

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

Systems bekannt, so können alle diejenigen Bestimmungstücke früherer oder späterer Zustände berechnet werden, die mit den bekannten nach der klassischen Physik in einem eindeutigen Zusammenhang stehen.“ Dies ist aber genau das Kausalprinzip der klassischen Physik. Der Unterschied zwischen der Quantenmechanik und der klassischen Physik liegt also überhaupt nicht in dem Konditionalsatz des Kausalprinzips, sondern nur in den Grenzen, bis zu denen die objektive Bestimmung eines Zustandes vorge- trieben werden kann.

Die Fortdauer des klassischen Kausalprinzips ist kein Zufall. Ein Apparat ist ja nur soweit zum Experimentieren geeignet, als in ihm das Kausalprinzip gilt. Nur wenn z. B. im Mikroskop eine Kette eindeutiger Zusammenhänge vom Objekt zum Bild führt, kann man aus Lage und Gestalt des Bildes auf Lage und Gestalt des Objektes schließen. Somit ist das experimentelle Kenntnisnehmen von der Natur an die Anwendbarkeit des Kausalprinzips auf die Meßinstrumente geknüpft. Man kann in der Tat an Beispielen zeigen, daß ein Apparat dort aufhört, zum Messen geeignet zu sein, wo die quantenmechanische Unbestimmtheit in ihm den Rückschluß vom beobachteten auf den zu untersuchenden Vorgang zu einem statistischen macht.

3. *Objektivierbarkeit.* Jede Beobachtung setzt eine Kausalkette voraus und liefert ein anschauliches Ergebnis. Wir können nur eines nicht mehr: die einzelnen Anschauungsfragmente und Kausalketten zum Modell einer an sich seienden Natur zusammenfügen. Vielmehr hängt es von unserer frei gewählten experimentellen Anordnung ab, welche der zueinander „komplementären“ Seiten der Natur wir zu Gesicht bekommen, und die Kenntnis eines Sachverhaltes schließt die Kenntnis des dazu komplementären Sachverhaltes aus.

Wir werden nun vor die Kardinalfrage der Quantenmechanik gestellt: Handelt es sich dabei um Schwierigkeiten unserer Kenntnisnahme oder des Begriffs der objektiven Natur selbst? Darf man voraussetzen, daß die uns jeweils unbekannt bleibenden Bestimmungstücke an sich existieren und nur „verborgen“ sind, oder darf man das nicht voraussetzen? Die heutige Fassung der Quantenmechanik entscheidet sich für die zweite Antwort. Sie leugnet die Existenz verborgener Parameter; zwar nicht dann, wenn die Unkenntnis lediglich auf dem Verzicht auf eine an sich quantenmechanisch mögliche Kenntnisnahme beruht, aber dann, wenn die unbe-

kannte Größe wegen der zu genauen Kenntnis einer zu ihr komplementären Größe nicht bekannt sein kann. Dies ist keine leere Behauptung, sondern ein Satz mit bestimmten logischen Konsequenzen: Es habe z. B. ein unbekanntes Bestimmungstück X nur zwei mögliche Werte x und y, d. h. bei einer Messung von X sollen nur diese beiden Meßresultate möglich sein. Es soll ferner eine Behauptung A geben, die falsch ist, sowohl wenn die Messung von X den Wert x, wie wenn sie den Wert y ergeben hat. Dann dürfte aus der Annahme, die unbekanntes Werte existieren an sich, gefolgert werden: „X hat sicher entweder den Wert x oder den Wert y; in beiden Fällen ist A falsch; also ist A sicher falsch.“ Diese Folgerung ist aber nach der Quantenmechanik falsch, denn A kann z. B. die Aussage sein: die zu X komplementäre Größe Z hat den bestimmten Wert z (d. h. bei einer Messung von Z wird man mit Gewißheit den Wert z finden). Diese Aussage ist nach der Quantenmechanik falsch, wenn X überhaupt einen bestimmten Wert hat, sie ist aber richtig, wenn man unter Verzicht auf die Messung von X die Größe Z gemessen und den Wert z gefunden hat.

Unser Beispiel hat uns auf eine fundamentale logische Eigenschaft der Quantenmechanik geführt. In ihre Aussagen geht die Kenntnis, die wir von der Natur haben, explicite ein. So ist in unserem Beispiel, wenn X bekannt ist, der Satz „Z hat sicher den Wert z“, oder, anders ausgedrückt, „ich weiß, daß Z den Wert z hat“, falsch, dagegen der bloße Satz „Z hat den Wert z“ weder falsch noch richtig, sondern ungewiß, denn bei einer Messung von Z könnte ja der Wert z herauskommen. Es ist der entscheidende Unterschied der Quantenmechanik von der klassischen Physik, daß sie ihre Sätze gar nicht aussprechen kann, ohne die Art der Kenntnis mit auszudrücken.

Diese Feststellung ist von der Praxis der Physik aus ebenso natürlich, wie sie vom Weltbild nicht nur der klassischen Physik, sondern auch der Philosophie aus revolutionär ist. Eine vollständige experimentelle Aussage, so wie sie im Versuchsprotokoll steht, lautet schematisiert: „Ich habe an diesem Versuchsobjekt unter diesen Versuchsbedingungen diesen Zustand beobachtet.“ Die Hypothese der klassischen Physik lautet, daß dieser Satz stets ersetzt werden dürfe durch den Satz: „An diesem Versuchsobjekt besteht dieser Zustand“, und daß Sätze der letztgenannten Art notwendigerweise entweder richtig oder falsch sein müßten, einerlei, ob es einen Menschen gibt, der weiß, ob sie richtig oder falsch sind. Diese Hypothese hat sich in der älteren Physik stets bewährt. Sie entspricht darüber hinaus einem Grundmotiv fast aller Wissenschaft und Philosophie: dem Glauben