

## 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.

### I.

Ich denke mir ein freies Teilchen zu einer Zeit durch eine räumlich beschränkte  $\psi$ -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 naheliegend, 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  $\psi$ -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 Sachverhaltes 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  $\psi$ -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 Heisenberg'schen Prinzip ausgesprochenen empirischen Sachverhalt im Rahmen der Quanten-Mechanik in natürlicher Weise gerecht wird.

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

Das Gesagte gilt mutatis mutandi ebenso für die Beschreibung von Systemen, die aus mehreren Massenpunkten bestehen. Auch hier nehmen wir (im Sinne der Interpretation I b) an, dass die  $\psi$ -Funktion einen realen Sachverhalt vollständig beschreibe, und dass zwei (wesentlich) verschiedene  $\psi$ -Funktionen zwei verschiedene reale Tatbestände beschreiben, auch wenn sie bei Vornahme einer vollständigen Messung zu übereinstimmenden Mess-Resultaten führen können; die Uebereinstimmung der Messresultate wird dann zum Teil dem partiell unbekannten 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 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 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 un-

mittelbaren Einfluss auf  $B$ ; dies ist als «Prinzip der Nahewirkung» bekannt, das nur in der Feld-Theorie 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 I b) nicht vereinbar ist mit dem Grundsatz II.

Wir betrachten ein physikalisches System  $S_{12}$ , das aus zwei Teilsystem  $S_1$  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  $\psi$ -Funktion  $\psi_{12}$  der Koordinaten  $q_{1..}$  bzw.  $q_{2..}$  der beiden Teilsysteme ( $\psi_{12}$  wird sich nicht darstellen lassen als ein Produkt von der Form  $\psi_1(q_{1..}) \psi_2(q_{2..})$  sondern nur als eine Summe solcher Produkte). Zur Zeit  $t$  seien die beiden Teilsysteme räumlich voneinander getrennt, derart dass  $\psi_{12}$  nur dann von 0 verschieden ist, wenn die  $q_{1..}$  einem begrenzten Raumgebiet  $R_1$  und die  $q_{2..}$  einem von  $R_1$  getrennten Raumgebiet  $R_2$  angehören.

Die  $\psi$ -Funktionen der einzelnen Teilsysteme  $S_1$  und  $S_2$  sind dann zunächst unbekannt, bezw. sie existieren überhaupt nicht. Die Methoden der Quanten-Mechanik erlauben aber,  $\psi_2$  von  $S_2$  zu bestimmen aus  $\psi_{12}$  wenn zudem eine im Sinne der Quanten-Mechanik vollständige Messung am Teilsystem  $S_1$  vorliegt. Man erhält so anstelle des ursprünglichen  $\psi_{12}$  von  $S_{12}$  die  $\psi$ -Funktion  $\psi_2$  des 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  $\psi_2$  eine anders-artige 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  $\psi_2, \underline{\psi}_2, \bar{\psi}_2$  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  $\psi$ -Funktionen  $\psi_2, \underline{\psi}_2, \bar{\psi}_2$ ... 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  $\psi_2$  oder  $\psi_2$  etc. abgeleitet werden können. Dies ist natürlich unmöglich, wenn  $\psi_2$ ,  $\psi_2$  etc. von einander verschiedene reale Sachverhalte von  $S_2$  bedeuten sollen, d. h. man gerät in Konflikt mit der Interpretation Ib) der  $\psi$ -Funktion.

Es scheint mir keinem Zweifel zu unterliegen, dass die Physiker, welche die Beschreibungsweise der Quanten-Mechanik für prinzipiell definitiv halten, auf diese Ueberlegung 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 explicite 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.

### Zusammenfassung

Fasst man die  $\psi$ -Funktion in der Quantenmechanik als eine (im Prinzip) *vollständige* Beschreibung eines realen Sachverhaltes auf, so ist die Hypothese einer schwer annehmbaren Fernwirkung impliziert. Fasst man die  $\psi$ -Funktion aber als eine *unvollständige* Beschreibung eines realen Sachverhaltes auf, so ist es schwer zu glauben, dass für eine unvollständige Beschreibung strenge Gesetze für die zeitliche Abhängigkeit gelten.— A. E.

### Summary

If, in quantum mechanics, we consider the  $\psi$ -function as (in principle) a complete description of a real physical situation we thereby imply the hypothesis of action-at-distance, an hypothesis which is hardly acceptable. If, on the other hand, we consider the  $\psi$ -function as an incomplete description of a real physical situation, then it is hardly to be believed that, for this incomplete description, strict laws of temporal dependence hold.

### Résumé

L'interprétation de la fonction  $\psi$  de la mécanique quantique comme une description (en principe) *complète* d'un comportement réel, implique l'hypothèse peu satisfaisante d'une action à distance. Par contre, si l'on interprète la fonction  $\psi$  comme une description incomplète d'un comportement réel, on a peine à croire que cette description incomplète obéisse à des lois strictes, en ce qui concerne la dépendance temporelle.