht zwischen den tatsächlich beobachteten Eigenschaften des Elektrons; er tritt nur auf, wenn man annimmt, diese Eigenschaften kämen dem Elektron auch dann zu, wenn man darauf verzichtet, sie zu beobachten. Dies sei an einem Beispiel erläutert.

Habe ich ein Elektron soeben an einem bestimmten Ort vorgefunden, so sagt das Teilchenbild: an diesem Ort ist ein Teilchen; das Wellenbild: hier ist ein auf engstem Raum zusammengedrücktes „Wellenpaket“. Beide Darstellungen sind richtig und widersprechen einander nicht. Aber nach einiger Zeit müßte das Teilchen in irgendeiner Richtung davongelaufen sein, das Wellenpaket hingegen sich nach allen Richtungen ausgebreitet haben. Der hierin liegende scheinbare Widerspruch wird vermieden durch die Bemerkung,

kung, daß ich den Impuls (also Bewegungsrichtung und -größe) des Elektrons gar nicht kenne; denn die Ortsmessung setzt die Wechselwirkung des Elektrons mit einem ortsfesten Meßapparat voraus, der dem Teilchen bei seiner Bewegung beliebige Ablenkungen geben kann. Ich kann also auch nach dem Teilchenbild nur prophezeien, daß ich das Teilchen bei einer wiederholten Ortsmessung irgendwo in der Nähe des ersten Ortes finden werde; und es ist die statistische Grundannahme der Quantenmechanik, daß die Wahrscheinlichkeit, das Elektron an einem bestimmten Ort vorzufinden, durch die Intensität der ihm entsprechenden Welle an demselben Ort gegeben ist. Der Widerspruch, der darin liegt, daß das Teilchen nur eine Bahn durchlaufen und daher nicht, wie das Wellenbild fordert, jeden Punkt der Umgebung erreichen kann, wird also dadurch vermieden, daß der Impuls, aus dem ich die Bahn des Teilchens vorausberechnen könnte, nicht bekannt ist und ich daher nicht weiß, welche Bahn das Teilchen zurücklegen wird; oder umgekehrt, Wellenbild und Teilchenbild lassen sich nur dann vereinbaren, wenn angenommen wird, daß der Impuls eines Teilchens von bekanntem Ort gar nicht bekannt sein kann. Wollte man, wie es in der klassischen Physik ohne weiteres möglich wäre, den Impuls durch eine zweite Messung bestimmen, so würde dadurch — wie man wieder aus der gleichzeitigen Gültigkeit des Wellenbildes ableiten kann — infolge der Wechselwirkung des Elektrons mit dem neuen Meßapparat sein Ort eben um so viel unbestimmt, daß die dem Wellenbild widersprechende Vorausberechnung der Bahn nun wegen Ortskenntnis unmöglich wäre.

Was folgt aus diesen Gesetzmäßigkeiten für die Frage nach der Anschaulichkeit der Quantenmechanik? Die ganze obige Betrachtung hält sich im Rahmen der Anschauung. Wir haben nicht angenommen, daß Teilchen- und Wellenbild dort, wo die Erfahrung sie verlangt, doch nur genäherte Darstellungen seien. Vielmehr gilt in der Quantenmechanik der Satz von der Persistenz der klassischen Gesetze; er besagt: wenn irgendeine klassisch definierte Größe durch Messung bekannt ist, so sind alle Folgerungen, die nach der klassischen Physik aus dieser Kenntnis gezogen werden können, exakt richtig. Das heißt man kann jedes Bild da, wo es aus der Erfahrung gefordert ist, in aller Strenge anwenden; nur darf man nicht annehmen, die Bestimmungsstücke, welche durch das gerade vorliegende Experiment nicht angegeben werden, hätten gleichwohl bestimmte Werte. Wir haben also nicht auf die Anschaulichkeit der Naturbeschreibung verzichtet, sondern nur darauf, den anschaulichen Bestimmungsstücken der Natur einen

vom jeweiligen Beobachtungszusammenhang unabhängigen „objektiven“ Sinn zuzuschreiben.

Dies wird besonders deutlich durch den allgemeinen Formalismus der Quantenmechanik. Er beschreibt unser Wissen über ein Objekt durch die Angabe einer abstrakten „ ψ -Funktion“. Die Verbindung dieser Funktion mit der Erfahrung besteht darin, daß aus ihr die Wahrscheinlichkeit für jeden möglichen Ausfall jedes möglichen Experiments vorausgesagt werden kann. Dabei sind alle „möglichen Experimente“ nur Messungen klassisch definierter Größen. Soweit man also „klassisch“ und „anschaulich“ gleichsetzen darf, ist die Quantenmechanik eine völlig anschauliche, aber nicht objektivierbare Naturbeschreibung.

2. *Kausalität.* Die Quantenmechanik macht gewisse Voraussagen nur mit Wahrscheinlichkeit, z. B. die Voraussage des Impulses, den man an einem Elektron von bekanntem Ort messen wird. Bedeutet das einen Verzicht auf das Kausalprinzip?

Wenn wir die klassische Physik als kausal bezeichnen, so schränken wir damit den Begriff der Kausalität ebenso ein wie oben den der Anschaulichkeit. Kausalität heißt in der klassischen Physik nichts weiter als Existenz eines eindeutigen funktionalen Zusammenhangs zwischen den Zuständen zu verschiedenen Zeiten: „Ist der Zustand eines abgeschlossenen Systems in einem Zeitpunkt vollständig bekannt, so kann man den Zustand des Systems in jedem früheren oder späteren Zeitpunkt grundsätzlich berechnen.“ Dieser Konditionalsatz wird nun in der Quantenmechanik nicht falsch, sondern unanwendbar, weil die Voraussetzung niemals realisiert ist: Der Zustand eines Systems kann nicht im klassischen Sinne vollständig bestimmt werden, da die Gewinnung einer Kenntnis (z. B. des Ortes eines Teilchens) die der dazu „komplementären“ Kenntnis (z. B. des Impulses) ausschließt. Der Konditionalsatz selbst gehörte aber eigentlich nur dem klassischen „Weltbild“ und nicht der Praxis an, in der ja niemals ein Zustand vollständig bekannt war. Man konnte vielmehr praktisch nur so viel berechnen, als aus den jeweils bekannten Bestimmungsstücken des Systems folgte, d. h. man konnte nur diejenigen Folgerungen ziehen, auf welche die jeweils unbekanntesten Bestimmungsstücke keinen Einfluß haben konnten. Dies bleibt nun auch in der Quantenmechanik richtig. In der Quantenmechanik gilt der Konditionalsatz, den wir oben als den Satz von der Persistenz der klassischen Gesetze bezeichnet haben und der, auf das vorliegende Problem angewandt, aussagt: „Sind einige Bestimmungsstücke des Zustandes eines