

A.Einstein - M.Born Briefwechsel 1916 - 1955, S.272 -279

Beilage zum Brief vom 5.4.1948

Quanten-Mechanik und Wirklichkeit

Im Folgenden will ich kurz und elementar darlegen, warum ich die Methode der Quanten-Mechanik nicht für im Prinzip befriedigend halte. Ich will aber gleich bemerken, daß ich keineswegs leugnen will, daß diese Theorie einen bedeutenden, in gewissem Sinne sogar endgültigen Fortschritt der physikalischen Erkenntnis darstellt. Ich stelle mir vor, daß diese Theorie in einer späteren etwa so enthalten sein wird, wie die Strahlen-Optik in der Undulations-Optik: Die Beziehungen werden bleiben, die Grundlage aber wird vertieft bzw. durch eine umfassendere ersetzt werden.

Ich denke mir ein freies Teilchen zu einer Zeit durch eine räumliche beschränkte ψ -Funktion (im Sinne der Quanten-Mechanik vollständig) beschrieben. Gemäß einer solchen Darstellung hat das Teilchen weder einen scharf bestimmten Impuls noch einen scharf bestimmten Ort.

In welchem Sinne nun soll ich mir vorstellen, daß diese Beschreibung einen wirklichen individuellen Tatbestand darstellt? Zwei Auffassungen scheinen mir möglich und nahe liegend, die wir gegeneinander abwägen wollen:

a) Das (freie) Teilchen hat in Wirklichkeit einen bestimmten Ort und einen bestimmten Impuls, wenn auch nicht beide zugleich in demselben individuellen Falle durch Messung festgestellt werden können. Die ψ -Funktion gibt nach dieser Auffassung eine unvollständige Beschreibung eines realen Sachverhaltes.

Diese Auffassung ist nicht die von den Physikern acceptierte. Ihre Annahme würde dazu führen, neben der unvollständigen eine vollständige Beschreibung des Sachverhalts für die Physik anzustreben und für eine solche Beschreibung Gesetze zu suchen. Damit würde der theoretische Rahmen der Quanten-Mechanik gesprengt.

b) Das Teilchen hat in Wirklichkeit weder einen bestimmten Impuls noch einen bestimmten Ort; die Beschreibung durch die ψ -Funktion ist eine prinzipiell vollständige Beschreibung. Der scharfe Ort des Teilchens, den ich durch eine Orts-Messung erhalte, ist nicht als Ort des Teilchens vor der Messung interpretierbar. Die scharfe Lokalisierung, die bei der Messung zutage tritt, wird nur durch den unvermeidlichen (nicht unwesentlichen) Messungs-Eingriff

hervorgebracht. Das Messungs-Ergebnis hängt nicht nur ab von der realen Teilchen-Situation sondern auch von der prinzipiell unvollständig bekannten Natur des Meß-Mechanismus. Analog verhält es sich, wenn der Impuls oder sonst eine das Teilchen betreffende Observable gemessen wird. Dies ist wohl die gegenwärtig von den Physikern bevorzugte Interpretation; und man muß zugeben, daß sie allein dem im Heisenbergschen Prinzip ausgesprochenen empirischen Sachverhalt im Rahmen der Quanten-Mechanik in natürlicher Weise gerecht wird.

Nach dieser Auffassung beschreiben zwei (nicht nur trivial) verschiedene ψ -Funktionen stets zwei verschiedene reale Situationen (z. B. das orts-scharfe bzw. das impuls-scharfe Teilchen).

Das Gesagte gilt mutatis mutandis ebenso für die Beschreibung von Systemen, die aus mehreren Massenpunkten bestehen. Auch hier nehmen wir (im Sinne der Interpretation Ib) an, daß die ψ -Funktion einen realen Sachverhalt vollständig beschreibe, und daß zwei (wesentlich) verschiedene ψ -Funktionen zwei verschiedene reale Tatbestände beschreiben, auch wenn sie bei Vornahme einer vollständigen Messung zu übereinstimmenden Meß-Resultaten führen können; die Übereinstimmung der Meßresultate wird dann zum Teil dem partiell unbekanntem Einfluß der Meßanordnung zugeschrieben.

II.

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 raumzeitliches 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 Alltags-Denken entstammt, wäre physikalisches Denken in dem uns geläufigen Sinne nicht möglich. Man sieht ohne solche saubere Sonderung 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 Raum-Elementen (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.

III.

Ich behaupte nun, daß die Quanten-Mechanik in ihrer Interpretation (gemäß Ib) nicht vereinbar ist mit dem Grundsatz II.

Wir betrachten ein physikalisches System S_{12} , das aus zwei Teilsystemen S_1 und S_2 zusammengesetzt ist. Diese beiden Teilsysteme mögen in einer früheren Zeit in physikalischer Wechselwirkung gewesen sein. Wir betrachten sie aber zu einer Zeit t , in welcher diese Wechselwirkung vorüber ist. Das Gesamtsystem sei im Sinne der Quanten-Mechanik vollständig beschrieben durch eine ψ -Funktion ψ_{12} der Koordinaten $q_1 \dots$ bzw. $q_2 \dots$ der beiden Teilsysteme (ψ_{12} wird sich nicht darstellen lassen als ein Produkt von der Form $\psi_1 \psi_2$ sondern nur als eine Summe solcher Produkte).

Zur Zeit t seien die beiden Teilsysteme räumlich voneinander getrennt, derart daß ψ_{12} nur dann von O verschieden ist, wenn die $q_1 \dots$ einem begrenzten Raumgebiet R_1 und die $q_2 \dots$ einem von R_1 getrennten Raumgebiet R_2 angehören.

Die ψ -Funktionen der einzelnen Teilsysteme S_1 und S_2 sind dann zunächst unbekannt, bzw. sie existieren überhaupt nicht. Die Methoden der Quanten-Mechanik erlauben aber, ψ_2 von S_2 zu bestimmen aus ψ_{12} wenn zudem eine im Sinne der Quanten-Mechanik vollständige Messung

am Teilsystem S_1 vorliegt. Man erhält so anstelle des ursprünglichen ψ_{12} von S_{12} die ψ -Funktion des ψ_2 Teilsystems S_2 .

Bei dieser Bestimmung ist es aber wesentlich, was für eine Art von im quantentheoretischen Sinne vollständiger Messung am Teilsystem S_1 vorgenommen wird, d. h. was für Observable wir messen. Wenn z. B. S_1 ein einziges Teilchen ist, dann steht es uns frei, ob wir z. B. seinen Ort oder seine Impuls-Komponenten messen. Je nach dieser Wahl erhalten wir für ψ_2 eine andersartige Darstellung, und zwar derart, daß je nach der Wahl der Messung an S_1 verschiedenartige (statistische) Voraussagen über an S_2 nachträglich vorzunehmende Messungen resultieren. Vom Standpunkte der Interpretation Ib bedeutet dies, daß je nach der Wahl der vollständigen Messung an S_1 eine verschiedene reale Situation hinsichtlich S_2 erzeugt wird, die durch verschiedenartige $\psi_2, \underline{\psi}_2, \underline{\psi}_2$ etc. beschrieben werden.

Vom Standpunkt der Quanten-Mechanik allein bedeutet dies keine Schwierigkeit. Je nach der besonderen Wahl der Messung an S_1 wird eben eine verschiedene reale Situation geschaffen, und es kann nicht die Notwendigkeit auftreten, daß dem selben System S_2 gleichzeitig zwei oder mehr verschiedene ψ -Funktionen $\psi_2, \underline{\psi}_2$ etc. zugeordnet werden. Anders verhält es sich jedoch, wenn man gleichzeitig mit den Prinzipien der Quanten-Mechanik auch an dem Prinzip II von der selbständigen Existenz des in zwei getrennten Raumteilen R_1 und R_2 vorhandenen realen Sachverhaltes festzuhalten sucht. In unserem Beispiel bedeutet nämlich die vollständige Messung an S_1 einen physikalischen Eingriff, der nur den Raumteil R_1 betrifft. Ein solcher Eingriff kann aber das physikalisch-Reale in einem davon

entfernten Raumteil R_2 nicht unmittelbar beeinflussen. Daraus würde folgen, daß jede Aussage bezüglich S_2 , zu der wir auf Grund einer vollständigen Messung an S_1 gelangen können, auch dann für das System S_2 gelten muß, wenn überhaupt gar keine Messung an S_1 erfolgt. Das würde heißen, daß für S_2 gleichzeitig alle Aussagen gelten müssen, welche aus der Setzung von ψ_2 oder $\underline{\psi}_2$ etc. abgeleitet werden können. Dies ist natürlich unmöglich, wenn $\psi_2, \underline{\psi}_2$ etc. von einander verschiedene reale Sachverhalte von S_2 bedeuten sollen, d. h. man gerät in Konflikt mit der Interpretation Ib der ψ -Funktion.

Es scheint mir keinem Zweifel zu unterliegen, daß die Physiker, welche die Beschreibungsweise der Quanten-Mechanik für prinzipiell definitiv halten, auf diese Überlegung wie folgt reagieren werden: Sie werden die Forderung II von der unabhängigen Existenz des in verschiedenen Raum-Teilen vorhandenen physikalisch-Realen fallen lassen; sie können sich mit Recht darauf berufen, daß die Quanten-Theorie von dieser Forderung nirgends explicit Gebrauch mache.

Ich gebe dies zu, bemerke aber: Wenn ich die mir bekannten physikalischen Phänomene betrachte, auch speziell diejenigen, welche durch die Quanten-Mechanik so erfolgreich erfaßt werden, so finde ich doch nirgends eine Tatsache, die es mir als wahrscheinlich erscheinen läßt, daß man die Forderung II aufzugeben habe. Deshalb bin ich geneigt zu glauben, daß im Sinne von Ia die Beschreibung der Quanten-Mechanik als eine unvollständige und indirekte Beschreibung der Realität anzusehen sei, die später wieder durch eine vollständige und direkte ersetzt werden wird.

Jedenfalls sollte man sich nach meiner Ansicht davor hüten, sich beim Suchen nach einer einheitlichen Basis für die gesamte Physik auf das Schema der gegenwärtigen Theorie dogmatisch festzulegen. A. Einstein.