

---

## Diskussion über Kausalität und Quantenmechanik

vom Sonnabend, den 6. September 1930

**HERZBERG:** Um zu sehen, ob ich die Aussagen von Heisenberg richtig verstanden habe, möchte ich sie einmal mathematisch formulieren: Wir kennen die Variablen in einem System, wir haben aber zwischen diesen Variablen prinzipiell nur eine geringere Anzahl von Bedingungsgleichungen, die als Variable vorhanden sind. Stimmt das?

**HEISENBERG:** Es stimmt nicht, denn wir können als Variable z. B. die Schrödingersche Wellenfunktion nehmen, von der wir durchaus alle Bestimmungsstücke kennen. Wir können auch, wenn wir eine bestimmte Messung so genau wie möglich ausführen, diese Wellenfunktion exakt ausrechnen. Diese Wellenfunktion läuft nach einer Differentialgleichung exakt ab, es bestehen also keine mathematischen Unbestimmtheiten. Eine Unbestimmtheit kommt erst dann hinein, wenn man aus der Wellenfunktion physikalische Schlüsse ziehen will.

**FRANK:** An den Ausführungen von Heisenberg finde ich folgendes besonders wertvoll: Die Ansicht, daß die Physik sich im letzten Grund nur mit Wahrnehmungen beschäftigen kann, hat man von seiten der Physiker oft für anstößig gehalten und für subjektivistisch erklärt. Nun hat man durch Heisenberg gesehen, daß gerade die moderne Atomphysik und Relativitätstheorie diese Gedanken unterstützt, daß diese Auffassung die einzige ist, die uns heute aus den Widersprüchen herausführen kann.

**MEYER:** Es wäre vielleicht möglich, die Anfangsbedingungen nicht auf Punkte, sondern nur auf Zellen festzulegen. Das wäre der Fall, wenn man eine Differenzgleichung hätte statt einer Differentialgleichung. Wäre es aussichtsreich, durch Differenzgleichung plus festen Anfangsbedingungen zu eindeutigen Lösungen zu kommen?

**HEISENBERG:** Das mathematische Schema der Quantentheorie ist etwas anders beschaffen. Als Bestimmungsstücke würden Sie wohl nur die der klassischen Physik gelten lassen. Wenn man diese Bestimmungsstücke verwendet, kann man nur klassische Physik damit treiben; die Anfangsbedingungen sind dann unbestimmt, und man bekommt nur eine verwaschene klassische Physik, keine Quantenphysik. Man fängt jedoch in der Quantentheorie mit einer Wellenfunktion an, die völlig bekannt ist, und zur Berechnung dieser Wellenfunktion ist alles vollständig bestimmt. Die einzige Schwierigkeit für die Physik ist der Schluß auf die Wirklichkeit von dieser Funktion aus. Die mathematische Funktion gibt nur statistische Aussagen über die Wirklichkeit.

**STEINHAUSEN:** Durch die neue Theorie über Kausalität wird in die Philosophie eine gewisse Unruhe hineingebracht. Die Wahrnehmung, also etwas rein Physiologisches, soll in die Physik hineinkommen. Ich kann mir nicht vorstellen, wie das physikalische Geschehen durch einen Wahrnehmungsvorgang beeinflußt werden könnte, so daß es unbestimmt werden könnte. Wenn man von Wahrnehmungen spricht, meint man etwas Subjektives. Sollte das in die Physik hineinkommen und die ganzen Abläufe beherrschen, so hätten wir ja eine Verknüpfung des sogenannten Subjektiven oder Psychologischen mit der Physik, dem Objektiven.

**HEISENBERG:** Ich glaube nicht, daß man so unmittelbar einen Zusammenhang konstruieren soll. Es ist so: Der Beobachter, von dem in der Quantentheorie gesprochen wird, braucht nicht unbedingt ein Mensch zu sein. Er kann ein Apparat sein, z. B. eine photographische Platte. Es ist jedoch notwendig, den *Vorgang* zu beobachten, der sich zwischen dem zu beobachtenden System und z. B. der photographischen Platte abspielt. Man kann nur Physik treiben mit *Beobachtungsvorgängen*, nicht aber mit dem *Beobachtungsobjekt allein*. Es kommt also darauf an, daß die Physik als wesentlich nachgewiesen hat, daß die Beobachtung zwischen dem System und dem Beobachter eine Wechselwirkung bedingt, die für den physikalischen Vorgang eine wichtige Rolle spielt. Aber das ist noch kein Zusammenhang zwischen der Physik und psychologischen Fragen.

**HAMEL:** Ist das eine mögliche Formulierung: Das Hilfsmittel, z. B. der Lichtstrahl, ist ein so grobes Instrument, daß man der

mathematischen Zeit oder dem mathematischen Punkt nicht mehr beliebig nahe kommen kann?

**HEISENBERG:** So einfach kann man das nicht ausdrücken.

**v. NEUMANN:** Für die moderne Quantentheorie gibt es keine „objektive Geltung“. Es steht doch so, daß hinter den Wahrnehmungen die Wellenfunktion angenommen wird. Denn wenn man die Wellenfunktion genau studieren will, muß man sie beobachten, man erfährt also nur, was man durch das Experiment aus ihr gemacht hat, und nicht, was sie vorher und an sich war. Sie ist selbst nicht beobachtbar.

**FRANK:** Das Band zwischen den Beobachtungen wird durch ein nicht beobachtbares mathematisches Schema gebildet, nämlich die Wellenfunktion. Sie ist ein Hilfsmittel, durch das die Verbindung hergestellt wird. Das Band als solches ist nicht beobachtbar. Die Wellenfunktion ist keine Realität. Als ein fiktives Band zwischen den Beobachtungen kann man diese Theorie aufstellen.

**GRELLING:** Die Formulierung von Frank scheint mir zu weit zu gehen. Ich glaube nicht, daß man aus der Quantentheorie so weitgehende subjektivistische Folgerungen ziehen kann. Aber richtig ist nach Heisenberg, daß wir von der Wechselwirkung zwischen dem Beobachter und dem System nicht absehen können. Folglich können wir also nur mit einer gewissen Einschränkung von objektiven Vorgängen sprechen in dem Sinne, daß die Vorgänge unabhängig von unseren Beobachtungen verlaufen. Aber damit ist nicht gesagt, daß wir nicht von etwas anderem als unseren Wahrnehmungen sprechen können. Auch die moderne Erkenntnistheorie steht nicht mehr auf dem Standpunkt, daß die Wahrnehmungen das allein Existierende sind. Solche Aussagen vermeidet die Erkenntnistheorie. Die Wahrnehmungen und Beobachtungen sind der Ausgangspunkt unserer ganzen Wissenschaft, und die objektive Wissenschaft wird erst konstituiert auf Grund der Wahrnehmungen. Man kann alle physikalischen Aussagen übersetzen in Aussagen über Erlebtes, über Wahrnehmungen. Wer diese Entwicklung nicht genau kennt, könnte es mißverstehen, wenn man sagt, daß die Physik von Wahrnehmungen handelt. Cum grano salis ist das freilich richtig, ich halte aber die Formulierung für gefährlich, weil sie leicht mißdeutet werden könnte.

Ich möchte noch eine andere Bemerkung machen. Heisenberg

deutete schon an, daß das klassische Kausalitätsprinzip vielfach als leer angesehen wird. Ich erinnere an Weyls Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft. (Handbuch der Philosophie.) Weyl weist da sehr glücklich nach, daß das Kausalitätsprinzip in der üblichen Formulierung tatsächlich leer ist. Wenn man sagt, daß die Vorgänge berechenbar sind, wenn man die Anfangsbedingungen nur mit hinreichender Genauigkeit kennt, so liegt in dem Begriff Berechenbarkeit noch eine Unbestimmtheit. Das heißt doch, man kann die Parameter als Funktionen der Zeit und der Anfangsbedingungen angeben; aber was für Funktionen sind das? Verlangt man nur, daß die Funktionen die Raumzeitkoordinaten nicht explizit enthalten, so ist das Kausalitätsprinzip eine mathematische Trivialität, also tautologisch. Jede andere einschränkende Bedingung über die Art der Funktionen macht aber das Prinzip falsch. Was man meint, ist, daß es einfache Funktionen sind. Bei „Berechenbarkeit“ denken wir hinzu: „mit Hilfe einfacher Funktionen“. Doch der Begriff Einfachheit läßt sich auch nur sehr schwer objektiv und scharf formulieren. Ich glaube, man muß Weyl recht geben, daß das klassische Kausalitätsprinzip leer ist, wenn man versucht, es genau zu formulieren.

**FRANK:** Über den sogenannten Subjektivismus möchte ich bemerken, daß ich genau so darüber denke wie Sie selbst. Die Dinge, die aus den Wahrnehmungen konstituiert werden, entsprechen keiner außerhalb der Wahrnehmungen existierenden objektiven Wirklichkeit. Und eines ist sicher: Die Rolle der Wahrnehmungen ist in der heutigen Physik eine viel größere als früher.

**HEISENBERG:** Wenn man davon spricht, daß es „Objektives“ gibt, meint man das in der klassischen Physik etwa so: Es gibt z. B. ein mechanisches System, das ich in seinen Bestimmungsstücken kenne, und ich kann sein Verhalten aus Differentialgleichungen berechnen. Dieses System kümmert sich nicht darum, ob es beobachtet wird. Alle Beobachter finden dasselbe, nämlich daß das System in seinem Verhalten mit dem der Lösung der Differentialgleichung übereinstimmt. Darum sagt man, diese Differentialgleichung ist oder repräsentiert das Objektive, das „Ding an sich“, und die Wahrnehmung ist gleichgültig. In der Quantentheorie ist es anders, dort hat der erste Beobachter das System verändert, der zweite Beobachter sieht es also schon wieder anders. Das System hat keine objektive Realität in dem Sinne, daß jeder Beobachter dasselbe sieht, da jeder durch

seine Beobachtung das System verändert. Daher kann man nicht sagen, daß die Wellenfunktion identifiziert werden kann mit dem „Ding an sich“, sondern die Wellenfunktion ist eine mathematische Abstraktion.

**Hamel:** Zu diesem Punkt „klassisches Kausalitätsprinzip“ möchte ich folgendes sagen: Es ist sinnlos, wenn man es so faßt, wie es formuliert wurde. Das habe ich schon längst ausgeführt in meiner Mechanik. Ich habe dort auch gesagt, daß man die Naturerscheinungen klassifizieren muß. Erst dann hat es Sinn, von Kausalität zu sprechen; Individuen einer Klasse kehren wieder, können systematisch studiert und in Abhängigkeit voneinander gesetzt werden. In eine Klasse (mit Maxwell) nur die örtlich und zeitlich verschiedenen, sonst identischen Ereignisse zusammenzufassen, ist zu eng. Eine Klasse hat mehr individuelle Konstante, durch deren Elimination das Gesetz der Klasse in Form von Differentialgleichungen entsteht. Man braucht sich dabei gar nicht auf einfache Funktionen zu beschränken.

**v. NEUMANN:** Wenn zwei Leute dasselbe hintereinander messen, so wird der zweite doch dasselbe finden wie der erste. Das beweist der Bothe-Geiger-Simonsche Versuch. An diesem Punkte muß man etwas vorsichtig sein.

**HEISENBERG:** Sie haben recht. Es sieht zunächst so aus, als ob man die Wellenfunktion mit dem „Ding an sich“ identifizieren könnte. Wenn der erste Beobachter den Ort des Elektrons mißt, so wird er schließen, das „Ding an sich“ ist ein kleines Wellenpaket. Bei Versuchen zur Ortsmessung mißt tatsächlich der zweite Beobachter denselben Ort für das Elektron wie der erste. Der zweite Beobachter wird also genau dasselbe sagen. Wenn jedoch der erste Beobachter den Ort, der zweite die Geschwindigkeit mißt, wird der erste sagen, das „Ding an sich“ ist ein Wellenpaket, der andere, es ist eine ausgebreitete Wellenfunktion. Über das „Ding an sich“ werden beide etwas ganz Verschiedenes aussagen. Man kann also Wellenfunktion *nicht* mit „Ding an sich“ identifizieren.

**FRANK:** Gewisse Experimente fallen deterministisch aus, andere fallen nicht deterministisch aus. Zu ersteren gehört auch dieser Bothe-Geiger-Simonsche Versuch.

**REICHENBACH:** Ich glaube, daß zwischen den von den Herren Frank, Grelling und Heisenberg geäußerten Meinungen ein tieferer Unterschied nicht besteht, und möchte versuchen, eine Formulierung zu geben, die allen drei Auffassungen gerecht wird. Ich möchte folgendermaßen formulieren. Die klassische Physik benutzt gewisse Idealisierungen, wenn sie von „objektiver Welt“ spricht; sie beruhen vor allem auf den beiden Voraussetzungen: 1. die Beobachtung hat keinen Einfluß auf das beobachtete System, 2. ich kann die Wahrscheinlichkeit der Voraussage beliebig an 1 rücken. Im allgemeinen ist es den Physikern gar nicht zum Bewußtsein gekommen, daß diese Idealisierungen in ihrem Weltbegriff enthalten sind; aber jetzt, wo die Quantenmechanik die genannten beiden Voraussetzungen als unrichtig hinstellt, wird der Physiker notwendig darauf geführt, daß man nicht so einfach von „objektiver Welt“ sprechen kann. Man muß vielmehr auf die Wahrnehmungen und ihren Zusammenhang zurückgehen und den Begriff der objektiven Welt auf solche Weise erst konstituieren. Es ist nun der Sinn der Bemerkung von Herrn Frank, und ebenso der von Herrn Grelling, daß dies schon von jeher ein Grundgedanke der positivistischen Philosophie war; was sich in der Quantenmechanik gegenwärtig, und besonders gerade unter Herrn Heisenbergs Einfluß, vollzieht, ist also eine Bestätigung jener älteren Überlegungen, die früher schon von positivistisch-empiristischer Seite an die klassische Physik angeknüpft wurden. Das Ergebnis dieser Überlegungen aber, in der älteren wie in der neueren Form, können wir dahin zusammenfassen: es besteht wohl eine objektive Welt, nur ist die *Deutung* dieser „Objektivität“ wesentlich komplizierter und vorsichtiger zu geben, als es in der bisherigen Physik üblich war.