

Quantenmechanik und Objektivierbarkeit

K. BAUMANN

Institut für Theoretische Physik der Universität Graz

Herrn Prof. Dr. PAUL URBAN zum 65. Geburtstag gewidmet

(Z. Naturforsch. **25 a**, 1954—1956 [1970]; eingegangen am 14. Oktober 1970)

Quantum Mechanics and Objective Reality

A Schrödinger function (or a density matrix) can be ascribed only to an object whose isolation time is larger than its time of revolution. This condition can never be satisfied for macroscopic bodies. Consequently, the “cut” between object and observer must not separate a macroscopic body (measuring apparatus) from the rest of the universe. Hence in an analysis of the measuring process, the state vector of the universe must be introduced. An interpretation of this state vector is given which provides an objective description of nature.

1. Einleitung

Die Quantenmechanik hat zwei unantastbar scheinende Prinzipien der klassischen Physik außer Gelung gesetzt: den kausalen Ablauf des Naturgeschehens und die objektive Beschreibbarkeit der Natur^{1, 2}. Die Nichtobjektivierbarkeit der Naturerscheinungen ist eine unmittelbare Folge des eigentümlichen Charakters, den die Wahrscheinlichkeitsaussagen der Theorie haben. Sie beschreiben bekanntlich eine Unbestimmtheit, die dem Objekt selbst kommt und nicht nur unserem Wissen über das Objekt. Die Zustände des Objekts, welche zu verschiedenen Werten einer Meßgröße gehören, beweisen durch Interferenz ihr gleichzeitiges Vorhandensein. Wenn wir eine Eigenschaft des Objekts messen wollen, müssen wir es vorübergehend an ein passendes System (das Meßgerät) koppeln, so daß die unerwünschten Interferenzglieder zum Verschwinden gebracht werden. Erst jetzt kann man davon reden, daß dem Objekt ein bestimmter Wert der Meßgröße zukommt. Die Interferenzglieder sind aber nicht wirklich verschwunden, vielmehr lassen sie sich jetzt durch Beobachtungen des größeren, aus Meßobjekt und Meßapparat bestehenden Systems nachweisen. Man kann also noch immer nicht davon reden, daß ein bestimmtes Meßergebnis vorliegt, solange keine Beobachtung des größeren Systems erfolgt.

Sonderdruckanforderungen an Prof. Dr. K. BAUMANN, Institut für Theoretische Physik der Universität Graz, A-8010 Graz, Österreich, Universitätsplatz 5.

¹ J. v. NEUMANN, Die mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik, Springer-Verlag, Berlin 1932.

Die Meßdaten, welche der Physiker von seinen Apparaten abliest, werden so ihrer objektiven Realität entkleidet; erst die Ablesung erzeugt das Meßergebnis.

2. Die Messung als irreversibler Prozeß

Verschiedene Autoren haben versucht, den Widerspruch zwischen Quantentheorie und objektiver Naturbeschreibung zu beheben^{3—5}. Sie gingen von der Tatsache aus, daß der Meßapparat stets ein makroskopisches System ist und das Meßergebnis im Makroskopischen durch einen irreversiblen thermodynamischen Prozeß fixiert wird. Sie konnten zeigen, daß das Ergebnis des Meßprozesses eine Superposition von Zuständen ist, die man praktisch von einem Gemenge nicht unterscheiden kann, weil die Interferenzglieder zu ihrem Nachweis eine Superapparatur erfordern würden.

Bei den Überlegungen des nächsten Abschnitts wird es unter anderem darum gehen, diesen Untersuchungen die Basis zu entziehen. Hier sei zunächst auf eine Schwierigkeit hingewiesen, die sich daraus ergibt, daß zwischen mikroskopischen und makroskopischen Objekten ein fließender Übergang besteht. Auf dem angedeuteten Weg ist nur dann das Ziel einer Objektivierung des Messens zu erreichen, wenn man die Wahrscheinlichkeitsaussagen der

² E. SCHRÖDINGER, Naturwiss. **23**, 807, 823, 844 [1935].

³ G. LUDWIG, Z. Physik **135**, 483 [1953].

⁴ H. S. GREEN, Nuovo Cim. **9**, 880 [1958].

⁵ A. DANERI, A. LOINGER u. G. M. PROSPERI, Nucl. Phys. **33**, 297 [1962].



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

Quantentheorie für verschiedene Meßgrößen ausdrücklich verschieden interpretiert. Was in der Einleitung gesagt wurde, soll nur für Mikroobjekte gelten. Hingegen sollen Wahrscheinlichkeitsaussagen, die sich auf makroskopische Meßgrößen beziehen, nur die Unvollständigkeit unseres Wissens über das Objekt charakterisieren. Ein solches Vorgehen wäre offenbar nur sinnvoll, wenn man es mit zwei wohlgetrennten Klassen von Meßgrößen zu tun hätte.

Daß es Meßgeräte an der Grenze zwischen Makro- und Mikrophysik wirklich gibt, kann man etwa am Beispiel des Sehpurpurs der Tiere studieren. Das Rhodopsinmolekül ist ein Makromolekül, an das ein Retinalmolekül in Cis-Stellung gebunden ist. Durch Absorbieren eines Photons geht es in die stabilere Trans-Stellung über. Die Gestaltänderung des Retinalmoleküls löst eine Umlagerung der Tertiärstruktur des Makromoleküls aus, die man als das Einstellen eines neuen thermodynamischen Gleichgewichtszustandes auffaßt. Die Veränderung am Rhodopsinmolekül löst schließlich im Lebewesen einen sensorischen Nervenimpuls aus. Ein Rhodopsinmolekül, welches im Reagenzglas ein Lichtquant absorbiert, ist ein messendes System an der Grenze zwischen Mikro- und Makrophysik. Einerseits wohldefiniertes Molekül, ist es doch groß genug, um auf die Absorption eines Photons mit dem Einstellen eines neuen thermodynamischen Gleichgewichtszustandes zu reagieren.

3. Der Schnitt darf nur schwach gekoppelte Systeme trennen

Es soll jetzt ein neuer Gesichtspunkt in die Diskussion um die Objektivierbarkeit gebracht werden⁶. Es wird sich zeigen, daß dieser Gesichtspunkt Konsequenzen hat, die über das Problem der Objektivierbarkeit noch hinausreichen.

Zu einem ordnungsgemäßen Meßvorgang gehört, daß die Kopplung zwischen Objekt und Meßgerät nur vorübergehend ist. Erst, wenn das Meßobjekt wieder isoliert ist, kann man die Frage nach seinem Zustand — sei er rein oder gemischt — wieder stel-

len. Solange Meßobjekt und Meßgerät stark gekoppelt sind, befindet sich nur das System als Ganzes in einem quantenmechanischen Zustand. Die Freiheit in der Wahl des Schnittes zwischen Objekt und Beobachter ist dadurch stark eingeschränkt. Der Schnitt darf nur Systeme trennen, die voneinander isoliert sind.

Da es in Strenge isolierte Objekte nicht geben kann, wird man sich fragen, wie das Konzept der Schrödinger-Funktion überhaupt auf die Natur anwendbar ist. Die Antwort muß lauten, daß nur näherungsweise von einer Anwendbarkeit geredet werden kann. Ein einfaches Beispiel ist ein Atom in einem angeregten Zustand. Es ist an das Strahlungsfeld gekoppelt. Dennoch kann man das Konzept des Anregungszustandes und seiner Ψ -Funktion mit Nutzen verwenden, jedoch nur für Zeitintervalle, die kleiner sind als die Lebensdauer des Zustandes. Wird aber die Lebensdauer kleiner als die reziproke Frequenz des Lichtquants, das beim Zerfall des Zustandes emittiert wird, dann kann man dieses Konzept überhaupt nicht, auch nicht für kleine Zeiten, verwenden.

Die eben formulierte Bedingung für den Schnitt zwischen Objekt und Beobachter ist also abzuschwächen. Die beiden Systeme brauchen nicht voneinander isoliert zu sein, aber ihre gegenseitige Kopplung muß sich als kleine Störung behandeln lassen.

Eine einfache Überlegung zeigt nun, daß makroskopische Körper niemals so gut isoliert sein können, daß man auf sie den Zustandsbegriff anwenden könnte. Bekanntlich ist die Periode der Bewegung eines physikalischen Systems von der Ordnung h/D , wobei D der mittlere Niveaustand des Systems ist. Damit wohldefinierte stationäre Zustände existieren, muß das System viele Umläufe absolvieren, ehe es ein Lichtquant emittiert oder absorbiert, mit einem Molekül aus seiner Umgebung kollidiert etc. Denn jede dieser Wechselwirkungen ändert den stationären Zustand des Körpers. Wegen der ungeheuer großen Niveaudichten makroskopischer Körper ist diese Bedingung nie erfüllbar⁷.

⁶ Nach Fertigstellung des Manuskripts gelangte dem Verfasser eine Arbeit von H. D. ZEH (Foundations of Physics 1, 69 [1970]) zur Kenntnis, welche ähnliche Überlegungen enthält.

⁷ Die Periode der Bewegung eines makroskopischen Systems ist offenbar nichts anderes als die thermodynamische Wiederkehrzeit: jene Zeit, nach der die Moleküle des Systems wieder in ihre Anfangskonfiguration zurückgekehrt sind.

⁸ Daraus würde man schließen, daß auch in der statistischen Mechanik die Verwendung von Dichtematrizen unzulässig ist. Tatsächlich kann man eine Dichtematrix für ein makroskopisches System S erst definieren, nachdem man die Wechselwirkung von S mit seiner Umgebung weggestrichen hat. Die Dichtematrix gehört also nicht zu S , sondern zu einem idealisierten System S_0 . Aber S und S_0 unterscheiden sich nicht nur um eine kleine Störung, zumal S_0 ein Niveauschema hat, S aber nicht.

Der Schnitt kann daher nie ein makroskopisches Objekt von der übrigen Welt trennen⁸. Damit verliert aber der Beweis für die Nichtobjektivierbarkeit des Messens eine seiner notwendigen Voraussetzungen. Man kann nicht das System aus Meßobjekt und makroskopischem Meßapparat als neues Objekt auffassen, das einer Messung unterzogen werden kann. Erst recht darf man nicht den Schnitt beliebig tief in das Innere des menschlichen Beobachters legen. Es gibt eine ausgezeichnete Wahl des Schnittes; er umschließt das größte isolierte System, welches das Meßobjekt enthält. Jede Messung am so definierten Objekt kann als real angesehen werden: Es gibt keinen Beobachter, für den die Messung nicht vollzogen ist.

Wenn man die Kopplung des Meßobjekts an den Meßapparat rechnerisch erfassen will, muß man das ganze Universum in das System hineinnehmen. Es ist nicht gesagt, daß das Konzept der Schrödinger-Funktion, welches aus der Mikrophysik stammt, auch geeignet ist, den Zustand des Universums zu beschreiben. Man wird aber zunächst versuchen, dieses Konzept beizubehalten. Das Interpretationsproblem der Quantentheorie stellt sich dann neu in der Aufgabe, die Schrödinger-Funktion (oder die Dichtematrix) des Universums zu interpretieren. Die bekannten Axiome, welche sich auf die Eigenschaften mikroskopischer Objekte beziehen, sind sekundärer Natur.

Wie die Deutung der Schrödinger-Funktion des Universums auszusehen hat, ist ziemlich klar. Man findet einen Satz vertauschbarer hermitischer Ope-

ratoren, die makroskopischen Observablen entsprechen, und interpretiert sie in der üblichen Weise. Andere Observablen gibt es nicht. Es sei nun $A_{ij} = A_i \delta_{ij}$ die Matrix, welche irgendeiner makroskopischen Observablen zugeordnet ist. Ihre normierten Eigenvektoren seien Φ_i . Ist $\Psi = \sum a_i \Phi_i$ die Schrödinger-Funktion des Universums, dann hat die Observable den Mittelwert

$$(\Psi, A \Psi) = \sum |a_i|^2 A_i.$$

Es gibt keine Interferenzglieder, also auch keinen Zwang zu der Annahme, daß der Zustand des Universums unbestimmt sei. Die Observable hat entweder den Wert A_1 oder den Wert A_2 usw. Die Wahrscheinlichkeit, daß sie den Wert A_i hat, ist $|a_i|^2$. In den Wahrscheinlichkeitskoeffizienten kommt nicht eine Unbestimmtheit des Zustandes des Universums zum Ausdruck, sondern nur die abgeschwächte Form des Kausalgesetzes.

Es ist offenkundig, daß der Interpretation der Wellenfunktion des Universums nichts von der Problematik anhaftet, an die man sich in der Quantentheorie gewöhnt hat. Begriffe wie Nichtobjektivierbarkeit, Unbestimmtheit des Zustandes, Rückwirkung des Beobachters auf das Objekt, komplementäre Eigenschaften werden nicht gebraucht. Es ist befriedigend, daß die wirklichen Axiome der Theorie einfacher sind als die aus den Lehrbüchern. Denn damit bestätigt sich, daß die komplizierteren Gesetze der Physik abgeleitet, die grundlegenden aber einfach sind.