

54. Band. 3. Heft.

Das Problem der Kausalität in der modernen Quantenphysik.

Von Nikolaus Junk S. J.

Einleitung.

Die Physik des 20. Jahrhunderts bildet ohne Zweifel in der Geschichte der Wissenschaft eine der glänzendsten Epochen der Naturforschung. Auf einem unvergleichlichen Siegeszug ist die experimentelle Forschung Hand in Hand mit der theoretischen Durchdringung und Ausbeutung in kürzester Zeit von Erfolg zu Erfolg vorangeschritten und hat das Wissen der Menschheit über die Natur in ungeahntem Maße bereichert. Mehr als einmal ist die Physik dabei in das Gebiet der Philosophie vorgestoßen, und nicht selten glaubte sie, durch ihre Ergebnisse philosophische Problemlösungen als falsch erwiesen zu haben. Mit fortschreitendem Eindringen der Erkenntnis in Naturgebiete, die nicht im Bereich unmittelbar zugänglicher Dimensionen liegen, habe es sich als notwendig erwiesen, tiefgreifende Änderungen vorzunehmen in den herrschenden Auffassungen über die Voraussetzungen menschlicher Naturerkenntnis. Die Naturwissenschaft glaubte sich entschließen zu müssen zu einer entschiedenen Revision ihrer eigenen Grundlagen.

Die Relativitätstheorie beschäftigte sich mit Vorgängen, bei denen die unvorstellbar große, aber endliche Geschwindigkeit der Lichtausbreitung eine Rolle spielt, und zeigte, daß es unmöglich ist, für unsere Raum- und Zeitmessung ein absolut ruhendes Bezugssystem zu finden und daß deshalb alle unsere Messungen abhängig sind vom Bezugssystem des Beobachters; daß es also unmöglich ist, über absolute Raum- und Zeitgrößen eine Aussage zu machen. Die Gleichzeitigkeit von Ereignissen in verschiedenen Raumteilen ist nicht feststellbar. Raum und Zeit seien relativiert und die bisherigen Raum- und Zeitbegriffe hätten

ihre Geltung verloren, verkündete man; die vertrauten und bewährten Vorstellungen von Raum und Zeit müßten einer umstürzenden Revision unterzogen werden.

Die Quantentheorie führte in das Gebiet des unvorstellbar Kleinen und kam zu dem Resultat, daß nicht nur die Materie, sondern auch die Energie eine atomistische Struktur aufweist. Die neuen Anschauungen sind derart verschieden von denen der früheren Wissenschaft, daß man die neue Physik in einen gewissen Gegensatz zu der alten bringt, die man heute als „klassische Physik“ zu bezeichnen pflegt. So sehr hatte man sich daran gewöhnt, dem Zwang der Erfahrung folgend, auch als unantastbar geltende Auffassungen früherer Zeiten über Bord zu werfen, daß man selbst vor Voraussetzungen, die als Grundlage jeglicher Naturerkenntnis angesehen wurden, nicht halt machte. So sind die Forscher der Ansicht, die neueste Entwicklung der Quantenphysik zwingt dazu, den Kausalsatz, der als unentbehrliche Voraussetzung aller Naturforschung galt, wieder zur Diskussion zu stellen, ja ihn als endgültig erledigt anzusehen.

Die heutige Physik stellt der Philosophie noch manche Aufgaben und es steht wohl außer jedem Zweifel, daß das naturphilosophische Weltbild noch tiefgreifende Verbesserungen und Änderungen sich wird gefallen lassen müssen auf Grund der Ergebnisse der Quantenphysik. Doch scheint die Zeit für eine philosophische Verwertung der physikalischen Daten zum Ausbau eines naturphilosophischen Weltbildes noch nicht gekommen. Die bisher unternommenen Versuche einer neuen Naturmetaphysik scheinen uns verfrüht und falsch. Welche Folgerungen sich jedoch aus der modernen Quantenphysik für das Kausalitätsproblem ergeben bzw. nicht ergeben, läßt sich heute bereits mit voller Klarheit erkennen. Der Untersuchung dieser Frage ist die vorliegende Arbeit gewidmet.

1. Kapitel: Von der klassischen Physik zur modernen Quantenphysik.

Um zu verstehen, wie es in der modernen Physik zur Leugnung der Kausalität kam und um sich ein Urteil über die Berechtigung dieser Behauptung zu bilden, ist es zunächst erforderlich, wenigstens in großen Zügen einen Überblick zu gewinnen über Entwicklung und Ergebnisse der quantenphysikalischen Forschung. Nicht wenige Erörterungen über die gegenwärtige Krise des Kausalitätsproblems lassen ein näheres Eingehen auf

die physikalischen Grundlagen dieser Krise vermissen und müssen deshalb schon aus diesem Grunde unbefriedigend bleiben. Um die Grundgedanken aufzuzeigen, die zur Leugnung des Kausalsatzes führten, wird darum in diesem Kapitel in möglichst elementarer Weise und unter Verzicht auf kompliziertere mathematische Formulierungen die moderne Atomtheorie in ihren Grundzügen dargestellt werden. Sollten trotzdem manchem Leser die in dem Kapitel vorkommenden Formeln nicht sofort und unmittelbar verständlich sein, so dürften die Darlegungen dennoch ihren Wert haben, weil sich auch ohne volles Verständnis der Formeln daraus ergibt, welches die grundlegenden Ideen der modernen Physik sind und wie das naturwissenschaftliche Erkennen heute überhaupt vor sich geht. Nur die Kenntnis dieser tragenden Gedanken ermöglicht ein Urteil darüber, ob und inwieweit die weitreichenden Folgerungen, die aus der modernen Physik gezogen werden, zu Recht bestehen.

§ 1. Die alte Quantentheorie.

Die Quantentheorie wurde begründet durch den Berliner Physiker M. Planck¹⁾. Es galt, eine Formel zu finden für die spektrale Verteilung der Energie in der Strahlung thermischen Gleichgewichts, eine Funktion für die Energieverteilung im Wärmespektrum, die die Beziehung herstellt zwischen der Energie einer beliebigen Wellenlänge und der Temperatur. Durch das Experiment war die Kurve dieser Verteilung schon längst gefunden, es fehlte aber noch eine Formel, die diese Verteilung auch wiedergab und verstehen ließ. Die Formel, zu der man gelangte unter Zugrundelegung der Maxwell'schen Elektrodynamik, das sog. Rayleigh-Jeanssche Strahlungsgesetz, stand mit der Erfahrung in krassem Widerspruch; es mußte aus diesem Grunde schon als unsinnig erscheinen, weil es für die Gesamtenergiedichte einen unendlichen Wert ergibt. Planck gelang es im Jahre 1900 nach langem Überlegen, Rechnen und Probieren eine Formel zu finden, die die Strahlung des schwarzen Körpers und ihre Verteilung auf die einzelnen beteiligten Wellenlängen

¹⁾ Die Plancksche Theorie findet sich dargestellt in jedem Lehrbuch der Physik. — Eine elementare Darstellung der alten Quantentheorie gibt Reiche, *Die Quantentheorie*. Berlin 1921. Die Entwicklung der Theorie wird in leicht verständlicher Form dargestellt in dem Nobel-Vortrag von Planck (vom 2. Juli 1920), der enthalten ist in: *Wege zur physikalischen Erkenntnis*, S. 68—86.

in einer mit der Erfahrung vollkommen übereinstimmenden Weise wiedergab. Das Plancksche Strahlungsgesetz lautet:

$$E_{\lambda, T} = \frac{c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h}{k\lambda T}} - 1} \quad (1)$$

Es gibt die Energie E der Strahlung an für das Gebiet jeder Wellenlänge λ bei der Temperatur T . Dabei bedeutet k die aus der Gastheorie bereits bekannte Boltzmannsche Konstante ($k = 1,3708 \cdot 10^{-16}$ erg/grad), c die Lichtgeschwindigkeit. h ist eine neue Konstante, die die Dimension einer Wirkung hat, die sog. Plancksche Konstante oder das Wirkungsquantum. Die Plancksche Formel unterscheidet sich von dem Rayleigh-Jeansschen Gesetz dadurch, daß die Größe h einen bestimmten endlichen Wert hat; für $h \rightarrow 0$ geht sie in das Rayleigh-Jeanssche Gesetz über. Berechnet man nach dem Planckschen Gesetz die Gesamtstrahlung eines schwarzen Körpers, dann ergibt sich das bereits vorher bekannte Stefan-Boltzmannsche Gesetz. Es hat sich in der Folgezeit gezeigt, daß die Konstante h in der Natur eine bedeutende Rolle spielt. Ihr Wert ist durch viele voneinander unabhängige Methoden und Rechnungen zu $h = 6,544 \cdot 10^{-27}$ erg.sec ermittelt worden.

Die fundamentale Idee, die Planck bei der Auffindung seines experimentell bestätigten Strahlungsgesetzes leitete, war die, daß die Energie nicht kontinuierlich emittiert wird, sondern nur in bestimmten Quanten, deren Größe von der Frequenz des strahlenden Oszillators abhängt. Je geringer die Frequenz, desto kleiner ist das Energiequantum oder, so können wir auch sagen, das Energieatom. Die Strahlung, die ein mit der Frequenz ν schwingender Oszillator emittiert, hat das Energiequantum

$$E = h \nu. \quad (2)$$

Obwohl Planck zunächst diese Diskontinuität beschränkt wissen wollte auf die Emission und Absorption von Strahlung durch Materie, hat sich später doch gezeigt, daß die atomistische Auffassung auch auf die Strahlung ausgedehnt werden muß. Man muß demnach annehmen, daß in der Strahlung selbst die Energie nur atomistisch auftritt nach dem Maß der Gleichung (2).

Bei der Betrachtung von Naturvorgängen makroskopischer Art fällt die atomistische Struktur der Strahlungsenergie wegen der Kleinheit des Energieatoms nicht ins Gewicht. Sobald aber Vorgänge des Mikrokosmos in den Bereich der Betrachtung

gezogen werden, ist es notwendig, die Ergebnisse der Quantentheorie mit zu berücksichtigen. Diese Überlegungen veranlaßten im Jahre 1913 Niels Bohr, die quantentheoretischen Erkenntnisse zur Beschreibung und Deutung des Atombaus der Materie heranzuziehen²⁾. Nach den Experimenten Rutherfords mußten die materiellen Atome aus einem positiv elektrischen Kern bestehen, um den Elektronen in rotierender Bewegung sich befinden, die die Kernladung paralysieren, so daß das ganze Atom elektrisch neutral ist. Nach der klassischen Elektrodynamik müßten allerdings die kreisenden Elektronen ständig elektromagnetische Energie in den Raum ausstrahlen, also ein kontinuierliches Spektrum ergeben und schließlich nach Verlust aller Energie in kürzester Zeit in den Kern stürzen. Die Experimente zeigen aber, daß die Atome keine kontinuierlichen Spektren ausstrahlen und daß sie stabil sind, die Elektronen also nicht in den Kern fallen. Zur Behebung dieser Schwierigkeiten machte Bohr auf Grund der Quantentheorie folgende Annahmen, die allerdings ziemlich willkürlich erscheinen mußten, da keine rechte Begründung dafür gegeben werden konnte: 1. Die Elektronen können sich nur auf bestimmten stationären Bahnen um den Kern bewegen, die dadurch charakterisiert sind, daß das über eine ganze Phase erstreckte Integral des Impulses p gleich ist einem ganzzahligen Vielfachen des elementaren Wirkungsquantums:

$$\int p \, dq = nh; \quad (n = 1, 2, 3 \dots). \quad (3)$$

2. Ein Elektron strahlt Energie nur aus und nimmt Energie nur auf beim Übergang von einer Bahn auf eine andere, und zwar ist dabei das Energiequant des emittierten oder absorbierten Lichtes gleich der Differenz der Energien E_n und E_m des Anfangs- und Endzustandes, d. h. der Ausgangs- und Zielbahn:

$$h \nu_{nm} = E_n - E_m. \quad (4)$$

Auf Grund dieser Postulate gelang es, ein Modell des Atoms zu konstruieren, das den Vorzug großer Anschaulichkeit hatte. Mit Hilfe der Bohrschen Theorie fanden die Spektren, die vom Wasserstoffatom herrührten, ihre quantitative Erklärung und

²⁾ Die Bohrsche Theorie ist auch in den Physiklehrbüchern zu finden. Außerdem in dem genannten Werk von Reiche. In leichtverständlicher Form orientiert der Nobelvortrag von Bohr, *Ueber den Bau der Atome*. 2. Aufl. Berlin 1924. — Ausführlich und genau in Sommerfeld, *Atombau und Spektrallinien*. 3. Aufl. Braunschweig 1922.

manche Erscheinungen konnten vorausgesagt werden. Aber trotz der Vervollkommnung der Theorie durch Sommerfeld zeigten sich nach einiger Zeit Widersprüche zu der genauer gewordenen Erfahrung. Die feineren Einzelheiten der Spektren, der anomale Zeemaneffekt und andere Erscheinungen konnten aus der Theorie nicht abgeleitet werden und so bestand keine Übereinstimmung mehr zwischen den Ergebnissen der genaueren spektroskopischen Messungen und den Formeln der Bohrschen Theorie.

Als unbehaglich wurden immer schon die seltsamen Postulate der Theorie empfunden, für die keine Erklärung gegeben werden konnte und die zu den Auffassungen der klassischen Elektrodynamik in Widerspruch standen. Am unbefriedigsten erschien an der Theorie, daß sie in unverständlicher Weise klassische und quantentheoretische Vorstellungen zu einem Ganzen verquickte; man dachte sich korpuskulare Elektronen, die sich nach den Gesetzen der klassischen Dynamik bewegen und dennoch von der Quantentheorie beherrscht werden sollten. „So konnte man die alte Quantentheorie infolge ihres Bastardcharakters nicht als befriedigend ansehen, und man empfand die Notwendigkeit, ein zusammenhängendes Gebäude zu errichten“³⁾. Es mußte also eine Theorie geschaffen werden, die auf quantenphysikalischen Überlegungen beruhte und aus der die Bohrschen Postulate sich als selbstverständliche Folgerungen ergäben. Dieses Werk ist in genialer Weise geschaffen worden in der Wellen- und Quantenmechanik. Diesen gegenüber bezeichnet man heute die Bohrsche Theorie als alte Quantentheorie.

§ 2. Die Wellenmechanik⁴⁾.

Die Wellenmechanik nahm ihren Ausgang von Überlegungen, die sich aus der Geschichte der Lichttheorie ergaben. Bekannt ist aus dem 17. Jahrhundert der Streit um die Erklärung

³⁾ de Broglie, *Licht und Materie*, S. 97.

⁴⁾ Eine elementare Einführung in die Wellen- und Quantenmechanik bietet Haas, *Materiewellen und Quantenmechanik*. 4. u. 5. Aufl. Leipzig 1934. — Höhere Ansprüche an das mathematische Können stellt das ausgezeichnete Werk von Jordan, *Anschauliche Quantentheorie*. Berlin 1936. — Ferner Sommerfeld, *Atombau und Spektrallinien*, Wellenmechanischer Ergänzungsband. Braunschweig 1929. — Darstellungen ohne mathematisches Beiwerk geben Heisenberg, *Quantenmechanik*: Naturw. 14 (1926), 989—994. ders.,

des Lichtes. Auf der einen Seite stand Newton mit seiner Emissionstheorie, nach der das Licht aus kleinen Korpuskeln besteht, die in den Raum hinausgeschleudert werden, auf der anderen Seite Huygens mit seiner Undulationstheorie, die im Licht einen Wellenvorgang sieht, der sich in einem elastischen Medium, dem Äther, fortpflanzt. Durch Fresnel wurde der Streit anscheinend endgültig entschieden zugunsten der Wellentheorie, die allein imstande war, die Phänomene der Interferenz und Beugung zu erklären. Erst in unserem Jahrhundert mußte man wieder zu einer gewissen korpuskularen Auffassung des Lichtes seine Zuflucht nehmen. So deutete Einstein 1905 den lichtelektrischen Effekt, bei dem durch Lichtstrahlen Elektronen freigemacht werden, deren Geschwindigkeit nicht von der Intensität des Lichtes, sondern lediglich von der Frequenz der Strahlung abhängt, dadurch, daß er das Licht als aus Lichtquanten oder Photonen bestehend dachte, die sich wie Korpuskeln benehmen und deren Energiegehalt sich nach der Planckschen Formel $E = h \nu$ bemißt. In gleicher Weise konnte auch der Compton-Effekt nur durch diese Annahme eine Erklärung finden. Bei dieser Erscheinung vergrößert ein Röntgenstrahl, der auf ein Elektron auftrifft, seine Wellenlänge und erteilt dem Elektron selbst einen Stoß. Der Strahl verhält sich bei dieser Wechselwirkung zwischen Licht und Korpuskel wie eine Partikel bei einem Zusammenstoß mit einer anderen Partikel. Dabei blieb für die Beschreibung der Interferenz- und Beugungserscheinungen die Wellenauffassung bestehen. Das Licht zeigte also einen dualistischen Charakter, bisweilen mußte es als wellenhaft, bisweilen als korpuskular gefaßt werden.

Die Doppelauffassung übertrug nun L. de Broglie 1924 auch auf die Materie. Er ordnete jeder materiellen Partikel eine Welle zu. Nach der Relativitätstheorie sind Masse und Energie äquivalent in der Weise, daß jeder Masse m eine Energie E zuzu-

Die Entwicklung der Quantentheorie 1918—1928: Naturw. 17 (1929), 490 bis 496. Jordan, *Die Erfahrungsgrundlagen der Quantentheorie:* Naturw. 17 (1929), 498—507.

Zur Wellenmechanik vgl. de Broglie, *Untersuchungen zur Quantentheorie.* Leipzig 1927; ders., Nobelvortrag in: *Licht und Materie*, S. 305—320. Darrow, *Elementare Einführung in die Wellenmechanik.* Leipzig 1929. Schrödinger, *Abhandlungen zur Wellenmechanik.* Leipzig 1927. Ders., *Vier Vorlesungen über Wellenmechanik.* Berlin 1928.

schreiben ist, die gleich ist dem Produkt aus Masse und Quadrat der Lichtgeschwindigkeit c : $E = mc^2$; entsprechend hat auch jede Energie eine träge Masse $m = \frac{E}{c^2}$. Da für die Lichtquanten nach Gleichung (2) $E = h\nu$ ist, beträgt die träge Masse eines Lichtquants: $m = \frac{h\nu}{c^2}$. Der Impuls p ist nach der Mechanik das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit, der Impuls eines Lichtquants, das sich mit der Geschwindigkeit c fortpflanzt, also

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (5)$$

(Da das Produkt aus Frequenz ν und Wellenlänge λ gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Welle ist.) Der Impuls einer Partikel von der Masse m und der Geschwindigkeit v : $p = mv$ müßte demnach, wenn man der materiellen Partikel eine Welle zugeordnet denkt, folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$p = \frac{h}{\lambda}. \quad \text{Danach wäre } mv = \frac{h}{\lambda} \text{ oder: } \lambda = \frac{h}{mv}. \quad (6)$$

Das ist die Fundamentalgleichung der Wellenmechanik. Eine Welle, die charakterisiert ist durch ihre Wellenlänge λ , wird einer mit der Geschwindigkeit v bewegten Masse m eindeutig zugeordnet. Das Bindeglied, das Materiewelle und Partikelmasse miteinander verbindet, ist nach der Gleichung die Konstante h . Auf diese Weise ist es möglich, eine Partikel zugleich als Welle und als Korpuskel zu behandeln. Durch diese wellenmäßige Auffassung der Materie wird die vorher unverständliche Bohrsche Zusatzbedingung eine Selbstverständlichkeit. Die Materiewelle eines Elektrons, das sich um den Kern bewegt, muß eine Wellenlänge haben, die ein ganzzahliges Vielfache der Bahnlänge l ist. Es muß nämlich eine stehende Welle sein, da andernfalls die Welle durch Interferenz sich selbst zerstört, also $\frac{l}{\lambda} = n$ ($n = 1, 2, 3 \dots$). Das ergibt für veränderliche Geschwindigkeit, bei der die einzelnen Bahnelemente durch den zugehörigen Wert der Wellenlänge zu dividieren sind: $f \frac{dl}{\lambda} = n$ oder nach Gleichung (5): $f p dq = nh$, in Übereinstimmung mit der Bohrschen Quantenbedingung.

Wenn die de Brogliesche Auffassung richtig sein sollte, dann müßte die Materie auch gelegentlich Wellenerscheinungen zei-

gen, bewegte Elektronen müßten z. B. beim Durchgang durch ein entsprechendes Gitter Interferenz- und Beugungsphänomene ergeben. Elektronen, die mit relativ kleiner Geschwindigkeit sich bewegen, ist nach obigem Ansatz eine Wellenlänge zuzuordnen von der Größe der Wellenlängen der Röntgenstrahlen. In der Tat zeigen derartig bewegte Elektronen beim Durchgang durch ein Kristallgitter die Phänomene der Interferenz und Beugung, die zuerst 1927 von Davisson und Germer und später wiederholt beobachtet wurden. Es ergeben sich Beugungsbilder, wie sie als Lauediagramme beim Röntgenlicht bekannt sind.

E. Schrödinger übernahm 1925 den Gedanken der Materiewellen, um eine Atommechanik zu schaffen, die einheitlich aufgebaut war auf den neuen Erkenntnissen der Quantentheorie. Als Grundlage für die Mechanik im atomaren Gebiet wählte er eine Differentialgleichung, wie sie aus der allgemeinen Wellenlehre zur Beschreibung der Ausbreitung von Wellen bekannt ist, nämlich $\Delta\psi + \frac{4\pi^2}{\lambda^2}\psi = 0$. Dabei bedeutet ψ die schwingende Größe, λ die Wellenlänge. Das Symbol Δ bezeichnet die Laplacesche Ableitung, d. h. die Summe der zweiten partiellen Differentialquotienten nach den drei Koordinaten, also $\Delta\psi \equiv \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}$. Für die Materiewelle, die einem einzelnen Teilchen zuzuordnen ist, gilt $\frac{1}{\lambda^2} = \frac{m^2 v^2}{h^2}$, nach Gleichung (6). Ist nun E die Gesamtenergie eines Teilchens, V seine potentielle Energie, dann ist $E - V$ die kinetische Energie, also $E - V = \frac{1}{2}mv^2$. Wird demnach $\frac{1}{\lambda^2} = \frac{2m(E - V)}{h^2}$ in die allgemeine Wellengleichung eingesetzt, so ergibt sich als zeitunabhängige⁵⁾ Wellengleichung für eine Partikel:

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - V)\psi = 0. \quad (7)$$

Das ist die berühmte Schrödingergleichung, die Grundgleichung der wellenmechanischen Beschreibung der atomaren Dynamik. Diese Gleichung läßt nach den Regeln der Mathematik nur in den Fällen eine eindeutige Lösung zu, in denen die Gesamtenergie E bestimmte diskrete Werte annimmt, die „Eigenwerte“. Es folgen also ohne weiteres aus der Gleichung die gequantelten Energiezustände des Atoms. Das Problem der Quantisierung

⁵⁾ Auf die Abhängigkeit von der Zeit braucht für das Verständnis der Grundgedanken nicht eingegangen zu werden.

wird auf das mathematische Problem der Eigenwerte zurückgeführt. Die zu diesen Eigenwerten gehörenden Lösungen der Gleichung liefern die jeweilige Verteilung der periodisch im Raum sich ändernden Größe ψ . Diese skalare Größe bedarf jedoch noch einer eigenen Deutung, auf die im nächsten Kapitel einzugehen ist. Mit Hilfe der Schrödingergleichung lassen sich die Daten der Erfahrung vollkommen richtig beschreiben. Auch für die Probleme, die die alte Quantentheorie nicht zu lösen imstande war, und für die Erscheinungen, die durch die Bohrschen Formeln falsch errechnet wurden, ergeben sich in der Wellenmechanik die innerhalb der Fehlergrenzen genau richtigen Werte. Allerdings wird die Gleichung für mehrere beteiligte Teilchen komplizierter und stellt einen Wellenvorgang dar in einem Konfigurationsraum, der dreimal soviel Dimensionen hat, wie die Zahl der in Frage kommenden Teilchen beträgt. Die Theorie leistet alles, was sie zu leisten hat und ist von einer großen inneren Geschlossenheit, ohne in unlogischer Weise Vorstellungen aus einander widersprechenden Theorien miteinander zu verknüpfen, wie es bei dem Bohrschen Ansatz der Fall war.

§ 3. Die Quantenmechanik⁶⁾.

Von einer ganz anderen Seite aus hatte W. Heisenberg einige Monate vor Schrödinger versucht, eine neue Atommechanik zu begründen, die mit der Erfahrung im Einklang stände und ein in sich geschlossenes Gebäude darstellte. Er machte die grundsätzliche Voraussetzung, daß nur solche Größen in die Rechnung eingehen sollten, die auch einer experimentellen Nachprüfung fähig wären. Diese sind aber: 1. Die verschiedenen diskreten Energiezustände eines Atoms, die nachgewiesen waren durch die Elektronenstoßversuche von Frank und Herz; 2. die Frequenzen des Lichtes, die ein leuchtendes Atom aussendet und die im Spektrum gemessen werden können, und 3. die Intensitäten dieser Spektrallinien, die gleichfalls meßbar sind. Aufgabe der Theorie sollte es sein, in möglichst engem Anschluß an das klassische Vorbild zwischen diesen Größen rechnerische Beziehungen herzustellen, die es gestatteten, das atomare Geschehen mathematisch zu bewältigen und so die Gesetzmäßigkeiten dieser Vorgänge darzustellen. In der so begründeten Quantenmechanik

⁶⁾ Zur Quantenmechanik vgl. außer den in Anm. ⁴⁾ genannten Schriften Heisenberg, *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*. Leipzig 1930. — Born, *Probleme der Atomdynamik*, S. 59 ff.

ist also nicht die Rede von Elektronenbahnen, die durch Lage und Geschwindigkeit der Elektronen charakterisiert sind, die sich aber jeder Beobachtung entziehen.

Beim Übergang eines Atoms von einem Energiezustand zu einem anderen wird eine Welle ausgesandt, deren Frequenz gegeben ist durch die Beziehung der Gleichung (4):

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m, \quad \text{also } \nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}.$$

An Stelle der Elektronenkoordinaten setzte Heisenberg nun die Gesamtheit der zu einem Atom gehörenden Schwingungen. Da jeder Spektrallinie, durch die diese Schwingungen gegeben sind, ein Übergang zwischen zwei Zuständen entspricht, ergibt sich für die Gesamtheit dieser Linien eine zweifache unendliche Mannigfaltigkeit von mathematischen Ausdrücken, die Heisenberg in einem quadratischen Schema von folgender Form anordneta:

q_{00}	q_{01}	q_{02}	q_{03}	q_{04}	\dots
q_{10}	q_{11}	q_{12}	q_{13}	q_{14}	\dots
q_{20}	q_{21}	q_{22}	q_{23}	q_{24}	\dots
q_{30}	q_{31}	q_{32}	q_{33}	q_{34}	\dots
q_{40}	q_{41}	q_{42}	q_{43}	q_{44}	\dots
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots

Dabei ist $q_{nm} = a_{nm} e^{2\pi i \nu_{nm} t}$ die in der Schreibweise, wie sie in der Optik üblich ist, dargestellte Schwingung von der Frequenz ν_{nm} die zu dem Übergang von dem n-ten zu dem m-ten Zustand gehört. a bedeutet die komplexe Amplitude, das Quadrat ihres Betrages also die Intensität der durch den Übergang von n zu m hervorgerufenen Spektrallinie. Diese Amplitude kann demnach als Maß für die Wahrscheinlichkeit dieses Überganges betrachtet werden. Die Glieder in der Diagonale mit zwei gleichen Indizes charakterisieren den Übergang von einem Zustand zu sich selbst, also die stationären Zustände, wobei die Frequenz ν_{nm} konsequenterweise gleich Null wird. Entspricht nun das angegebene Schema der Elektronenkoordinate in der früheren Auffassung, so ist der Elektronengeschwindigkeit dessen zeitliche Ableitung zuzuordnen, wobei die einzelnen Glieder nach der Zeit zu differenzieren sind, der Elektronenbeschleunigung der zweite Differentialquotient nach der Zeit. In dieser Weise lassen sich dann alle Bestimmungsstücke, die einem Atom auf Grund der Erfahrung zukommen, in ein derartiges Schema zusammenfassen. Es ist im Rahmen dieser Darlegungen nicht möglich, auf Einzelheiten ein-

zugehen. In der Mathematik wird ein Schema der obigen Art Matrix genannt. Heisenberg stellte, immer im Hinblick auf eine richtige Beschreibung der Phänomene und im Bestreben, eine Analogie zur klassischen Mechanik zu schaffen, Regeln auf, nach denen beim Rechnen mit Matrizen verfahren werden muß. Als wichtigste Rechenregel ergibt sich in Übereinstimmung mit der bereits im vorigen Jahrhundert von Mathematikern ausgebildeten Matrizenrechnung, die jedoch wenig Beachtung gefunden hatte und auch Heisenberg unbekannt geblieben war, nach den Überlegungen Heisenbergs als Produkt zweier Matrizen a und b die Matrix c in folgender Weise: $a_{nm} b_{mn} = c_{nm} = \sum_k a_{nk} b_{km}$.

Diese Vorschrift bedeutet, es ist zunächst das erste Glied der n -ten Horizontalreihe der Matrix a mit dem ersten Glied der m -ten Vertikalreihe der Matrix b zu multiplizieren, dann das zweite Glied der n -ten Horizontalreihe von a mit dem zweiten Glied der m -ten Vertikalreihe von b und so fort, schließlich sind alle diese Produkte zu summieren. Wie diese Regel für die Multiplikation von Matrizen zeigt, wird in den meisten Fällen die Multiplikation der Matrix a mit der Matrix b nicht das gleiche Resultat ergeben wie das Produkt aus der Matrix b und der Matrix a . Die Multiplikation von Matrizen ist also im Gegensatz zur Multiplikation von gewöhnlichen Zahlen nicht kommutativ. An dieser Stelle der neuen Mechanik setzt die Quantentheorie ein. Bezeichnet z. B. p die zu der Koordinatenmatrix q gehörende Impulsmatrix, dann muß auf Grund quantentheoretischer Erwägungen die Vertauschungsregel aufgestellt werden

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i} \varepsilon \quad (\text{wobei } \varepsilon \text{ die Einheitsmatrix bezeichnet}).$$

In dieser Vertauschungsregel wird die Plancksche Konstante zu einem wesentlichen Bestandteil der Grundlagen der Heisenbergschen Atommechanik. Aus dem quantenmechanischen Ansatz ergeben sich die Bohrschen Quantenbedingungen wiederum als notwendige Folgerung, desgleichen der Erhaltungssatz der Energie. Aus der Vertauschungsregel im besonderen folgen die Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelationen, die für die Theorie von fundamentaler Bedeutung sind. Der Fehler, der begangen wird, wenn nach Art der Zahlenmultiplikation p und q in der Matrizenmechanik als für die Produktbildung vertauschbare Größen angesehen werden, ist von der Größenordnung des elementaren Wirkungsquantums h . Der Nichtvertauschbarkeit zweier Matrizen bei der Multiplikation entspricht die Unmög

lichkeit, die beiden durch die Matrizen dargestellten Größen mit vollkommener Genauigkeit gleichzeitig zu messen. Bezeichnet Δp die Ungenauigkeit in der Kenntnis des Elektronenimpulses und Δq die Ungenauigkeit in der Kenntnis der Ortskoordinaten des Elektrons, dann besteht die Gleichung:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{h}{2\pi} \quad (8)$$

Eine Interpretation dieser Beziehung wird im folgenden Kapitel noch gegeben werden. Für die Makrophysik ist wegen des geringen Wertes von h die Vertauschungsregel nicht von Bedeutung, bei atomaren Dimensionen muß sie jedoch Berücksichtigung finden.

Der Formalismus der Quantenmechanik ist sehr abstrakt und unanschaulich und stellt nicht geringe Anforderungen an das mathematische Können, so daß selbst Physiker von Rang sich dadurch abgeschreckt fühlten⁸⁾. Obgleich dieser Formalismus für die Beschreibung des atomaren Geschehens vollständig verschieden ist von der Wellenmechanik und obwohl die Heisenbergsche Theorie einen ganz anderen Ausgangspunkt hat als die Schrödingersche, so sind die beiden Theorien dennoch mathematisch äquivalent, wie Schrödinger selbst nachweisen konnte⁹⁾. Jedes atomphysikalische Problem läßt sich beschreiben und berechnen durch die mathematischen Mittel jeder der beiden Theorien, das Resultat ist schließlich immer dasselbe.

2. Kapitel: Interpretation der quantenphysikalischen Aussagen.

Im Vorhergehenden sind die Grundzüge des mathematischen Formalismus dargelegt worden, der es ermöglicht, eine zutreffende Beschreibung der atomphysikalischen Phänomene zu geben. Um mathematische Formeln auf die Wirklichkeit anwenden zu können, ist besonders bei dem komplizierten Formalismus der Quantenphysik eine Deutung der mathematisch-

⁷⁾ Eine exakte Ableitung der Unbestimmtheitsrelationen s. Heisenberg, *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, S. 11 ff.

⁸⁾ Vgl. Schrödinger, *Abhandlungen zur Wellenmechanik*, S. 63 Anm. 2. Ferner Sommerfeld, *Atombau und Spektrallinien*. Wellenmechanischer Ergänzungsband, S. 43.

⁹⁾ Schrödinger, *Abhandlungen zur Wellenmechanik*, S. 62 bis 84: Ueber das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen.

physikalischen Sätze notwendig, wodurch die einzelnen Ausdrücke der Wirklichkeit zugeordnet werden. Auf Grund dieser Interpretation lassen sich alle quantenphysikalischen Probleme sowohl durch die quantenmechanischen wie auch die wellenmechanischen Methoden in befriedigender Weise lösen und die experimentell beobachtbaren Werte richtig berechnen und so im Rahmen der Physik verstehen. Zwar ist es nicht unmöglich, daß sich in der Zukunft in nicht vorherzusehender Weise noch weitere Beschreibungsmöglichkeiten bieten werden, aber das ist sicher, daß die Quanten- und Wellenmechanik ihre Geltung behalten werden, wie auch für das makroskopische Gebiet die klassische Mechanik trotz der neuen Atommechanik nach wie vor voll und ganz zutreffend ist. Es kann in diesem Zusammenhang nicht unsere Aufgabe sein, eine vollständige Deutung der gesamten quantenphysikalischen Aussagen zu geben; nur die Teile aus der Quantenphysik, die von Bedeutung sind für das Kausalitätsproblem, bedürfen im Rahmen dieser Arbeit einer näheren Interpretation. Gerade diese Teile sind, wie sich aus den folgenden Darlegungen ergeben wird, keiner wesentlichen Vervollkommnung mehr fähig.

§ 1. Die Materiewellen.

In der Wellenmechanik ist es vor allem der Feldskalar ψ , der eine skalare im Raum verteilte schwingende Größe darstellt, dessen Bedeutung zu klären ist. Es fragt sich, was es ist, das bei einer materiellen Partikel wellenhaft im Raum sich ausbreitet. Was soll es heißen, wenn einer Korpuskel eine Welle zugeordnet wird? Schrödinger ¹⁰⁾ faßte den Feldskalar zunächst als eine Größe, die die elektrische Ladungsdichte des Elektrons im Atom angibt. Ein Elektron wäre danach nicht aufzufassen als eine Korpuskel, deren Ladung in einem Massenpunkt konzentriert zu denken wäre, sondern eher als eine Elektronenwolke, die den Atomraum einnimmt; das Elektron wäre im Raum des Atoms verwischt oder „verschmiert“ mit wechselnder Dichte, die durch den Wert von ψ^2 gemessen würde. Die Partikel würde dann durch eine Gruppe von Wellen, ein Wellenpaket, dargestellt. Diese Deutung läßt sich indes nicht durchführen, weil ein derartiges Wellenpaket z. B. bei der Beugung eines Elektrons am Gitter zerstört werden müßte. Wellenpakete sind

¹⁰⁾ a. a. O. S. 164—169.

keine stabilen Gebilde, als welche sich die Materieteilchen erweisen. Daß den Schrödingerwellen keine physikalische Realität zukommt, wird zum mindesten höchst wahrscheinlich gemacht durch die Tatsache, daß bei der Darstellung mehrerer Teilchen die Wellenmechanik ihre Zuflucht nehmen muß zu komplizierten Wellenformeln in hochdimensionalen Konfigurationsräumen, die nicht mehr als wirkliche Wellen gedeutet werden können.

Ein Deutungsversuch, den de Broglie machte, wonach die Korpuskel durch die Welle geführt werden sollte, läßt sich nicht durchführen, wie der Begründer der Auffassung selber eingesteht¹¹⁾.

Zu allgemeiner Anerkennung gelangte unterdessen die Wahrscheinlichkeitstheoretische oder statistische Deutung der Materiewellen, die von Born gegeben worden ist¹²⁾. Born schrieb den Wellen keine physikalische Realität zu, sondern faßte sie als Symbole für Wahrscheinlichkeitszusammenhänge auf. In ähnlicher Weise mußten bereits in der Theorie der Lichtquanten die Wellen gedeutet werden. Denken wir uns das Phänomen der Interferenz, das ja mit dazu beigetragen hat, die korpuskulare Auffassung des Lichtes, wie sie von Newton vertreten worden war, völlig aufzugeben und das Licht als Wellenvorgang im elastischen Äther zu betrachten. Bei der Interferenz ergibt Licht zu Licht addiert Dunkelheit. In der Wellenauffassung läßt sich das verstehen, weil Wellen einander durch Interferenz aufheben können. Nicht so in der korpuskularen Theorie des Lichtes; dort müßten Korpuskeln sich gegenseitig vollständig zerstören, um Dunkelheit hervorzubringen. In der Lichtquantenhypothese läßt sich eine sinnvolle Deutung nur geben, wenn man in den Wellenformeln eine Angabe der Wahrscheinlichkeit sieht für das Vorhandensein oder Eintreffen der Photonen. Ist die Welle nur der mathematische Ausdruck für diese Wahrscheinlichkeit, dann wird es sofort verständlich, daß auch in der Nähe der Lichtquelle diese Wahrscheinlichkeit so gering sein kann, daß dort Dunkelheit herrscht, ohne daß man die unverständliche Annahme einer Zerstörung von Photonen machen müßte.

¹¹⁾ de Broglie, *Licht und Materie*, S. 167 f.

¹²⁾ Vgl. Born, *Quantenmechanik und Statistik*: Naturw. 15 (1927), 238—242. Ferner Jordan, *Kausalität und Statistik in der modernen Physik*: Naturw. 15 (1927), 105—110.

Da die wellenmechanische Auffassung der atomaren Dynamik in engster Analogie zur Optik entstanden ist, ist es nicht zu verwundern, daß man diese wahrscheinlichkeitstheoretische Deutung auch auf Materiewellen übertrug. Der Feldskalar der Schrödingerschen Theorie ist dann zu interpretieren als Maß für die Wahrscheinlichkeit, die für das Vorhandensein oder Eintreffen einer Partikel an der betreffenden Raumstelle besteht. Die Größe dieser Wahrscheinlichkeit ist durch den jeweiligen Wert der Funktion ψ charakterisiert und entspricht dem absoluten Betrag des Quadrates von ψ . Es läßt sich nicht leugnen, daß diese Interpretation der Wellenmechanik einen guten Sinn ergibt und sich mit der Erfahrung in voller Übereinstimmung befindet. Eine andere zutreffende Erklärung läßt sich nicht geben.

Auf Grund dieser Deutung lassen sich im Gebiet des Atomaren also nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen. Weil es nicht möglich ist, die Bewegung der Teilchen durch die klassische Mechanik zu beschreiben, sondern nur durch die Wellengleichung, ist es auch unmöglich, genau den Ort oder die Geschwindigkeit oder die Bahn des Elektrons anzugeben. Zudem ergibt sich aus der Art der zugeordneten Welle, daß die Genauigkeit für die Angabe des Ortes der Partikel um so geringer ist, mit je größerer Genauigkeit der Bewegungszustand angegeben werden kann und umgekehrt. Bei wellenmechanischer Behandlung der inneratomaren Dynamik ist es demnach nicht mehr möglich, gleichzeitig die genaue Ortslage und den energetischen Zustand für eine und dieselbe Partikel eindeutig festzulegen¹³⁾.

Von philosophischer Seite hat man gegen diese Deutung eingewandt, es könne sich nicht um Wahrscheinlichkeitswellen handeln, da Wahrscheinlichkeiten nicht gebrochen und gebeugt würden¹⁴⁾. In diesem Einwand wird der mathematische Formalismus zu realistisch aufgefaßt. Die mathematischen Wellen sind ein Mittel zur Beschreibung der physikalischen Vorgänge, ohne daß damit gesagt wäre, daß der Vorgang selbst wellenhaft sein müßte. Unter dieser Voraussetzung müßte auch

¹³⁾ Schrödinger selbst hat die Deutung der Materiewellen als einer physikalischen Realität fallen lassen und nähert sich dem hier skizzierten Standpunkt. Vgl. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik: Naturw. 23 (1935), 807—812, 823—828, 844—849.

¹⁴⁾ S. Wenzl, *Die Metaphysik der Physik von heute*, S. 23.

eine unvorstellbare Welle in einem hochdimensionalen Konfigurationsraum physikalische Realität haben. Mit der Unmöglichkeit dieser Deutung wird auch den naturphilosophischen Folgerungen, die unter ihrer Voraussetzung gezogen werden, der Boden entzogen¹⁵⁾).

Die statistische Auffassung der Materiewellen ist nicht von der gleichen Art wie die statistische Deutung etwa der Gasgesetze, die bereits im vorigen Jahrhundert ihren Einzug in die Physik gehalten hat. Jedes Gas besteht aus kleinen Teilchen, Atomen oder Molekeln, die sich in ständiger Bewegung befinden. Der Durchschnittswert der Geschwindigkeiten dieser Teilchen findet seinen Ausdruck in der Temperatur des Gases. Durch das Aufprallen der Gasteilchen auf die Wände des umschließenden Gefäßes wird auf diese Wände ein Druck ausgeübt, der bei gleichbleibender Temperatur, also bei gleichbleibender mittlerer Energie der Teilchen, konstant ist. Wird das Volumen des Gefäßes verringert, dann steigt der Druck auf die Wände, wird das Volumen vergrößert, dann sinkt der Druck. Druck und Volumen stehen demnach bei konstanter Temperatur in einem reziproken Verhältnis. Das ist das Boyle-Mariottesche Gesetz für isotherme Zustandsänderungen von Gasen, zu dem die Erfahrung geführt hat und das besagt, daß bei konstanter Temperatur das Produkt aus Druck und Volumen eines Gases konstant ist. In diesem Gesetz wird eine Aussage gemacht über das Verhalten von einer großen Zahl von Einzelteilchen und das Gesetz gilt nur, wenn bei einem Vorgang eine große Menge von Teilchen beteiligt ist. Über den Zustand der einzelnen Partikel ist durch das Gesetz nichts zu erfahren. Es läßt sich höchstens eine schwache Wahrscheinlichkeit angeben dafür, daß eine Molekel in einem bestimmten Zustand sich befindet. Der Sachverhalt ist ein ähnlicher wie in den statistischen Wissenschaften. Ein Versicherungsmathematiker kann genau sagen, wieviel Menschen in einem großen Volke an einer bestimmten Krankheit sterben werden. Welches aber das Schicksal eines einzelnen sein wird, kann er in keiner Weise angeben. Er kann nur die mathematische Wahrscheinlichkeit errechnen für den einzelnen Fall. Dabei ist zu beachten, daß der Wahrscheinlichkeitsbegriff, wie ihn die Mathematiker gebrauchen, nicht einfachhin zusammenfällt mit dem Wahrscheinlichkeitsbegriff des gewöhnlichen

¹⁵⁾ S. Anm. ¹⁹⁾.

Lebens. Gesetze, die wie das Gasgesetz Aussagen machen über das durchschnittliche Verhalten vieler Individuen, werden statistische Gesetze genannt im Gegensatz zu den dynamischen Gesetzen, die streng kausal sind und unmittelbar sich beziehen auf die kausale Determination eines Geschehens durch eine bewirkende Ursache, die unmittelbar für das Geschehen verantwortlich ist.

Anders ist die wahrscheinlichkeitstheoretische Deutung der Wellenmechanik zu verstehen. Dabei handelt es sich für gewöhnlich nicht um ein statistisches Kollektiv, über das eine exakte Aussage gemacht wird, auf Grund deren der Wahrscheinlichkeitswert für das Einzelgeschehen errechnet werden kann, sondern die Aussage betrifft einen Elementarvorgang, über den aber nur eine Aussage gemacht werden kann, die eine gewisse Breite einnimmt, die durch die Wellenfunktion angegeben wird. Ein damit zusammenhängender weiterer Unterschied der beiden Arten von Statistik wird später noch in Erscheinung treten.

§ 2. Die Unbestimmtheitsrelationen¹⁶⁾.

Ein weiterer Beweis für die Richtigkeit der wahrscheinlichkeitstheoretischen Interpretation der Materiewellen ist es, daß sie zu genau demselben Resultat führt wie die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation, die in Gleichung (8) wiedergegeben ist und die aus der Quantenmechanik folgt und zu ihren bedeutendsten Einsichten gehört. Nach dieser Beziehung ist das Produkt aus der Größe, die die Ungenauigkeit in der Kenntnis des Ortes einer Partikel angibt, und der Größe, die die Ungenauigkeit in der Kenntnis des Impulses derselben Partikel angibt, größer oder gleich der Größe $\frac{h}{2\pi}$. Diese Zahl von der absoluten Größenordnung 10_{-27} gibt also die untere Grenze an für die erreichbare Genauigkeit in der Bestimmung der zwei zusammengehörenden Größen Ort und Impuls. In gleicher Weise sind durch die nämlichen Beziehungen alle kanonisch konjugierten Größen, wie Zeit und Energie usw., miteinander verbunden. Je exakter die Kenntnis der Lage wird, desto ungenauer wird die Kenntnis des Impulses. Soll die Kenntnis des

¹⁶⁾ Vgl. zu diesem Abschnitt Heisenberg, *Ueber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*: Zeitschr. für Physik 43 (1927), 172—198. Ders., *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, S. 9—41.

Ortes der Partikel vollkommen genau werden, dann wird die gleichzeitige Kenntnis des Impulses unendlich ungenau, d. h. er ist überhaupt nicht bekannt und umgekehrt.

Die durch die Unbestimmtheitsrelation angegebene quantitative Beziehung läßt sich qualitativ verstehen, wenn wir überlegen, in welcher Weise die Beobachtungen vor sich gehen, durch die wir uns die Kenntnis der betreffenden Größen verschaffen. Um den Ort eines Elektrons festzustellen, müssen wir es beleuchten durch Lichtstrahlen. Soll dabei die Ortsbestimmung möglichst genau ausfallen, dann muß eine sehr harte Strahlung, d. h. eine Strahlung mit kurzer Wellenlänge und entsprechend hoher Frequenz, etwa Röntgenlicht oder Gammastrahlen, verwendet werden. Die Strahlen müssen zur Erzeugung eines Bildes am Elektron gebeugt werden, treten also mit diesem in Wechselwirkung und erteilen ihm nach dem Compton-Effekt einen Rückstoß. Dadurch wird aber der Impuls des Teilchens verändert. Je kürzerwellig die Strahlung, desto größer ist nach der Formel (2) das Energiequant und desto größer die Impulsänderung. Je genauer also die Ortsbestimmung, desto ungenauer die Impulsbestimmung. Soll andererseits die Impulsmessung exakt werden, dann ist möglichst langwelliges Licht zu verwenden, das wegen seiner energiearmen Lichtquanten den Impuls am wenigsten stört. Langwelliges Licht läßt aber wiederum nur eine ungenaue Feststellung des Elektronenortes zu. Soll demnach die Impulsbestimmung möglichst genau sein, dann wird die Ortsbestimmung im reziproken Verhältnis ungenau.

Die Unbestimmtheitsrelationen beruhen also darauf, daß der Beobachtungsvorgang notwendig die zu beobachtende Größe stört. Auch bei makroskopischen Messungen bedeutet die Beobachtung natürlich einen Eingriff in das Geschehen. Jedoch ist diese Störung wegen der relativen Kleinheit für das Messungsergebnis vollkommen irrelevant. In der Mikrophysik wird sie indes von Bedeutung, weil die Dimensionen des Objektes und des Beobachtungsmittels ungefähr gleich sind.

Diese Unbestimmtheiten sind nun nicht etwa eine Folge der Unvollkommenheit unserer Instrumente, die mit einer Verfeinerung der Meßtechnik im Laufe der Zeit behoben werden könnte. Sie sind bedingt durch den Vorgang der Beobachtung überhaupt. Eine Beobachtung ist nur möglich, wenn Beobachtungsmittel und Beobachtungsobjekt in Wechselwirkung treten und bei dieser Wechselwirkung ist der störende Einfluß des

Compton-Effektes unvermeidlich. Die Störung ist einfachhin nicht zu eliminieren. Demzufolge muß gesagt werden, daß die Unmöglichkeit, gleichzeitig Ort und Impuls einer atomaren Partikel zu bestimmen, eine grundsätzliche ist, die durch kein Mittel behoben werden kann. Als untere Grenze der erreichbaren Genauigkeit gleichzeitiger Beobachtung zusammengehöriger Größen erweist sich der endliche Wert der Planckschen Konstanten h . Wäre ihr Wert unendlich klein, dann wäre prinzipiell eine unendlich genaue Messung möglich. Mit dieser Tatsache muß die atomphysikalische Forschung rechnen; sie wird dadurch in Grenzen eingeschlossen, die unüberschreitbar sind.

Die Unbestimmtheitsrelationen sind also in völliger Übereinstimmung mit der statistischen Deutung der Materiewellen. Die Möglichkeit und Fruchtbarkeit der wellenmäßigen Behandlung der Atomprobleme scheint überhaupt darin ihren Grund zu haben, daß die Wellen die Unbestimmtheitsrelationen automatisch enthalten. Welche Folgerungen sich aus den Unbestimmtheitsrelationen und den Wahrscheinlichkeitswellen für die Kausalitätsauffassung und den Kausalsatz ergeben, wird aus den Ausführungen im 3. Kapitel erhellen.

§ 3. Komplementarität.

Wir wollen versuchen, ein tieferes Verständnis anzubahnen für die Unbestimmtheiten, die sich notwendigerweise immer wieder geltend machen, wenn die physikalische Forschung in die Dimensionen des atomaren Bereiches vorstoßen will. Den Schlüssel für dieses Verständnis bietet der von Bohr aufgestellte Begriff der Komplementarität¹⁷⁾. Danach zeigt die Wirklichkeit zwei komplementäre Aspekte, die einander ergänzen und zugleich beschränken. Dieser dualistische Charakter sowohl des Lichtes wie auch der Materie tritt in Erscheinung in den sogenannten Dualismusexperimenten. Um die Interferenz- und Beugungserscheinungen zu verstehen, müssen wir das Licht als Wellenvorgang auffassen. Beim Photo- und Compton-Effekt dagegen verhält sich das Licht, als bestände es aus korpuskularen Atomen. Um die Lichterscheinungen vollständig zu beschreiben, ist es also notwendig, sich der Korpuskel- wie auch der Wellenvorstellung zu bedienen, zwei Vorstellungen, die ein-

¹⁷⁾ S. Bohr, *Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomtheorie: Atomtheorie und Naturbeschreibung*, S. 34–59.

ander widersprechen. Diesen Gedanken eines dualistischen Aspektes hat, wie oben gezeigt wurde, de Broglie auf die Materie übertragen und die Erfahrung hat ihm hierin recht gegeben. Elektronen, die sich für gewöhnlich wie Materieteilchen verhalten, zeigen beim Durchgang durch ein geeignetes Gitter Beugungserscheinungen, die nur zu verstehen sind unter der Verwendung des Wellenbildes. So ist auch die Beschreibung der materiellen Vorgänge nur möglich durch die zwei einander widersprechenden Bilder von Welle und Korpuskel. Natürlich können die beiden Bilder nicht verwendet werden zur Beschreibung desselben Tatbestandes, sondern für einige Vorgänge ist das eine Bild zutreffend, für andere das zweite. Aber nur beide Bilder zusammen ergeben eine vollständige Vorstellung von dem ganzen Verhalten der Wirklichkeit. Je genauer nun die Beschreibung durch das Wellenbild ist, desto unbestimmter wird der Korpuskelcharakter und umgekehrt. Zur Veranschaulichung diene ein Gedanke, durch den de Broglie die Komplementarität von Orts- und Impulsmessung illustriert. De Broglie¹⁸⁾ sagt, die zwei „komplementären Gesichter der Wirklichkeit“ entsprechen zwei Ebenen, auf denen wir nicht zugleich genau an demselben Punkt sein können. Wenn wir die beiden Ebenen mit einem unscharfen Instrument, wie es die klassische Physik darstellt, betrachten, kommt es uns nicht zum Bewußtsein, daß es sich um Vorgänge auf verschiedenen Ebenen handelt. Wenn wir aber ein Präzisionsinstrument zu Hilfe nehmen, wie es die Quantenphysik ist, dann können wir nur auf eine Ebene scharf einstellen, wobei die andere nur verschwommen ins Blickfeld tritt. Die Betrachtung der einen Seite der Wirklichkeit läßt die andere komplementäre Seite im reziproken Verhältnis verschwinden. Die Unschärfe, die dabei zutage tritt, findet ihren Ausdruck in den Unbestimmtheitsrelationen, die als untere Grenze der Ungenauigkeit das elementare Wirkungsquantum aufzeigen. Die beiden Bilder werden demnach in ihrer Anwendbarkeit durch die Größe h beschränkt. Das scheint auch durchaus einleuchtend. Ist ja doch nach Gleichung (6) das elementare Wirkungsquantum der Bindestrich, der die wellenmäßige Auffassung und die korpuskulare Betrachtung miteinander verbindet. Die Existenz von h ist also letztlich dafür verantwortlich, daß es grundsätzlich unmöglich ist, zu einer genauen Kenntnis des Zustandes einer Partikel im atomaren Gebiet zu gelangen.

¹⁸⁾ *Licht und Materie*, S. 170 f.

Es wäre aber falsch, aus der als notwendig sich erweisenden dualistischen und komplementären Auffassung der Wirklichkeit zu folgern, das Licht und die Materie seien sowohl Welle als auch Korpuskel, zwar nicht gleichzeitig im selben Akt, was einen direkten Widerspruch bedeutete, wohl aber nacheinander und bei verschiedenen Beobachtungen. Diese Behauptung wäre positivistisch, wie sich später zeigen wird. Es läßt sich nur sagen, es gibt Experimente, die eine anschauliche Deutung nur zulassen unter Verwendung des Wellenbildes und es gibt andere Experimente, bei denen dieselbe Realität in Erscheinung tritt, die aber anschaulich nur verstanden werden können mit Hilfe der Korpuskelvorstellung. Eine Vereinigung beider anschaulichen Vorstellungen zu einer gemeinsamen ist nicht möglich. Die Dualismusexperimente und die daraus sich ergebende Notwendigkeit einer komplementären Beschreibung der Wirklichkeit zeigt, daß unsere makroskopische Anschaulichkeit im Bereich des Mikrokosmos versagt. Die Anwendbarkeit unserer anschaulichen Bilder ist beschränkt auf die Maßstäbe, in denen wir leben und uns bewegen; diesem Gebiet sind die Bilder ja auch entnommen. Es ist nicht möglich, diese Bilder einfachhin auf das Gebiet des atomar Kleinen zu übertragen. Nicht nur die Vorstellung versagt. Auch von den astronomischen Größen haben wir keine Vorstellung, aber trotzdem lassen sich die anschaulichen Bilder aus der uns umgebenden Makrowelt vergrößern und dann zur Beschreibung des astronomischen Bereichs verwenden, wengleich dabei auch einige Korrekturen nötig werden, auf die die Relativitätstheorie hingewiesen hat. Der Verzicht auf die Anschaulichkeit im Atomaren ist viel radikaler. Daß z. B. einem atomaren Gebilde keine Farbigeit im Sinne unserer farbigen Welt zuzuschreiben ist, ist uns heute eine Selbstverständlichkeit.

Uns scheint, es müssen die Begriffe noch gefunden werden, die uns die Atomwelt verstehen lassen. Diese Begriffe werden von der Anschaulichkeit sehr weitgehend losgelöst sein müssen und werden deshalb in ihrer Abstraktheit nicht geringe Anforderungen an das Denkvermögen stellen. Diese Begriffe werden derart sein müssen, daß sie die Materie auch in ihrer korpuskularen Erscheinung, sowie die Strahlung mit ihrer anschaulichen Wellennatur verstehen lassen. Daß zu solchen einheitlichen Begriffen ein Vorstoß gemacht werden muß, erhellt auch aus den Experimenten, die eine Zerstrahlung der Materie einer-

seits und die Bildung von Elektronenpaaren aus Strahlung andererseits dartun. In die gleiche Richtung weisen die neuen Auffassungen, nach denen die Elektronen, die aus dem Atomkern herrühren, nicht in diesem schon vorhanden sind, sondern sich bei der Emission erst bilden sollen und allgemein alle Erscheinungen, die einen Übergang von Materie zu Strahlung und umgekehrt zeigen. Bis heute sind passende Begriffe für das Verständnis der Atomwelt oder allgemeiner gesagt: der Materie noch nicht gefunden¹⁹⁾. Die Bildung dieser Begriffe herbeizuführen, halten wir für eine vordringliche Aufgabe der Naturphilosophie. Auf diesem Boden werden dann die gegen die Gültigkeit der Kausalität vorgebrachten Schwierigkeiten auch noch ein anderes Gesicht bekommen.

Die Arbeit dieser Begriffsbildung kann jedoch von der positivistisch orientierten Philosophie, die sich heute am meisten mit diesen Fragen beschäftigt, nicht geleistet werden, da eine solche Philosophie durch ihre Grundthese sich den Weg dazu verbaut hat. Sie wird bei der Feststellung der Komplementarität stehen bleiben und sich zufrieden geben müssen mit der bisherigen Art, die Phänomene zu beschreiben.

3. Kapitel: *Quantenphysik und Kausalitätsproblem.*

§ 1. Die Leugnung der Kausalität.

Die bisherigen Überlegungen setzen uns instand, in die Behandlung der gegenwärtigen Situation des Kausalitätsproblems einzutreten. Die Diskussion nämlich der in der Wellen- und

¹⁹⁾ Zwei bemerkenswerte Versuche dieser Art sind gemacht worden. Wenzl, (*Metaphysik der Physik von heute*) übernimmt die Behauptungen der Physiker, die größtenteils positivistisch gefärbt sind und sucht auf diesem Boden eine philosophische Auffassung der Materie zu gewinnen. Er glaubt, in dem aristotelischen Begriffspaar von Potenz und Akt den Schlüssel für ein Verständnis gefunden zu haben. Da er die wahrscheinlichkeitstheoretische Deutung der Materiewellen nicht annimmt, hält er das Wellenfeld für etwas Reales, das aber nur der Möglichkeit nach, potentiell Korpuskel ist. Gemessen wird durch die Welle die reale Möglichkeit für die Aktuierung, die „Inkarnation“ der Partikel. Eine derart reale Auffassung der Wellen ist aber nicht möglich und deshalb verlieren die darauf aufgebauten Spekulationen ihren Wert. — Eine ähnliche Deutung gibt mit ausdrücklicher Berufung auf Wenzl Conrad-Martius (*Physik und Metaphysik*: Hochland 37 (1939/40), 231—243), nur daß sie dem potenziellen Wellenfelde eine noch größere Realität zuschreibt.

Quantenmechanik rechnerisch dargestellten Ergebnisse der mikrophysikalischen Forschung, die wir in ihren Hauptzügen dargelegt haben, führte dazu, die strenge Determiniertheit des Geschehens für das atomare Gebiet in Abrede zu stellen. Diese Leugnung der Gültigkeit des Kausalgesetzes ist weiten Kreisen bekannt geworden und hat teils Bestürzungen, teils Hoffnungen ausgelöst, ohne daß diesen Kreisen die Möglichkeit gegeben wäre, die Berechtigung dieser Folgerung aus der neuen Physik nachzuprüfen. Diese Prüfung ist nun der Gegenstand der folgenden Ausführungen.

Berühmtheit erlangte der immer wieder zitierte Satz Heisenbergs: „Weil alle Experimente den Gesetzen der Quantenmechanik und damit der Gleichung (1) (= Unbestimmtheitsrelation) unterworfen sind, so wird durch die Quantenmechanik die Ungültigkeit des Kausalgesetzes definitiv festgestellt“²⁰⁾. Der Ausspruch läßt an Klarheit und Entschiedenheit nichts zu wünschen übrig. Nicht minder entschieden spricht Jordan: „Die heutige Quantenmechanik enthält eine ausdrückliche Absage an das Kausalprinzip in seiner klassischen Form“²¹⁾. In dieser oder ähnlicher Weise wird derselbe Gedanke sehr oft zum Ausdruck gebracht. In eine etwas andere Form kleidet Born die Leugnung: „Die Unmöglichkeit, alle Daten eines Zustandes exakt zu messen, verhindert die Vorherbestimmung des weiteren Ablaufs. Dadurch verliert das Kausalitätsprinzip in seiner üblichen Fassung jeden Sinn. Denn wenn es prinzipiell unmöglich ist, alle Bedingungen (Ursachen) eines Vorganges zu kennen, so ist es leeres Gerede, zu sagen, jedes Ereignis habe eine Ursache“²²⁾.

Dasselbe ist gemeint, wenn gesagt wird, die neue Quantenphysik habe ergeben, in der Natur herrsche kein Determinismus, sondern Indeterminismus, das Geschehen sei nicht determiniert: „Die Quantentheorie behauptet, daß diese in der makroskopischen Physik wirklich vorhandene Determinierung des physikalischen Geschehens in der Quatenphysik nicht mehr besteht“²³⁾. Das gleiche besagt die Formulierung, es gebe nur noch statistische Gesetzmäßigkeit in der Natur, oder es herrschen dort nur noch Wahrscheinlichkeitsgesetze: „Da man also

²⁰⁾ Zeitschr. für Physik 43 (1927), S. 197.

²¹⁾ Naturw. 16 (1928), 770.

²²⁾ Naturw. 17 (1929), 117.

²³⁾ Jordan, *Anschauliche Quantentheorie*, S. 282.

in der neuen Mechanik niemals Anfangspositionen und Anfangsgeschwindigkeit der Korpuskeln gleichzeitig als bekannt voraussetzen kann, muß der strenge Determinismus verschwinden ... Die spätere Entwicklung der Welle kann man mit Hilfe der Gleichung der Wellenmechanik streng voraussagen, aber daraus ergibt sich für die Entwicklung der Korpuskel kein strenger Determinismus, da die Tatsache, daß wir die Welle in jedem Augenblick kennen, uns über Position und Geschwindigkeit der Korpuskel nur Wahrscheinlichkeitshypothesen aufzustellen erlaubt²⁴⁾. Auch B a v i n k, der früher mit Planck entschieden für das Vorhandensein der Kausalität eintrat, hat sich neuerdings zur Preisgabe des Determinismus entschlossen²⁵⁾.

Der Grund für diese Leugnung der Kausalität ist gelegen in den Verhältnissen, die ihren Ausdruck finden in den Unbestimmtheitsrelationen. Nach diesen Beziehungen ist es ja grundsätzlich unmöglich, gleichzeitig Ort und Impuls eines Teilchens zu bestimmen. Es ist also prinzipiell ausgeschlossen, den Zustand eines Teilchens durch Beobachtung kennen zu lernen. Damit ist es auch unmöglich, kausale Abhängigkeiten im Gebiet des Atomaren festzustellen. Die Frage, ob im Bereich der Mikrophysik Determinismus herrscht oder nicht, ist durch die Erfahrung nicht zu beantworten und wird darum als sinnlos und Scheinproblem abgewiesen. Eine Antwort auf das Problem der Kausalität kann mit Sinneserlebnissen nur verknüpft werden, wenn sich Voraussagen machen lassen, deren Eintreffen durch die Erfahrung kontrolliert werden kann. Wenn nämlich das Geschehen von determinierter Kausalität beherrscht wird, ist es dem, der die Gesetze des Geschehens und den augenblicklichen Zustand des Systems kennt, möglich, vorauszusagen, welche Entwicklung das System nehmen und in welchem Zustand es sich in jedem vorgegebenen Augenblick befinden wird. Quantenmechanisch betrachtet ist die genaue Kenntnis des Zustandes auf Grund der Unbestimmtheitsrelation eine unerfüllbare Bedingung; wellenmechanisch läßt sich eine Voraussage machen, die für die Wellen einen genauen Wert liefert, doch die Welle gibt für den Zustand des Teilchens selber nur reziprok wahrscheinliche Daten.

²⁴⁾ de Broglie, *Licht und Materie*, S. 233.

²⁵⁾ Ergebnisse und Probleme der Naturwissenschaften, 5. Aufl., S. 202 ff.

Wir wollen die Sache noch etwas weiter zu erklären suchen durch ein Beispiel, das in ähnlicher Form oft diskutiert wird²⁶⁾. Elektronen, die mit entsprechender Geschwindigkeit auf ein Kristallgitter in einer bestimmten Richtung auftreffen, werden zu einem Teil durch das Gitter hindurchgehen, während der andere Teil zurückgeworfen, reflektiert wird. Durch die Gleichung der Wellen, die mit den bewegten Elektronen verbunden sind, wird dieser Vorgang mathematisch dargestellt und es läßt sich auf Grund dieser Gleichung genau angeben, wie groß der Bruchteil der durchgehenden und der reflektierten Elektronen ist. Nimmt man nun aber an, daß nur ein Elektron mit der gleichen Geschwindigkeit und in derselben Richtung wie die eben betrachtete Elektronenschar auf das Gitter auftritt, dann läßt sich auf Grund der Wellengleichung nur die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der das Elektron durch den Kristall hindurchgeht und entsprechend die Wahrscheinlichkeit, mit der es reflektiert wird. Es gibt also nur ein statistisches Gesetz für die Beschreibung des Vorgangs. Daraus, daß über das Verhalten des einzelnen Elektrons keine Aussage im voraus gemacht werden kann, wird nun gefolgert, der Vorgang sei indeterminiert und die Entscheidung werde erst beim Auftreffen auf das Gitter getroffen, das Elektron oder die Natur entscheide sich erst in dem Augenblick, in dem die Partikel entweder hindurchgeht oder reflektiert wird. Andernfalls müßte man sagen, meint Jordan, das Einzelteilchen besäße „eine gewisse verborgene Eigenschaft, die unserer heutigen Einsicht verborgen ist, die aber in Zukunft noch der direkten Untersuchung zugänglich gemacht werden wird — von der es abhängt, ob . . . die Entscheidung im einen oder im anderen Sinn ausfallen wird“²⁷⁾. Darauf läßt sich jedoch erwidern: „Es ist immerhin noch möglich, daß der Vorgang determiniert ist und daß das Elektron noch manche Eigenschaften und Zustandsbestimmungen besitzt, die wir nicht kennen und die wir vielleicht auch nie kennen werden. Wegen der Unbestimmtheitsrelation ist es uns ja wirklich verwehrt, den genauen Zustand des Teilchens zu kennen. Der indeterministische Charakter der Aussage, der bedingt ist durch die prinzipielle Unmöglichkeit einer genauen Kenntnis der in Frage kommenden Zustandsgrößen, ist nämlich nicht einfachhin gleichzu-

²⁶⁾ Vgl. z. B. Jordan, *Anschauliche Quantentheorie*, S. 284 f. Planck, *Determinismus oder Indeterminismus?* S. 14 ff.

²⁷⁾ Jordan, a. a. O. 285.

setzen mit einem indeterministischen Charakter des realen Vorgangs selbst.“ Allerdings hat sich jüngst auch P l a n c k dazu verstanden, den Schluß von der prinzipiellen Unerkennbarkeit durch Beobachtung auf das Nicht-Vorhandensein einer Bestimmung zu übernehmen. Sagt er doch, daß es nicht nur unmöglich ist, „den Ort eines solchen Elektrons anzugeben, sondern . . . daß das Elektron überhaupt keinen bestimmten Ort einnimmt“²⁸⁾.

Ganz ähnlich liegen die Verhältnisse beim Beispiel der Radioaktivität, das von J o r d a n²⁹⁾ diskutiert wird. Für den Zerfall eines einzelnen Radiumatoms läßt sich auf Grund des Zerfallsgesetzes nur eine mathematische Wahrscheinlichkeit angeben, die einen genau bestimmten Wert hat. Ob das Atom nun aber innerhalb der nächsten Sekunde zerplatzen wird oder erst nach Jahrtausenden, das bleibt uns völlig unbekannt. Eine bestimmte Aussage über das Einzelereignis läßt sich erst machen, wenn es wirklich eingetreten ist. Doch das besagt noch nicht, daß nicht bereits vor dem aktuellen Zerfall die Bedingungen für das Eintreffen der Explosion gegeben waren derart, daß das Atom in dem bestimmten Augenblick zerplatzen mußte, daß der Vorgang also in Wirklichkeit dennoch durchaus determiniert sein konnte, wenn diese Determination der Beobachtung auch unzugänglich bleibt.

Die hier auftretende Art statistischer Gesetze ist sicherlich, wie bereits oben³⁰⁾ erwähnt, von den statistischen Gesetzen zu unterscheiden, wie sie etwa in der Gastheorie oder beim Würfelspiel auftreten. Die Gasgesetze liefern feste Durchschnittswerte für das Gesamtverhalten unübersehbar vieler Einzelteilchen. Die Bewegungen dieser Molekeln oder Atome werden als streng kausal bestimmt vorausgesetzt, ohne daß jedoch diese Determiniertheit im einzelnen feststellbar wäre. Indes handelt es sich dabei um eine praktische Unmöglichkeit der Beobachtung. Es wird niemals möglich sein, die genaue Zahl der beteiligten Molekeln zu bestimmen, die Molekeln also einzeln abzuzählen; noch viel weniger ist es möglich, die Einflüsse und kausalen Abhängigkeiten festzustellen, denen die Molekeln im einzelnen unterliegen. Der Grund für diese Unmöglichkeit ist die Unüberschaubarkeit und Kompliziertheit der vorliegenden Verhältnisse. In

²⁸⁾ *Determinismus oder Indeterminismus?*, S. 23.

²⁹⁾ *Anschauliche Quantentheorie*, S. 283 f.

³⁰⁾ Siehe S. 17 f.

gleicher Weise ist auch beim Würfeln jeder Fall durch die dabei wirkenden Ursachen streng kausal determiniert, aber es ist technisch unmöglich, alle diese Ursachen festzustellen. Die Wahrscheinlichkeitsgesetze nun, die sich für das Verhalten im Großen, d. h. für die große Zahl der in einem Gasraum befindlichen Teilchen oder für die große Zahl sukzessiver Würfe ergeben, beruhen gerade auf der Annahme, daß das Einzelgeschehen streng kausal determiniert ist. Aus eben dieser Annahme einer großen Zahl im einzelnen vom Determinismus beherrschten Teilchen folgen mit mathematischer Notwendigkeit nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung die statistischen Gesetze; d. h. feste Durchschnittswerte für das Verhalten des gesamten statistischen Kollektivs.

In die Bildung der Wahrscheinlichkeitsgesetze der Quantenphysik geht eine derartige Annahme jedoch nicht ein. Die elementaren Einzelvorgänge und ihre kausalen Abhängigkeiten lassen sich im Bereich des Atomaren prinzipiell nicht genau erkennen, es besteht auch keine Möglichkeit, durch approximative Methoden die durch das Wirkungsquantum gegebene Grenze zu überschreiten, wie sich die Genauigkeit in der Kenntnis der Kausalvorgänge etwa beim Würfelspiel approximativ steigern läßt. Wollte man auch die Einzelgeschehnisse als determiniert voraussetzen, es gäbe trotzdem keinen Weg, auf diese Weise die in den Formeln der Quantenphysik gegebenen Gesetze herzuleiten, wie das bei den Gasgesetzen und den Wahrscheinlichkeitsgesetzen des Würfelspiels der Fall ist. Würde eine solche Annahme die quantenstatistischen Gesetze verstehen lassen, dann würden auch die jetzigen Leugner des Determinismus das Kausalgesetz für den atomaren Bereich als gültig anerkennen, weil ja auf diese Weise die kausale Determiniertheit mittelbar der Beobachtung zugänglich gemacht wäre.

Wie aus diesen Darlegungen hervorgeht, wird die Kausalität einseitig als Möglichkeit, Voraussagen zu machen, aufgefaßt. Mit Recht sagt M. Schlick³¹⁾, daß das Verhalten der Physiker „gegenüber gewissen Ergebnissen der Quantentheorie“ beweise, daß sie das Wesentliche der Kausalität in der Möglichkeit der Voraussage sehen. Daß diese Auffassung von Kausalität nicht zutreffend ist, wird später noch gezeigt werden.

³¹⁾ Naturw. 19 (1931), 151. Schlick hält allerdings diese Auffassung für richtig.

Setzt man also nicht den indeterministischen Charakter der Aussage gleich mit Indeterminiertheit des realen Vorgangs, dann ergibt sich aus der heutigen Quantenphysik nur folgendes: Im Gebiet des Atomaren läßt sich Kausalität nicht feststellen und zwar deshalb nicht, weil der Zustand atomarer Systeme selbst nicht feststellbar ist. De Broglie drückt das auch aus, wenn er sagt: „Der strenge Determinismus der Bewegung einer Korpuskel beruht im wesentlichen auf der Hypothese, welche die klassische Physik diskussionslos angenommen hat, daß es nämlich möglich sei, in einem Augenblick zugleich die Position der Korpuskel und ihren durch die Geschwindigkeit bestimmten Bewegungszustand mit Genauigkeit zu kennen, d. h. zu messen“³²⁾. Wäre es möglich, alle Bestimmungsstücke zu messen, dann würde nach demselben Autor auch ein determiniertes Geschehen resultieren³³⁾.

Wenn nun also behauptet wird, die Bewegung der Korpuskel sei unbestimmt, nicht determiniert, kann das ein Zweifaches bedeuten. Es kann besagen, die Determiniertheit geht nicht in die Gleichung ein, weil sie nicht feststellbar ist, sogar prinzipiell nicht feststellbar ist, und deshalb ist es auch nicht möglich, auf dem Vorhandensein von determinierter Kausalität gründende strenge Voraussagen zu machen. Dieser Satz folgt aus den gesicherten Ergebnissen der heutigen Quantenphysik und ist unbedingt als richtig anzuerkennen. Soll die Behauptung aber bedeuten, die Bewegung sei in sich objektiv nicht bestimmt und determiniert, dann kann diese Folgerung ihre Berechtigung nicht aus den Daten der Quantentheorie herleiten, sondern geht weit über die Prämissen hinaus. Es gibt keine Beobachtung, die beweist, das Geschehen sei unbestimmt. Das einzige, was sich sagen läßt, ist, daß Determiniertheit nicht festzustellen ist. Wenn man in den Aussagen der Leugner der Kausalität „Kausalität“ oder „Kausalsatz“ ersetzt durch „prinzipielle Unmöglichkeit, auf Grund der Beobachtung determinierte Voraussagen zu machen“, dann wird diese Leugnung verständlich und — richtig. Anders ausgedrückt, wenn man die Unmöglichkeit, genaue Voraussagen zu machen, mit Kausalität

³²⁾ *Licht und Materie*, S. 228.

³³⁾ „Wenn man gleichzeitig alle Elemente messen könnte, die in der klassischen Korpuskelidee enthalten sind, würde man ohne Zweifel zu einer mechanistischen und deterministischen Beschreibung des Mikrokosmos gelangen, welche der ursprünglichen Theorie von Bohr entspräche.“ a. a. O., S. 248.

gleichsetzt, dann wird die Leugnung der Kausalität selbstverständlich und notwendig. Wir müssen darauf verzichten, eine kausale Beschreibung der Vorgänge geben zu können; ob wir zu dem Verzicht gezwungen sind, den Ablauf des Geschehens als akausal zu denken, kann aus der Quantenphysik nicht gefolgert werden.

Die Auffassung einer durchgängigen Kausalität des Naturgeschehens ist jedoch derart denknotwendig, daß sich in Wirklichkeit auch die Quantenphysiker trotz ihrer formellen gegenteiligen Beteuerungen nicht davon freimachen können. Wenn die Geschwindigkeit einer Partikel bekannt ist und der Ort exakt gemessen wird, dann lassen sich nach Heisenberg³⁴⁾ die Orte, die die Partikel vor der Messung einnahm, berechnen. Das ist aber nur möglich, wenn das Geschehen als streng determiniert gedacht wird. Die gleiche Voraussetzung strenger Kausalität tritt auf in einem Gedankenexperiment, das v. Weizsäcker auf Heisenbergs Anregung durchgerechnet hat³⁵⁾. In diesem Experiment soll ein Elektron unter dem Mikroskop in dem Augenblick der Beleuchtung photographiert werden. Das Ergebnis, das ist die Stelle, an der die photographische Platte geschwärzt wird, läßt sich nicht voraussagen. Ist das Elektron aber photographiert, dann läßt sich aus dem Meßresultat mit Genauigkeit berechnen, warum gerade an der betreffenden Stelle das Bild des Elektrons entstehen mußte. Es werden also die Ursachen für die Schwärzung der photographischen Platte gerade an dieser bestimmten Stelle angegeben. Diese selben Ursachen konnten vor der Feststellung des Meßergebnisses nicht genannt werden, weil sie nicht bekannt waren. Das heißt doch wieder, daß das Geschehen von rückwärts gesehen als kausal determiniert angesehen wird, während es von vorne betrachtet als indeterminiert bezeichnet wird. Man müßte also einen Vorgang heute indeterminiert, oder, wie oft weniger entsprechend gesagt wird, akausal nennen, der morgen als kausal determiniert anzusprechen wäre. Die Leugnung betrifft somit in Wirklichkeit gar nicht das Vorhandensein der Kausalität selber, sondern nur die Möglichkeit einer genauen Voraussage. Es wird indes vor-

³⁴⁾ *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, S. 15. — Siehe auch unten S. 35 f.

³⁵⁾ *Ortsbestimmung eines Elektrons durch ein Mikroskop*: Zeitschr. für Physik 70 (1931), 114—130. — Dieses Experiment wird eingehend behandelt und diskutiert von Hermann, *Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik*.

ausgesetzt, daß der Vorgang von strenger Kausalität beherrscht wird, andernfalls ließen sich auch nachher nicht die Ursachen für den beobachteten Effekt angeben durch Berechnung der erfolgten Impulsänderung oder des Lichtweges.

§ 2. Die neopositivistische Denkhaltung als Grund der Kausalitätsleugnung.

Wie dennoch die Ungültigkeit des Kausalgesetzes aus der modernen Mikromechanik gefolgert werden konnte, läßt sich nur verstehen, wenn man sich klar ist über die erkenntnistheoretische Grundeinstellung der Forscher, die diese Folgerung gezogen haben, und das ist der Positivismus bzw. Neopositivismus. Bei den bisherigen Erörterungen der Philosophen über die gegenwärtige Problemlage ist, wie uns scheint, diesem Umstand zu wenig Beachtung geschenkt worden. Zudem ist von vielen, die den Positivismus bekämpften, dieser nicht richtig interpretiert worden, wenigstens nicht in seiner heutigen Gestalt³⁶⁾.

Der Schöpfer der positivistischen Philosophie ist Aug. Comte (1798—1857). Comte unterscheidet drei Stadien, die das menschliche Erkennen im Laufe der Geschichte nacheinander durchläuft³⁷⁾. Im ersten, theologischen Stadium, sucht der Mensch die Erscheinungen zu erklären durch übernatürliche Wesen, mit denen er die Natur bevölkert und die er mit anthropomorphistischen Zügen ausstattet. Im zweiten, metaphysischen, setzt er an Stelle der übernatürlichen Kräfte abstrakte Ursachen und Wesenheiten, wie sie der Gegenstand der Ontologie sind. Im dritten und letzten gibt sich die Wissenschaft damit zufrieden, ihre Forschungen auf die Beobachtungen und das empirisch Erfahrbare zu beschränken. Das ist der Positivismus. Einzige Aufgabe der richtigen Wissenschaft kann es dann nur noch sein, die Gesetze des Geschehens festzustellen durch Aufsuchen der konstanten Beziehungen zwischen den

³⁶⁾ P l a n c k (*Positivismus und reale Außenwelt: Wege zur physikalischen Erkenntnis*, S. 208—232) bekämpft eine Form des Positivismus, mit der sich die modernen Vertreter dieser Lehre gewiß nicht identifizieren würden. — Auch B a v i n k trifft mit seiner Kritik nur den krassen Postivismus, wie er etwa von Ph. Frank verteidigt wird, nicht aber die Art des Positivismus, wie sie heute meist vorgetragen wird.

³⁷⁾ A. C o m t e, *Abhandlung über den Geist des Positivismus*. Philos. Bibliothek. Bd. 155, S. 4 ff.

Erscheinungen. Einziges Kriterium für die Wahrheit einer Behauptung ist ihre Übereinstimmung mit den Beobachtungen.

Die positivistische Denkhaltung und Wissenschaftsauffassung hat in Deutschland durch E. M a c h (1838—1916) Eingang gefunden in die Kreise der Physiker. Mach lehrt, die Welt bestehe nicht aus Dingen, sondern „aus Farben, Tönen, Wärmen, Drücken, Räumen, Zeiten usw. . . ., wir nennen sie einfach Elemente“³⁸⁾; „die Natur setze sich aus den durch die Sinne gegebenen Erfahrungen zusammen“³⁹⁾. Aufgabe der Naturwissenschaft ist es, eine metaphysikfreie B e s c h r e i b u n g der Wahrnehmungen und Erfahrungen zu geben. „Physik‘ ist ökonomisch geordnete Erfahrung“⁴⁰⁾. Ein „Erklären“ im Sinne einer Zurückführung der Erscheinungen auf sie bewirkende Ursachen wäre Metaphysik und deshalb sinnlos. Die wichtigste Eigenschaft der Wissenschaft ist ihr ökonomischer Charakter. „Alle Wissenschaft hat Erfahrungen zu ersetzen und zu ersparen durch Nachbildung und Vorbildung von Tatsachen in Gedanken, welche Nachbildungen leichter zur Hand sind als die Erfahrung selbst und diese in mancher Hinsicht vertreten können“⁴¹⁾. Daß Mach auf Grund dieser Wissenschaftsauffassung zu seiner Zeit die reale Existenz der Atome leugnen mußte, ist selbstverständlich, da ja damals die Atome weder unmittelbar noch mittelbar erfahrbar waren.

Mach gilt den heutigen Positivisten immer noch als Kronzeuge ihrer Ansicht⁴²⁾, wengleich der moderne Neu- oder Neopositivismus doch beträchtliche Unterschiede gegenüber dem Machschen aufweist. Der Neopositivismus tritt in zwei nicht wesentlich voneinander verschiedenen Formen auf. Eine krasere und radikalere Form wird von dem „Wiener Kreis“ vorgetragen, deren Vertreter mehr Erkenntnistheoretiker als Physiker sind⁴³⁾. Bei der Polemik gegen den Positivismus findet fast nur diese Form Berücksichtigung⁴⁴⁾. Die Physiker selbst verteidigen eine etwas subtilere Art des Positivismus. Wir be-

³⁸⁾ M a c h, *Populär-wissenschaftliche Vorlesungen*, S. 237 f.

³⁹⁾ M a c h, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, S. 458.

⁴⁰⁾ M a c h, *Populär-wissenschaftliche Vorlesungen*, S. 226.

⁴¹⁾ M a c h, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, S. 457; vgl. auch *Populär-wissenschaftliche Vorlesungen*, S. 222.

⁴²⁾ Vgl. J o r d a n, *Anschauliche Quantentheorie*, S. VII f. — ders., *Physikalisches Denken in der neuen Zeit*, S. 38.

⁴³⁾ Dazu gehören Ph. Frank, R. Carnap, M. Schlick.

⁴⁴⁾ S. Anm. ³⁰⁾.

schränken uns darauf, diese Denkhaltung darzulegen, die, oft unausgesprochen, den Erörterungen über die Kausalität von seiten der Physiker zugrunde liegt. Formell vorgetragen und verteidigt wird diese Lehre besonders von P. Jordan⁴⁵⁾, der sie ausdrücklich auch als „erkenntnistheoretische Einstellung Bohrs und Heisenbergs“⁴⁶⁾ bezeichnet. Diese Denkhaltung und Wissenschaftsauffassung ist sicher weit verbreitet in den Kreisen der modernen Quantenphysiker. Jordan behauptet sogar: „Die neue Physik ist nicht denkbar ohne den Einfluß der positivistischen Erkenntnistheorie“⁴⁷⁾. Physiker dagegen, die dem Positivismus ablehnend gegenüberstehen, halten auch die Quantenphysik für nicht endgültig, sondern höchstens für ein vorläufiges Provisorium, das einer neuen, die klassischen Begriffe wieder aufnehmenden Auffassung einmal weichen müssen. Die Ausführungen dieses Kapitels werden indes den Beweis erbringen, daß eine Ablehnung des Positivismus durchaus nicht einherzugehen braucht mit einer Ablehnung der neuen Physik.

Mit Mach sieht der Neopositivismus die einzige Aufgabe und das alleinige Ziel der Wissenschaft in einer möglichst vollkommenen und einfachen Beschreibung der experimentellen Tatsachen. Jede weitergehende Aussage etwa über das Wesen der Dinge, das „hinter den Erscheinungen“ diesen zugrunde läge, wird von vorneherein als sinnlos abgelehnt. Diese Unterscheidung von sinnvollen und sinnlosen Urteilen, von wirklichen Problemen und Scheinproblemen betrachtet der moderne Positivismus als seine wichtigste Entdeckung⁴⁸⁾. Als sinnvoll werden Aussagen nur dann angesehen, wenn sie entweder richtig oder falsch sein können, und wenn es überhaupt als ein wenigstens prinzipiell lösbares Problem angesehen werden kann, nach der Richtigkeit oder Falschheit des Urteils zu fragen. Die Antwort auf eine solche Frage kann indes nur gegeben werden durch Hinweis auf die Erfahrung. „Sinnvoll sind solche Aussagen, die sich unmittelbar auf unsere Sinneserlebnisse beziehen, wobei die Aussage natürlich nicht nur die positive Feststellung eines vorliegenden Sinneserlebnisses enthalten, sondern ebenso gut beispielsweise eine Erwartung bezüglich künftiger

⁴⁵⁾ *Anschauliche Quantentheorie*, S. 271 ff. — *Physikalisches Denken in der neuen Zeit*, S. 34—40.

⁴⁶⁾ *Anschauliche Quantentheorie*, S. VII.

⁴⁷⁾ *Die Physik des 20. Jahrhunderts*, S. 132.

⁴⁸⁾ Jordan, *Anschauliche Quantentheorie*, S. 273.

Sinneserlebnisse ausdrücken können. . . . Jede sonstige Aussage kann nur dadurch sinnvoll sein, daß sie auf Grund von Definitionen und terminologischen Festsetzungen mit derartigen, unmittelbare Sinneserlebnisse betreffenden Aussagen äquivalent ist⁴⁰⁾ Die gesamten Konstruktionen, die die Physik einführt zur Erkenntnis der Natur, bekommen demnach ihren Sinn erst durch Zurückführung auf Sinneserlebnisse, auf Beobachtungen.

Die Polemik gegen den Positivismus, auch den Positivismus von heute, führt immer wieder als Hauptargument gegen diese Denkweise an, in dieser Auffassung werde die Existenz einer realen Außenwelt, die unabhängig von unseren Erlebnissen bestehe, geleugnet; es gelten ja nur die Erlebnisse, nicht aber eine Welt, die diesen Erlebnissen entspreche. Doch diese Kritik trifft sicherlich nicht den Neopositivismus, wie er heute ausdrücklich oder doch praktisch vertreten wird. Gewiß, die Fragestellung, ob es eine reale Außenwelt gibt oder nicht, müßte als solche vom Positivismus folgerichtig als sinnlos und als Scheinproblem abgelehnt werden, da es grundsätzlich keine Beobachtung gibt, die es gestattet, auf die Frage eine positive oder negative Antwort zu geben. Die Frage ist eine metaphysische, und Metaphysik kann nach dem Positivismus niemals sinnvoll sein. In der Makrophysik läßt sich auf Grund der Beobachtungen ein Modell einer von der Beobachtung unabhängigen Welt konstruieren und dieses Bild wird sinnvoll real genannt. In der Quantenphysik hat sich gezeigt, daß der Beobachtungsvorgang entscheidend eingeht in die Beobachtung und keine Möglichkeit besteht, eine Trennung zwischen Beobachtungsakt und objektiv bestehender Wirklichkeit vorzunehmen. Damit wird wiederum das Ganze, Beobachtungsakt und Beobachtungsobjekt zusammen, sinnvoll real genannt. Wir glauben, die Auffassung des Neopositivismus richtig wiederzugeben, wenn wir sie auf die kurze Formel bringen: Real ist, was prinzipiell beobachtet ist; oder: Real ist, was beobachtet wird oder doch wenigstens grundsätzlich beobachtet werden kann.

Die Richtigkeit dieser Formel ergibt sich daraus, daß diese Denkhaltung den Deutungen zugrunde liegt, die die Physiker ihren Forschungsergebnissen geben. Nach der Quantenmechanik ist es grundsätzlich nur möglich, entweder Ort oder Impuls eines materiellen Teilchens genau zu messen. Wäre nun die Elektro-

⁴⁰⁾ a. a. O. 276 f.

nengeschwindigkeit bekannt und der Ort würde genau gemessen, dann ließen sich die Orte v o r der Messung durch Rechnung ermitteln. Das Resultat dieser Rechnung ist aber nicht nachprüfbar, geht auch wegen der durch die Messung eintretenden Impulsänderung in keine Rechnung über die Zukunft als Anfangsbedingung ein und zeigt sich deshalb auch in keinem späteren Experiment. Diesen durch Rechnung erhaltenen Lagen des Teilchens Realität zuzuschreiben, erklärt Heisenberg als „eine reine Geschmacksfrage“⁵⁰⁾. Die gleiche Sachlage, die die Unbestimmtheitsrelationen ausdrücken, daß prinzipiell nie Ort und Geschwindigkeit eines materiellen Teilchens genau gemessen werden können, wird gedeutet: Das Teilchen hat keinen definierten Ort und keine bestimmte Geschwindigkeit. Also wiederum, was grundsätzlich nicht beobachtbar ist, ist nicht real.

Es ist nicht unwichtig, die positivistische Grundeinstellung klar herauszuarbeiten und mit Nachdruck darauf hinzuweisen. Nur zu oft werden nämlich positivistisch beeinflusste Aussagen gerade von Philosophen übernommen und zur Grundlage philosophischer Überlegungen gemacht, ohne daß diesen Autoren zum Bewußtsein kommt, wie weit der positivistische Einfluß in den Aussagen reicht. Selbst de Broglie, der in seinen Formulierungen sonst sehr vorsichtig ist und derartigen positivistischen Ausdrucksweisen meist eine einschränkende Form gibt („in gewissem Sinne“ oder so ähnlich), behauptet, „daß das Elektron keine einfache Korpuskel ist. Es besitzt gleichzeitig einen korpuskularen und einen Wellencharakter“⁶¹⁾. Unbeeinflusst vom positivistischen Denken läßt sich nur sagen, das Elektron zeige sowohl Korpuskel- wie auch Wellencharakter, es verhalte sich als Welle und auch als Korpuskel. Sogar bei Autoren, die den Positivismus auf das entschiedenste zurückweisen, finden sich bisweilen positivistisch beeinflusste Formulierungen. So erklart Conrad-Martius, „daß das fortgestoßene Elektron überhaupt keine ‚Bahn‘ und damit auch keine BewegungsgröÙe im Sinne einer den Raum kontinuierlich durchmessenden makroskopischen Korpuskel besitzt“⁶²⁾. Beweis ist ihr, das werde auch von allen Physikern bestätigt, und diese bestätigende Behauptung, so glaubt Conrad-Martius, beruhe nicht auf einem positivistischen Vorurteil. Gewiß scheinen neue Begriffe, die von

⁵⁰⁾ *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, S. 15.

⁵¹⁾ *Licht und Materie*, S. 106.

⁵²⁾ *Physik und Metaphysik*, S. 238.

der makroskopischen Anschaulichkeit weitgehend losgelöst sind, zur geistigen Bewältigung der Mikrowelt notwendig zu sein⁵³⁾ und es ist möglich, daß dabei die ‚Bahn‘ des Elektrons die Anschaulichkeit einer makroskopischen Korpuskelbahn einbüßt, aber behaupten, daß der Grund für die Unkontrollierbarkeit des Verhaltens der Elektronen im Fehlen einer Bahn liege, heißt doch Nicht-Beobachtbarkeit und Nicht-Realsein gleichsetzen. Denn das ist das einzige, was sich füglich behaupten läßt, daß durch die mit der Beobachtung notwendig verbundene Störung die Bahn nicht festzustellen ist. Wie Bayliss trotz seines temperamentvollen Kampfes gegen den Positivismus neuerdings dennoch bei seiner Deutung der Kausalität positivistischen Gedankengängen Raum gibt, wird noch zu zeigen sein.

Die erkenntnistheoretische Einstellung des Neopositivismus tut den physikalischen Ergebnissen als solchen indes keinen Eintrag. Es ist im Gegenteil unleugbar, daß die Wellen- und Quantenmechanik beide ganz geniale Schöpfungen sind, die uns tief hineinführen in das Mikrogesehen der Natur. Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß in diesen Theorien die Mittel bereitgestellt werden, eine zutreffende Beschreibung der atomaren und subatomaren Vorgänge zu liefern und die meßbaren Größenverhältnisse der Mikrowelt in gesetzmäßigen Zusammenhang zu bringen. Es muß auch zugegeben werden, daß die Darlegungen neopositivistischer Denker sich durch begriffliche Sauberkeit und formalologischen Scharfsinn auszeichnen, die der physikalischen Forschung nur zum Vorteil gereichen. Diese Tatsache, daß in den positivistischen Schriften sich klare und scharf formulierte Begriffe, sicherer Sprachgebrauch und Freiheit von allem Verschwommenen finden, mag der Grund sein dafür, daß die exakten Naturwissenschaftler eine so große Vorliebe zeigen für eine positivistische Erkenntnistheorie. Es wäre somit ein Fehler, mit der Ablehnung der modernen neopositivistischen Denkhaltung auch die Ablehnung der Quantenphysik selbst zu verbinden. Die wellen- und quantenmechanische Behandlung der mikrophysikalischen Probleme leistet wirklich alles, was die physikalische Wissenschaft leisten kann. Zu falschen Behauptungen führt das Denken des Positivismus erst dann, wenn die Grenzen der reinen Naturbeschreibung überschritten werden,

⁵³⁾ Vgl. oben S. 23 f.

weil dann die Grundthese, daß Realität und Beobachtbarkeit gleichzusetzen seien, entscheidend in die Urteile mit einfließt.

Bleibe also die positivistische Einstellung auf das Gebiet der Physik als solcher beschränkt, mit anderen Worten, würde der Neopositivismus besagen, Aufgabe der Physik sei lediglich eine möglichst exakte und umfassende Beschreibung der durch die Beobachtung zugänglichen Naturtatsachen und für den Physiker als Physiker seien nur solche Urteile sinnvoll, die einer Betätigung durch die Erfahrung fähig seien⁵⁴⁾, dann ließe sich nicht viel dagegen einwenden. Es wäre zwar eine große Selbstbescheidung der Physik, ihren Bereich in derartig enge Grenzen einzuschließen. Einer Wissenschaft, die auf dem Boden dieser durch eine solche Physik gesicherten Tatsachen zu weiteren Schlußfolgerungen und Erkenntnissen vordränge, müßte dann eben ein anderer Name gegeben werden. Indessen ist der Positivismus in Wirklichkeit nicht so bescheiden, wie er sich oft den Anschein gibt. Er macht vielmehr den Anspruch, die einzig mögliche erkenntnistheoretische Haltung für jede Wissenschaft zu sein. Jedes Urteil, das nicht positivistisch gerechtfertigt werden könne, sei sinnlos und damit für jede Wissenschaft abgetan.

Wir glauben, in dieser Arbeit keine eingehende und umfassende Widerlegung des Positivismus geben zu müssen. Jede Philosophie, die die Möglichkeit einer Metaphysik und von Urteilen, die über die Beobachtbarkeit hinausgehen, aufweist, ist damit eine genügende Widerlegung der positivistischen Lehre. Das geistige Erkennen des Menschen vermag mehr als der Positivismus mit seiner engen Grenzziehung ihm zugestehen will. Hier sei nur kurz darauf hingewiesen, daß die positivistische Denkhaltung überhaupt nicht durchführbar ist. Die fundamentale Behauptung des Positivismus trägt zugleich das Verdikt über sich selber in sich. Es wird erklärt, Metaphysik sei sinnlos und diese Behauptung ist nichts anderes als eine metaphysische,

⁵⁴⁾ Schrödinger ist wohl der einzige unter den führenden Physikern, der ähnliche Einschränkungen macht, indem er der Behauptung, „daß wirklich letzten Endes nur die Beobachtung, die Messung“ sei (Naturw. 23 (1935), 323) wenigstens in Klammern beigefügt „für den Physiker“. Vgl. auch seine Antrittsrede in der Preußischen Akademie der Wissenschaften: Naturw. 17 (1929), 732. — Ähnlich sagt R. Fürth: „Theorien also, die prinzipiell nicht durch Experimente beweisbar sind, haben in der Physik im engeren Sinne nichts zu suchen“. Naturwissenschaft und Metaphysik, S. 11.

bezeichnet sich also selbst als sinnlos. Es wird gesagt, einen Sinn könnten nur solche Feststellungen und Urteile haben, die sich durch Beobachtung nachprüfen ließen und dadurch auf sinnliche Erlebnisse zurückgeführt werden könnten. Es läßt sich aber keine Beobachtung angeben, durch die die Grundthese des Positivismus auf sinnliche Erlebnisse zurückgeführt und dadurch „sinnvoll“ werden könnte⁵⁶⁾.

§ 3. Versuche zur Rettung der Kausalität.

1. Von seiten der Physik.

Die Preisgabe des Kausalgesetzes bedeutet einen derartig unerhörten Verzicht, daß es nicht wundernehmen kann, daß die Wissenschaft alle Anstrengungen machte, trotz der Quantenphysik die Kausalität zu retten. Einige der bedeutendsten Versuche dieser Art sollen hier eine Würdigung finden.

Unter den Vertretern der Physik sind es nur wenige, die sich nicht einfachhin der Leugnung der Kausalität anschlossen. In erster Linie steht der Schöpfer der Quantentheorie selbst, M. Planck, der sich den radikalen Folgerungen, die aus der konsequenten Weiterführung seiner eigenen Theorie gezogen werden, nicht anzuschließen vermag. Für ihn ist das Kausalgesetz „ein heuristisches Prinzip, ein Wegweiser, und nach meiner Meinung der wertvollste Wegweiser, den wir besitzen, um uns in dem bunten Wirrwarr der Ereignisse zurechtzufinden und die Richtung anzuzeigen, in der die wissenschaftliche Forschung vorangehen muß, um zu fruchtbaren Ergebnissen zu gelangen“⁵⁶⁾. Nach Plancks Meinung ist „die Annahme eines absoluten Determinismus für jede wissenschaftliche Untersuchung die unentbehrliche Grundlage“⁵⁷⁾. Deshalb sucht er auch um jeden Preis den Determinismus zu retten⁵⁸⁾. Er verzichtet dar-

⁵⁶⁾ Von einer anderen Seite weist einen Widerspruch im positivistischen Denken nach Linke, *Neupositivismus und Intentionalität: Naturwissenschaft und Metaphysik*, S. 141—157. — Die Widerlegung, die R. Strohal, das „Scheinbare“ und das „Wirkliche“ (ebd. S. 109—139) gibt, trifft nur den Positivismus Ph. Franks und beruht zudem auf einem falschen Wahrheitsbegriff.

⁵⁶⁾ Planck, *Wege zur physikalischen Erkenntnis*, S. 259.

⁵⁷⁾ Ebd. S. 65.

⁵⁸⁾ In vielen Aufsätzen und Vorträgen hat Planck seine Ansicht dargelegt. Wir beziehen uns in unserer Darstellung auf zwei

auf, näher auf das Wesen der Kausalität einzugehen und setzt seinen Überlegungen die Annahme voraus, daß das kausal determiniert zu nennen ist, was genau vorausgesagt werden kann. Da diese Möglichkeit in der neuen Quantenphysik nicht gegeben ist, hält er sie für ein Provisorium, an dessen Stelle noch ein anderer Formalismus wird treten müssen, von dessen Art wir heute noch nichts sagen können. Neuerdings führt er diesen Gedanken etwas weiter⁵⁹⁾. Danach soll ein Geschehnis niemals schlechthin determiniert oder indeterminiert sein, sondern ob es das eine oder andere ist, hänge von den Voraussetzungen ab, mit denen man an seine Betrachtung herantrete. So ließe sich zwar das gesamte Naturgeschehen indeterministisch auffassen, das aber hält Planck für unheilvoll. Darum hält er dafür, daß um jeden noch so teuren Preis Voraussetzungen gefunden werden müssen, die auch das atomare Geschehen als determiniert erscheinen lassen. Bis jetzt sei ein Prinzip, das derartige Voraussetzungen enthält, noch nicht bekannt. Bevor es gefunden ist, glaubt der berühmte Physiker, sei in der Atomphysik noch nicht das letzte Wort gesprochen.

Nicht wesentlich von dieser Auffassung verschieden ist der Standpunkt, den M. v. L a u e vertritt⁶⁰⁾. Nach ihm ist das Kausalgesetz ein erkenntnistheoretisches Postulat, dessen Berechtigung er allerdings nicht nachweisen kann. Schon öfter in der Geschichte der Physik habe man, bisweilen sogar für lange Zeit, derartige Postulate aufgegeben, sei dann später aber wieder zu ihnen zurückgekehrt. So sei es z. B. dem Prinzip von der Nahewirkung ergangen durch das Newtonsche Gravitationsgesetz, das Fernwirkungen annahm, bis durch Einsteins geniale Gedanken die Nahewirkungstheorie wieder Eingang in die Physik fand. Diese Lehre der Geschichte läßt ihn die Hoffnung hegen, daß durch Reform einiger Begriffe, die der reinen Erfahrung entstammen, wie etwa des Begriffes des Massenpunktes, eine Rehabilitierung des Kausalgesetzes möglich sei. Die Quantenphysik sei zwar das zur Zeit beste Verfahren zur Beschreibung der

Vorträge: *Die Kausalität in der Natur*, in: *Wege zur physikalischen Erkenntnis*, S. 233 bis 259 und: *Determinismus oder Indeterminismus?* Leipzig 1938.

⁵⁹⁾ In dem zweiten eben angegebenen Vortrag.

⁶⁰⁾ Zu den Erörterungen über Kausalität: *Naturw.* 20 (1932), 915 bis 916. — *Ueber Heisenbergs Ungenauigkeitsbeziehungen und ihre erkenntnistheoretische Bedeutung*: *Naturw.* 28 (1934), 439—441.

Atomwelt, es sei jedoch ein anderes Verfahren zu erwarten, das den Kausalsatz wieder zu Ehren bringt.

Diese Lösungen des Kausalitätsproblems kranken beide an dem Fehler, daß sie den Kausalsatz als unbegründetes und unbeweisbares Postulat betrachten. Auf dieser Basis läßt sich die Gültigkeit dieses Satzes in der heutigen Quantenphysik nicht retten. Die moderne Naturwissenschaft bringt den Beweis, daß sie ohne Kausalsatz auskommt (wenigstens in der Form der Voraussagbarkeit, wie ihn auch Planck und v. Laue fassen) und daß sie ohne ihn ein geschlossenes wissenschaftliches Gebäude erstellen kann. Wenn die Quantenphysik auch noch manche Änderungen erfahren wird, so wird es doch grundsätzlich unmöglich bleiben, die für eine streng kausale Beschreibung notwendigen Feststellungen und Messungen zu machen. In dieser Hinsicht ist keine Vervollkommnung der Theorie zu erwarten, weil in der Existenz des Planckschen Wirkungsquantums dafür eine unüberschreitbare Grenze gezogen ist.

In Plancks Überlegungen geht zudem noch der Grundfehler ein, daß er einen absoluten Determinismus als Grundlage für jede wissenschaftliche Untersuchung postuliert. Auch Willensbetätigungen, die zum Gegenstand wissenschaftlicher Forschung gemacht werden, müßten als determiniert vorausgesetzt werden.

2. Vom Standpunkt der kritischen Philosophie.

Die Polemik der Physik richtet sich vor allem gegen die Kantische Philosophie, deren apriorische Formen der Anschauung durch die Relativitätstheorie und deren apriorische Kategorie der Kausalität durch die Quantenphysik endgültig widerlegt seien. Es ist deshalb selbstverständlich, daß fast alle Versuche, die von philosophischer Seite zur Rettung der Kausalität gemacht wurden, von Vertretern dieser Philosophie stammen. Auf zwei bedeutende Versuche dieser Art wollen wir hier näher eingehen.

H. Bergmann⁶¹⁾ sieht mit Kant in der Kausalität und dem Kausalsatz eine transzendente Voraussetzung der wissenschaftlichen Erfahrung, durch die Erfahrung überhaupt erst möglich wird. Die Wissenschaft hat als Ziel eine Deutung der Wirklichkeit, nicht eine positivistische Beschreibung oder ein-

⁶¹⁾ *Der Kampf um das Kausalgesetz in der jüngsten Physik.* Braunschweig 1929.

fach abbildende Wiedergabe der Natur. Diese Deutung erfolgt auf Grund von Voraussetzungen, die selbst nicht der Empirie entstammen. Sie sind das Werkzeug der wissenschaftlichen Erkenntnis und nicht Behauptungen, die wahr oder falsch sein könnten. Diese transzendentalen Voraussetzungen jeder Erfahrung sind von Kant zusammengestellt und haben unbestreitbar unabänderlichen Wert. Die Kategorie der Kausalität hat dabei zwei Funktionen zu erfüllen, die Bestimmung der raumzeitlichen Stellung der Naturereignisse und die Vorhersage der Zukunft. Jede naturwissenschaftliche Erkenntnis setzt notwendigerweise eine Kausalität voraus, mit deren Hilfe wir eine gewisse Ordnung innerhalb der Erscheinungen herstellen, um uns in ihnen zu orientieren. Der physikalischen Forschung ist es gänzlich unmöglich, die Ungültigkeit einer solchen Kausalität zu erweisen. Das einzige, was die Physik beisteuern könnte zur Philosophie, wäre, daß sie den Nachweis erbringt, der bisherige Begriff der Kausalität müsse aufgelockert werden, so daß der strenge Determinismus zu ersetzen wäre „durch einen begrenzten Determinismus der Wahrscheinlichkeit“⁶²⁾. Diese Auflockerung hält Bergmann für zulässig und notwendig auf Grund der Quantenphysik. Die zwei Funktionen, die der Kausalität zuzuschreiben sind, werden auch von einem derartig aufgelockerten Begriff der Kausalität erfüllt. Auch wenn nur Wahrscheinlichkeitszusammenhänge bestehen und somit Ursache und Wirkung nicht eindeutig einander zugeordnet sind, bleibt es dennoch möglich, auf Grund dieses gesetzmäßigen Zusammenhanges die zeitliche Ordnung der Ereignisse zu bestimmen. Zwar ist bei diesen statistischen Durchschnittsgesetzen nicht mehr möglich, Einzelereignisse zeitlich zu ordnen, aber die Ordnung des Durchschnitts der Ereignisse hält Bergmann für genügend, um die Kausalitätsforderung zu erfüllen. In gleicher Weise bleibt die Möglichkeit der Voraussage, nicht zwar für das elementare Einzelereignis, wohl aber für den Durchschnitt der Ereignisse. Als transzendente Bedingung der Erfahrung wäre also zu formulieren, daß sich die Natur den Gesetzen des Zufalls, die in der Wahrscheinlichkeitsrechnung ihren Ausdruck finden, fügt. In dieser Forderung sieht Bergmann einen Fortschritt gegenüber der Forderung einer strengen Notwendigkeit, weil diese Forderung anspruchsloser ist; aber die Kausalitäts-

⁶²⁾ a. a. O. S. 27.

forderung bleibt, wenn auch in einer gelockerten Form, erhalten⁶³).

Aus der Bergmannschen Lösung des Problems folgt also, daß für das Einzelgeschehen keine Kausalität besteht. Mithin müßte zugestanden werden, daß die moderne Physik wirklich die Ungültigkeit des Kausalsatzes nachgewiesen hat. Der Kausalsatz besagt nämlich nicht, daß die Kausalität irgendwie eine Ordnung der Ereignisse ermöglichen soll, sondern daß die Ereignisse in der Wirklichkeit kausal bestimmt sind. Eine Schematisierung und Ordnung der Natur ist auch möglich ohne Kausalitätsforderung, das zeigt ohne Zweifel die moderne Physik. Dem Gedankengang Bergmanns entsprechend müßte gesagt werden, daß der richtig verstandene Kausalsatz wirklich aufzugeben ist. Er muß selber eingestehen, daß in seiner Auffassung auf den Satz vom zureichenden Grund für das Geschehen verzichtet werden muß. In diesem Verzicht sieht er zwar nur die Preisgabe einer starken Denkgewohnheit, doch mit diesem Verzicht ist sein Versuch zum Scheitern verurteilt. Könnte nicht auch der Kausalsatz, wie ihn Bergmann versteht, nur eine Denkgewohnheit sein, auf die man mit derselben Leichtigkeit verzichten könnte wie auf den Satz vom hinreichenden Grunde? Gegenüber dem Bergmannschen Versuch besteht der Vorwurf zu Recht, den so oft die Physiker gegen ähnliche Unternehmungen erheben, es gehe nämlich den Philosophen nur darum, auf jeden Fall Kant zu retten.

Außerdem scheint uns der Wahrscheinlichkeitsbegriff, mit dem Bergmann operiert, nicht richtig zu sein⁶⁴).

Ein weiterer beachtlicher Versuch dieser Art stammt von

⁶³) Das Resultat seiner Untersuchungen faßt Bergmann folgendermaßen zusammen: „Hat nun die neue Wendung in der Physik die Ungültigkeit des Kausalgesetzes dargetan? Sie konnte es nicht. Denn die Frage des Kausalgesetzes kann nicht in der Physik entschieden werden. Sie konnte zeigen, daß das Kausalgesetz für Teile der Physik unanwendbar, leer sei, und daß die Physik mit einer anderen, weniger anspruchsvollen Forderung ihr Auslangen finde — mehr zu zeigen vermag die Physik nicht. Wohl aber hat sie den erkenntnistheoretischen Charakter aufs neue ins Licht gebracht — und darin liegt die große Bedeutung der neuen Wendung in der Physik für die Philosophie. Sie bringt aufs neue uns zum Bewußtsein, daß das Kausalgesetz den Charakter eines Postulats trägt, und nicht mehr — eine Erkenntnis, die nicht neu ist, die aber im allzu vertrauensseligen Glauben an die mechanische Physik leicht verloren ging.“ a. a. O. S. 72.

⁶⁴) a. a. O. S. 54.

G. Hermann⁶⁵). Diese Arbeiten sind um so bedeutsamer, als die Verfasserin sich gut bewandert zeigt in den modernen physikalischen Theorien. Erfahrung geht nach ihr über Wahrnehmung hinaus, insofern Erfahrung die Daten der Wahrnehmung auf Grund eines theoretischen Ansatzes interpretiert. Dabei werden die Begriffe von Substanz und Kausalität sowie die Anschauungen von Raum und Zeit vorausgesetzt. Was speziell die Kausalität betrifft, so glaubt Hermann, daß die Erfahrung solange als unabgeschlossen zu gelten hat, bis für ein Ereignis die hinreichenden Gründe gefunden sind. Sie sucht nun nachzuweisen, daß auch die Quantenphysik imstande ist, alle Ursachen der Ereignisse anzugeben. Nach dem nämlich das Ereignis eingetreten ist, wird es, wie von uns bereits dargelegt, kausal erklärt. Das bedeute aber auch eine mittelbare Voraussagbarkeit. Das sei das einzig mögliche Kriterium dafür, daß eine Theorie die Erscheinungen richtig wiedergibt, „daß sich aus ihr Voraussagen ableiten lassen, deren Eintreffen durch Beobachtungen kontrolliert werden kann“⁶⁶). Diese Kontrolle ist gegeben, wenn nach dem Eintreffen die Ursachen angegeben werden können und gesagt werden kann, daß gerade die beobachtete Messung sich ergeben mußte. Daß eine unmittelbare Voraussage nicht möglich ist und daß vor der Messung nur mehr oder weniger weitreichende Wahrscheinlichkeitsaussagen gemacht werden können, liegt daran, daß die Ursachen erst durch die Messung bekannt werden, weil der Beobachtungsvorgang selber in die Beobachtung eingeht. Hermann lehnt es schroff ab, den Sachverhalt zu erklären, indem man sagt, die Erkenntnis der Ursachen sei beschränkt, das Vorliegen determinierender Ursachen sei jedoch nicht zu bezweifeln. Nach diesen Überlegungen zwingt die Quantenphysik zu einer scharfen Unterscheidung zwischen dem Kausalsatz selbst, der besagt, daß in der Natur die Geschehnisse durch vorhergehende mit Notwendigkeit determiniert seien, und dem Kriterium dieses Satzes, das die Möglichkeit einer Voraussage der Ereignisse ausspricht.

⁶⁵) *Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik*: Abhandlungen der Friesschen Schule. Neue Folge VI, 2. Ein Auszug dieser Arbeit in *Naturw.* 23 (1935), 718—721. Vgl. ferner: *Ueber die Grundlagen physikalischer Aussagen in den älteren und den modernen Theorien*. Abhandlungen der Friesschen Schule. Neue Folge, VI, 3/4.

⁶⁶) *Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik*, S. 80.

Der Kausalsatz selbst wird durch die neue Physik nicht ange-
tastet, die Voraussagbarkeit jedoch erleide eine Einschränkung,
indem nicht mehr direkte Voraussagen möglich seien, sondern
nur noch mittelbare.

Das Verdienst des geschilderten Versuches liegt darin, daß
der Nachweis erbracht wird, daß auch die moderne Physik in
Wirklichkeit den Kausalsatz nicht preisgibt, wenn sie das auch
noch so sehr behauptet, und daß klar geschieden wird zwischen
Kausalität und Voraussagbarkeit. Dadurch erscheint die ge-
genwärtige Krise der Kausalität nicht so tragisch, wie es auf
den ersten Blick den Anschein haben möchte und wie es oft
genug proklamiert wird. Daß aber der Kausalsatz notwendig
gelten muß, wird in keiner Weise einsichtig gemacht. Er hat
auch in den Überlegungen Hermanns nur den Charakter eines
Postulates. Daß aber ein derartiges Postulat nicht durch Er-
fahrungen und Beobachtungen als überflüssig erwiesen werden
könnte, wird dadurch bewiesen, daß die Erfahrung als unab-
geschlossen gelten muß, bis dem Kausalsatz Genüge getan ist.
Dieses Verfahren sieht einem Zirkelschluß zum mindesten sehr
ähnlich. Es wird höchstens bewiesen, daß es unserem Denken
schwer wird, vom Kausalsatz abzusehen. Auch können wir
nicht zugeben, daß die Voraussagbarkeit im dargelegten Sinn
das unbedingt notwendige Kriterium der Kausalität ist. Wir
halten es für durchaus möglich, daß zwar die Naturgescheh-
nisse vollständig determiniert sein könnten, ohne daß die Mög-
lichkeit bestände, diese Determiniertheit auch physikalisch durch
Voraussagen bestätigen zu können. Die von Hermann vertretene
Forderung bedeutet nach unseren Darlegungen eine Konzession
an das positivistische Denken. Der Kausalsatz ist nicht nur
ein methodologisches Prinzip naturwissenschaftlicher For-
schung, sondern auch eine Aussage über die Wirklichkeit. Wenn
eine Feststellung der von dieser Aussage betroffenen Wirklich-
keitsverhältnisse durch Beobachtung auch prinzipiell unmöglich
wäre, dann hieße das noch lange nicht, den Kausalsatz in den
Bereich der Mystik verweisen, wie Hermann emphatisch be-
hauptet⁶⁷⁾.

§ 4. Die Geltung des Kausalgesetzes.

Die Diskussion der quantenphysikalischen Ergebnisse hat
gezeigt, daß kausale Abhängigkeiten im Gebiet der Mikrophysik

⁶⁷⁾ a. a. O. S. 80 f.

nicht beobachtbar sind und daß, weil der Zustand eines mikro-physikalischen Systems niemals genau festzustellen ist, auch die Möglichkeit der Voraussage folgender Zustände nicht mehr gegeben ist. Ob aber in Wirklichkeit dennoch Kausalität herrscht und ob der Kausalsatz seine Geltung trotzdem behält, kann von der Physik nicht entschieden werden. Um die moderne Situation des Kausalitätsproblems ganz zu verstehen und zu würdigen, ist es unerlässlich, klar den Sinn von Kausalität und Kausalgesetz herauszustellen. Diese Klarheit wird bei den vielen Erörterungen über die heutige Krise der Kausalität nur zu sehr vermißt.

Der Kausalsatz oder das Kausalgesetz, das in der klassischen Physik als unantastbare Grundlage der Forschung galt, besagt, daß in der Natur nichts geschieht ohne Ursache, von der das Geschehen mit Notwendigkeit hervorgebracht wird. Der Satz beinhaltet ein Doppeltes: 1. Jedes Geschehen hat eine bewirkende Ursache; es kann also nichts geschehen, ohne daß etwas anderes vorausgesetzt würde, von dem dieses Geschehen in seinem Dasein abhängt. Es genügt dazu nicht eine bloße zeitliche Folge des Nacheinander, sondern die Ursache übt auf das Geschehen einen Einfluß aus, der der Grund ist für das Dasein des Geschehens. Zwischen bewirkender Ursache und hervorgebrachter Wirkung besteht ein Zusammenhang oder Kausalnexus derart, daß die Wirkung in ihrem Dasein abhängt von der Ursache. Die Formulierung: „Jede Wirkung hat eine Ursache“ wäre natürlich nur eine Tautologie, weil der Begriff der Wirkung bereits die Abhängigkeit von der bewirkenden Ursache explizite enthält. Die Formulierung muß also lauten: „Jedes Geschehen hat eine Ursache“. 2. Dieser Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung ist notwendig dergestalt, daß die Ursache, sofern alle Bedingungen erfüllt sind, nicht die Wirkung nicht hervorbringen kann. Die Wirkung ist also durch die Ursache vollkommen bestimmt, determiniert. Eine vorliegende Ursache kann keine andere und keine größere oder kleinere Wirkung hervorbringen, als sie in Wirklichkeit hervorbringt. Daraus folgt, daß gleiche Ursachen nur gleiche Wirkungen und vor allem, daß vollkommen gleiche Wirkungen nur gleiche Ursachen haben können. — Diesen für die Naturforschung grundlegenden Satz, daß die Ursachen in der Natur mit Notwendigkeit wirken, nennen wir Kausalsatz oder Kausalgesetz. Anders ausgedrückt besagt dieser Satz, daß in der Natur Determinismus herrscht, d. h. das Geschehen in

der Natur ist mit strenger Notwendigkeit bestimmt durch die der Natur immanenten Ursachen. Demzufolge müßte der heute so oft wiederholten Behauptung, in der Natur gebe es nur Indeterminismus, der Sinn gegeben werden, das Geschehen in der Natur erfolge nicht mit Notwendigkeit.

Wir haben bereits gesehen, daß die moderne Physik den Satz meist in einer anderen Fassung versteht, die eigentlich eine Folgerung aus dem Kausalgesetz darstellt, nämlich in der Form, die die Voraussagbarkeit des Naturgeschehens betrifft. Wenn der Ablauf des Geschehens in der Natur mit genau bestimmter Notwendigkeit erfolgt, gestattet die exakte Kenntnis der Ursachen und der Gesetzmäßigkeiten des Geschehens, die Wirkung vorauszusagen. Ist demnach der augenblickliche Zustand eines materiellen Systems vollkommen bekannt, so läßt sich die Zukunft berechnen. In dieser Form fand der Kausalsatz seinen klassischen Ausdruck in dem sogenannten Laplaceschen Dämon. Laplace hat nämlich einen fingierten Weltgeist angenommen, dem alle Zustandsgrößen der gesamten Welt in einem bestimmten Augenblick bekannt seien, der dazu alle in der Natur wirkenden Kräfte kenne und zudem imstande wäre, die passenden Differentialgleichungen anzusetzen und zu lösen. Ein solcher Geist könnte jeden weiteren Zustand der Welt für jeden Zeitpunkt vorausberechnen und angeben⁶⁸⁾. Diese Voraussagbarkeit ist eine einfache Folgerung aus dem Kausalsatz selbst, die

⁶⁸⁾ „Wir müssen also den gegenwärtigen Zustand des Weltalls als die Wirkung seines früheren und als die Ursache des folgenden Zustandes betrachten. Eine Intelligenz, welche für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lag der sie zusammensetzenden Elemente kennte, und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Größen der Analysis zu unterwerfen, würde in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms umschließen; nichts würde ihr ungewiß sein und Zukunft wie Vergangenheit würden ihr offen vor Augen liegen. Der menschliche Geist bietet in der Vollendung, die er der Astronomie zu geben verstand, ein schwaches Abbild dieser Intelligenz dar . . . Alle diese Bemühungen beim Aufsuchen der Wahrheit wirken dahin, ihn unablässig jener Intelligenz näher zu bringen, von der wir uns eben einen Begriff gemacht haben, der er aber immer unendlich ferne bleiben wird.“ Laplace, *Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit*. (Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 233), S. 1f. — Neuberger (*Das neue Weltbild der Physik*, S. 50 Anm.) weist darauf hin, daß der Gedanke sich bereits bei Leibniz ausgesprochen findet.

notwendig auch wahr sein muß, wenn der Kausalsatz gilt. Es ist also ein Kriterium für die Geltung des Kausalsatzes und bietet die Möglichkeit einer Kontrolle.

Die Möglichkeit exakter Voraussagen ist nun aber durch die Existenz der Unbestimmtheitsrelationen weitgehend eingeschränkt. Diese Einschränkung beruht indes, wie die früheren Überlegungen zeigten, auf der Unmöglichkeit, den Zustand eines materiellen Systems im atomaren Bereich genau zu kennen. Wäre es möglich, den Zustand exakt zu kennen, dann bliebe auch die Möglichkeit, Voraussagen zu machen. Dieses Unkenntnis des Zustandes beruht hinwiederum auf unserer Art und Weise der Beobachtung, an die wir gebunden sind. Menschlicher Beobachtung und Messung wird es niemals möglich sein, genauere Beobachtungen zu machen, als die Unbestimmtheitsrelationen es gestatten. Es wäre aber zuviel behauptet, wollte man sagen, keinem Geist wäre eine genauere Kenntnis eines atomaren Systems möglich, weil es einen definierten Zustand nicht gibt⁶⁹⁾. Es wäre doch ein Wesen denkbar, das auf eine andere Art und Weise von der Welt Kenntnis nimmt, als wir durch unsere Beobachtung es tun. Jedenfalls ist Gott dazu imstande und er kann das zukünftige Geschehen auch in seinen Ursachen, aus denen es erfolgt und in denen es bereits determiniert enthalten ist, erkennen.

Der Kausalsatz oder das Kausalgesetz, wie wir es nannten, ist wohl zu unterscheiden vom allgemeinen metaphysischen Kausalitätsprinzip⁷⁰⁾. Nach diesem Prinzip fordert jedes kontingente Sein und Geschehen eine bewirkende Ursache. Ein ursachloses Geschehen ist danach unmöglich. Ein kontingentes Sein kann den zureichenden Grund seiner Existenz nicht in sich selbst haben, sondern setzt ein anderes voraus, von dem sein Dasein stammt. Dieser Satz wird von den physikalischen Forschungen überhaupt nicht berührt. Das Prinzip findet Anwendung auf alles kontingente Sein, auch auf die freien Entschlüsse vernunftbegabter Geschöpfe, nicht nur auf das Geschehen, das Gegenstand der physikalischen Forschung ist und

⁶⁹⁾ So behauptete Heisenberg in einer Vorlesung im WS 1936/37.

⁷⁰⁾ Es kommt natürlich auf die Bezeichnung im einzelnen nicht an. Der Klarheit halber behalten wir jedoch die angegebenen Ausdrücke bei: Kausalitätsprinzip für den allgemeinen metaphysischen Satz, und Kausalsatz oder -gesetz für den in den Naturwissenschaften grundlegenden, oben erörterten Satz.

notwendige Zusammenhänge aufweist. Es besagt das metaphysisch notwendige Verhältnis, daß jedes kontingente Sein und Geschehen eine Ursache hat, während das Kausalgesetz behauptet, daß das Naturgeschehen mit physischer Notwendigkeit von den Naturdingen hervorgebracht wird.

Den Nachweis für die Gültigkeit des Kausalgesetzes zu erbringen, liegt außerhalb der Aufgabe unseres Themas, das lediglich eine Klärung der heutigen Problemlage des Kausalgesetzes versuchen will, die sich aus der modernen Quantenphysik ergeben hat. Der Beweisgang aber, der die Gültigkeit des Kausalgesetzes dartun soll, wird durch die moderne Physik nicht erschüttert, da nach unseren Ausführungen die Schwierigkeiten gegen die Kausalität nur die Feststellbarkeit der kausalen Verhältnisse im konkreten Fall betreffen. Für den Beweis des Gesetzes sei darum auf die vielen philosophischen Darlegungen verwiesen, die sich mit diesem Beweise befassen⁷¹⁾. Hier genüge ein kurzer Hinweis darauf, wie die Notwendigkeit im Naturgeschehen sich darstellt. Wäre das anorganische Geschehen nicht determiniert, d. h. erfolgte es nicht mit strenger Notwendigkeit, dann müßte den anorganischen Ursachen Freiheit zugestanden werden. Wenn nämlich nicht bereits die Ursache den Grund für ein eindeutig determiniertes Geschehen enthielte, dann müßten die Dinge sich selber entscheiden können, welche der offenen Möglichkeiten sie wählen. In der leblosen Natur zeigt sich nun keine Spur von Spontaneität oder gar freier Selbstbestimmung. Wahlfreiheit setzt zudem geistiges Erkennen als notwendige Bedingung voraus, die in der anorganischen Welt in keiner Weise erfüllt ist. Wenn demnach im Anorganischen alle Bedingungen für das Wirken der Kräfte gegeben sind, muß die Ursache zwangsläufig ihre Wirkung hervorbringen. Das Geschehen ist von strenger Determiniertheit beherrscht. Das gilt auch für das atomare Gebiet. Wenngleich die kausalen Abhängigkeiten grundsätzlich nicht beobachtbar sind in dieser Region, muß ihr Vorhandensein dennoch gefordert werden wegen des Fehlens jeder Freiheit im Handeln. Das Kausalgesetz ist nicht ein Naturgesetz, das durch Erfahrung oder Induktion zu beweisen oder zu widerlegen wäre. Es gilt unabhängig von der Naturforschung, der es jedoch als Prinzip zugrunde liegt. Zwar geht auch in den Beweis für das Kausalgesetz Erfahrung

⁷¹⁾ Man vgl. etwa Brunner, *Die Grundfragen der Philosophie*, S. 73—75. de Vries, *Denken und Sein*, S. 247—249.

ein, jedoch nicht eine Einzelerfahrung oder auch eine durch Induktion gewonnene Gesetzmäßigkeit im Gebiet der Erfahrung, sondern die Aussage und Erkenntnis, daß das Naturgeschehen nicht mit Freiheit erfolgt. Dieser Behauptung, die sich schließlich auf Erfahrung gründet und die Erfahrungswelt betrifft, kommt indes ein höherer Gewißheitsgrad zu als einer reinen Erfahrungstatsache; ihr liegt die fundamentale Auffassung von der leblosen Welt überhaupt zugrunde, die auf der gesamten Erfahrung über die anorganische Natur beruht. Es muß demnach als sicher angenommen werden, daß das Naturgeschehen mit kausal determinierter Notwendigkeit abläuft, daß also im Gebiet der anorganischen Natur, auf die wir uns beschränken, strenger Determinismus herrscht. Dieser Satz ist nicht ein unbeweisbares „Postulat des Denkens und der wissenschaftlichen Überzeugung, d. h. des — Glaubens“⁷²⁾, sondern er ist als sicher geltend nachweisbar. Ihn leugnen hieße der anorganischen Natur Freiheit zusprechen.

Eine Einschränkung muß noch bezüglich der Form: „Gleiche Ursachen haben gleiche Wirkungen“ gemacht werden. Es wäre denkbar, daß eine Partikel in der gleichen Situation sich anders verhielte wie eine andere derselben Art. Das widerspräche zwar den Voraussetzungen der Naturforschung, die ihrer Methode gemäß die Elementarteilchen als vertauschbar und unbeschränkt vertretbar betrachtet, ohne den Partikeln individuelle Eigenheiten zuzubilligen. Wenn die erwähnte denkbare Möglichkeit eintreten sollte, dann würde sie zwar beweisen, daß Elementarpartikeln individuell verschieden strukturiert sein könnten, nicht aber daß sie bei ihrem Handeln irgendwie indetermiert wären. Bisher gibt es keine Anzeichen, die eine solche Auffassung nahelegten. Wenn ein entsprechendes Zeichen sich fände, dann hätte das für die Naturwissenschaft die fatale Konsequenz, daß ihre Methode für das atomare Gebiet überhaupt nicht mehr brauchbar wäre. Die Individualität wäre im Anorganischen stärker ausgeprägt, als man bislang annahm.

Ein Überblick über unsere bisherigen Überlegungen ergibt folgendes Resultat: 1. Die Ergebnisse der modernen Atomphysik lassen das Kausalitätsprinzip vollkommen unangetastet. Die Gottesbeweise, die auf dieses Prinzip sich gründen, sind demnach auch in keiner Weise erschüttert, wie das bisweilen aus-

⁷²⁾ So faßt ihn Neuberger (*Das neue Weltbild der Physik*, S. 97) auf.

gesprochen wurde. 2. Das Kausalgesetz behält seine volle Gültigkeit und kann überhaupt nicht durch naturwissenschaftliche Ergebnisse ins Wanken gebracht werden. 3. Es bleibt an sich auch die Möglichkeit der Voraussage auf Grund des beherrschenden Determinismus bestehen, nur ist menschlicher Erkenntnis der Weg dazu versperrt wegen der Unmöglichkeit einer genauen Kenntnis des gegenwärtigen Zustandes. Die Arbeit des Laplaceschen Dämons wird niemals ein Mensch leisten können, weil in dem Satz: „Wenn die Gegenwart bekannt ist, läßt sich die Zukunft berechnen“ die Bedingung für den Menschen nicht realisierbar ist⁷³⁾. 4. Die Naturwissenschaft jedoch muß im atomaren Gebiet auf eine direkte Anwendbarkeit und Kontrollierbarkeit des Kausalsatzes verzichten, und dadurch verliert der Satz natürlich an Bedeutung für die Physik.

Damit wäre die eigentliche Untersuchung abgeschlossen. Es sollen nur noch einige Probleme von weltanschaulicher Relevanz kurz gestreift werden, die mit der neuen oder doch wenigstens für neu gehaltenen Situation des Kausalitätsproblems in Verbindung gebracht worden sind.

§ 5. Ausblick auf einige angrenzende Gebiete.

1. **Physik und Philosophie.** Die Behandlung des Kausalitätsproblems hat einen Zusammenhang aufgezeigt zwischen Physik und Philosophie. Es ist dabei klar geworden, daß die philosophische Erkenntnis einer strengen Determiniertheit des materiellen Geschehens keiner Korrektur durch die physikalische Wissenschaft fähig ist. Der Kausalsatz ist in seiner Geltung von der Physik durchaus unabhängig. So gibt es manche die Natur und die Naturwissenschaft betreffende philosophische Sätze, die unabhängig von jeder Naturwissenschaft gesichert sind und die Grundlage der Naturwissenschaft bilden.

Andererseits hat die Philosophie die weitere Aufgabe, die Physik selbst zum Gegenstand philosophischer Besinnung zu machen, und zwar sowohl das Naturerkennen, wie es in der Physik sich zeigt, wie auch die Ergebnisse dieses Erkennens. Sie

⁷³⁾ Wenn Heisenberg sagt: „Aber an der scharfen Formulierung des Kausalgesetzes: ‚Wenn wir die Gegenwart genau kennen, können wir die Zukunft berechnen‘, ist nicht der Nachsatz, sondern die Voraussetzung falsch“ (Zeitschr. für Physik 43 (1927), 197), dann ist das zum mindesten schief ausgedrückt. Der Bedingungssatz für sich allein kann nicht falsch sein, er kann höchstens eine nicht zu verwirklichende Bedingung enthalten.

kommt auf diese Weise zum Ausbau einer speziellen Naturerkenntnistheorie und einer Metaphysik der Natur. Diese Arbeit muß natürlich auf der Naturwissenschaft und ihren Ergebnissen aufbauen. Bei der heutigen Einstellung der Naturwissenschaftler fällt ihr auch noch die Aufgabe zu, die Aussagen der Physik kritisch zu prüfen und von positivistischen Beimengungen zu befreien.

2. **Physik und Biologie.** Eine Ausweitung der modernen physikalischen Gedanken und Ergebnisse auf das Gebiet der Biologie hat unter dem Vorantritt von Bohr vor allem Jordan⁷⁴⁾ unternommen. Er glaubt eine Annäherung des physikalischen und biologischen Standpunktes gegeben durch die Preisgabe des strengen Determinismus in der leblosen Natur. Die unberechenbaren Geschehnisse des Organischen würden durch die Unberechenbarkeit in der Mikrophysik in ein neues Licht gerückt. Wie in der Physik die Beobachtung den Vorgang selbst störend beeinflusse, so auch in der Biologie. Eine Zurückführung der beiden Gebiete, des Anorganischen und Organischen aufeinander, werde dadurch ermöglicht. Abgesehen von der falschen Deutung der anorganischen Kausalitätsverhältnisse wird bei dieser Diskussion die Sonderstellung des Lebendigen übersehen und in keiner Weise geklärt. Die Notwendigkeit eines vitalen Prinzips kommt überhaupt nicht in das Blickfeld des mit physikalischen Mitteln arbeitenden Forschers, sondern bedarf zur Erklärung ganz anderer Überlegungen.

3. **Quantenphysik und Freiheit.** Früher, als strenger Determinismus Grunddogma der Naturwissenschaften war, hat man von diesem Standpunkt der geschlossenen Naturkausalität aus die Freiheit des Willens als unmöglich und das Freiheitsbewußsein als Täuschung bezeichnet. Heute dagegen zieht man quantenphysikalische Ergebnisse heran, um die Freiheit verständlich zu machen⁷⁵⁾. Es wird ja doch dem materiellen Elementarteilchen, das nicht mehr als determiniert betrachtet wird, eine gewisse Freiheit zugeschrieben, zwischen verschiedenen Möglichkeiten zu wählen⁷⁶⁾. In der Physik führe die Un-

⁷⁴⁾ *Die Quantenmechanik und die Grundprobleme der Biologie und Psychologie*: Naturw. 20 (1932), 815—821.

⁷⁵⁾ Vgl. Bohr, *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, S. 76.

⁷⁶⁾ „Der Korpuskel steht es also in gewissem Sinne ‚frei‘, sich hier oder dort in diesem oder jenem Wert ihrer Energie zu offenbaren“. de Broglie, *Licht und Materie*, S. 214. — Jordan (*Die*

bestimmtheit im Atomaren zu streng gültigen Durchschnittsaussagen im Makroskopischen, die den Eindruck von kausal bestimmten Gesetzen machen. In der organischen Natur bleibe jedoch auch im Makroskopischen Akausalität, d. h. nur die Möglichkeit von Wahrscheinlichkeitsaussagen, und das nenne man die Freiheit des Willens⁷⁷).

Mit dem Nachweis, daß in Wirklichkeit auch im Mikrokosmos strenge Kausalität herrscht, fällt diese Argumentation in sich zusammen. Es handelt sich bei materiellen Wesen, und Wesen, die einer freien Entscheidung fähig sind, um zwei wesentlich verschiedene Welten, deren Unterschied bei solchen Überlegungen völlig verkannt wird. Keine Erfahrungen der Physik können die Verhältnisse des freien Willens irgendwie erklären.

4. **Quantenstatistik und Wundermöglichkeit.** Nicht anders steht es mit der Behauptung, auf Grund der statistischen Betrachtungen der Quantenphysik sei das Wunder möglich geworden⁷⁸). Falls es sich nämlich nur um statistische Gesetze handelt, wäre ein Abweichen vom Gesetz im Einzelfall ja nicht unmöglich, sondern nur unwahrscheinlich zu nennen, als Ausnahmefall also schon einmal möglich. Doch damit wäre es kein Wunder mehr. Wunder sind nämlich Ereignisse in der sichtbaren Welt, die außerhalb der natürlichen Kausalzusammenhänge stehen und durch das Eingreifen einer überweltlichen Ursache hervorgebracht sind⁷⁹). Derartige Wunder waren auch bei der Annahme streng dynamischer Gesetze genau so möglich wie bei statistischen Gesetzen. Die Erkennbarkeit des Wunders wird jedoch etwas schwieriger, wenn es sich um Ausnahmen von statistischen Gesetzen handelt, bleibt

Physik des 20. Jahrhunderts, S. 113) spricht von einer Entscheidung, vor die z. B. ein Lichtquant gestellt werde; da es keinen definierten Ort habe, müsse es sich, wenn durch Beobachtung eine genaue Ortsmessung erzwungen werde, für einen bestimmten Ort entscheiden.

⁷⁷) S. Jordan, *Naturw.* 20 (1932), 819 f. Außerdem Bavink, *Die Naturwissenschaft auf dem Wege zur Religion*, S. 64 ff.

⁷⁸) „Das Wunder ist naturgesetzlich möglich geworden“. Bergmann, *Der Kampf um das Kausalgesetz in der jüngsten Physik*. S. 58.

⁷⁹) Die Auffassung, die Neuberg (*Das neue Weltbild der Physik*, S. 125 ff.) vertritt, wonach Wunder in einem natürlichen Kausalzusammenhang stehen, der nur durch eine höhere Ursache gleichsam in Dienst genommen wird, trifft für ein Wunder im strengen Sinn nicht zu.

aber dennoch möglich, da auch statistischen Gesetzen eine Variationsbreite zukommt, die durch natürliche Ursachen nicht überschritten werden kann⁸⁰⁾.

5. **M o d e r n e P h y s i k u n d R e l i g i o n.** In seiner bekannten temperamentvollen Weise hat B a v i n k aus der neuen Physik auch für die Religion Kapital zu schlagen gesucht⁸¹⁾. Nach dem Zusammenbruch des mechanistischen Weltbildes, mit dem nur ein Deismus vereinbar wäre, führe die moderne Physik zu einer Gottesauffassung, die dem Pauluswort entspreche: „In ihm leben, weben und sind wir“, einem lebendigen und wirkenden Gott, der allein ein wahrer Gott sei. B a v i n k s Anschauung führt zu einem Panentheismus, der, wie er behauptet, von den meisten christlichen Dogmatikern akzeptiert werde. Jedes Wirkungsquant in der Welt gehe jeweils ganz unmittelbar aus Gott hervor und Physik treiben heiße weiter nichts, als Gott seine elementaren Wirkungsakte nachzählen.

Es ist klar, daß die von B a v i n k proklamierte Religion nichts gemein hat mit der katholischen Religion und Gottesauffassung; es gibt keinen katholischen Dogmatiker — und die machen einen Großteil der christlichen Dogmatiker aus —, der diesen Religionsbegriff akzeptierte. Es besteht eine strenge Geschiedenheit zwischen Gott und Welt, die von B a v i n k notwendig verwischt werden muß. Die Wirkungen in der Welt sind nicht unmittelbar Gottes Akte. Die Welt läßt auf Grund des Kausalitäts p r i n z i p s einen Schluß auf das Dasein und die Eigenschaften Gottes zu, ohne daß aber dadurch Gott irgendwie mit der Welt identifiziert werden könnte. Und dieser Weg von der Welt zu Gott ist unter Voraussetzung jeder Physik gleich gangbar. Es mag indes sein, daß die neue Physik einen tieferen Blick in das Werk Gottes zu tun gestattet.

Einen anderen Vorteil für die Religion, der ihr aus der positivistischen Physik erwächst, glaubt J o r d a n aufdecken zu können⁸²⁾. Er unterscheidet zwischen Erlebnissen, die auf sinnlicher Erfahrung beruhen und die allein wissenschaftlichen Wert besitzen, und anderen Erlebnissen, die mit der Wissenschaft nichts zu tun haben, die aber doch etwas „ausdrücken“.

⁸⁰⁾ Vgl. G a t t e r e r, *Das Problem des statistischen Naturgesetzes*, S. 67 f., ferner K a f k a, *Naturgesetz, Freiheit und Wunder*.

⁸¹⁾ *Die Naturwissenschaft auf dem Wege zur Religion*. Frankfurt (M) 1933.

⁸²⁾ *Die Physik des 20. Jahrhunderts*, S. 127—137.

Auf diese Weise wird den religiösen Erlebnissen ihre Sonderstellung garantiert und dadurch Religion und Wissenschaft vollständig voneinander gelöst. Natürlich gibt es keinen Weg von der Wissenschaft zur Religion.

Auch diese Religionsauffassung ist nicht haltbar. Die Gründe, die gegen Bavink vorgebracht werden, gelten zum Teil auch hier.

Der Theologe A. Neuberger⁸³⁾ betont vor allem, daß kein Widerspruch bestehe zwischen Glauben und Wissen. Es handele sich um verschiedene Gebiete, die nicht in Widerspruch geraten können. Allerdings führt auch kein Weg geradlinig zur Glaubensbegründung und zum Beweis für das Dasein Gottes, der Glaube bedeutet einen Sprung ins Metaphysische. Andererseits weckt die Betrachtung der Natur, auch die wissenschaftliche, erhebende Gedanken, die oft dem nahekommen, „was unseres Glaubens ist“⁸⁴⁾.

Auch von Neuberger sind die Beziehungen zwischen Religion und Wissenschaft nicht richtig gesehen. Die Religion ist durchaus einer rationalen Begründung fähig und keineswegs eine bloße Angelegenheit erhebender Gefühle und Gedanken. Gewiß, die Wahrheiten des Glaubens werden auf die Autorität Gottes hin angenommen, aber der Weg zu diesem Glauben führt doch durch das hell erleuchtete Gebiet einer wissenschaftlichen natürlichen Gotteslehre.

Auf Grund der modernen Physik wurden Befürchtungen geäußert, die Gottesbeweise seien ins Wanken geraten. Es wurden Hoffnungen laut, die Erklärungsmöglichkeiten sahen für andere tiefe Probleme der Philosophie. Beide, die Hoffnungen wie die Befürchtungen, entbehren jeder Grundlage.

Literatur.

- Bavink, B., Ergebnisse und Probleme der Naturwissenschaften. Eine Einführung in die heutige Naturphilosophie. 5. Aufl. Leipzig 1933.
 Bavink, B., Die Naturwissenschaft auf dem Wege zur Religion. Frankfurt a. Main 1933.
 Bergmann, H., Der Kampf um das Kausalgesetz in der jüngsten Physik. Slg. Vieweg. Heft 98. Braunschweig 1929.
 Bohr, N., Ueber den Bau der Atome. 2. Aufl. Berlin 1924.

⁸³⁾ *Das neue Weltbild der Physik*, S. 99—131.

⁸⁴⁾ a. a. O. S. 112.

- Bohr, N., Atomtheorie und Naturbeschreibung. Vier Aufsätze mit einer einleitenden Übersicht. Berlin 1931.
- Born, M., Probleme der Atomdynamik. Berlin 1926.
- Born, M., Quantenmechanik und Statistik: Naturw. 15 (1927), 238—242.
- Born, M., Über den Sinn der physikalischen Theorien: Naturw. 17 (1929), 109—118.
- de Broglie, L., Untersuchungen zur Quantentheorie. Leipzig 1927.
- de Broglie, L., Licht und Materie. Ergebnisse der neuen Physik. Hamburg 1939.
- Brunner, A., Die Grundfragen der Philosophie. Ein systematischer Aufbau. Freiburg 1933.
- Comte, A., Abhandlung über den Geist des Positivismus. Philosophische Bibliothek, Bd. 155. Leipzig 1915.
- Conrad-Martius, H., Physik und Metaphysik: Hochland 37 (1939/40), 231—243.
- Darrow, K. K., Elementare Einführung in die Wellenmechanik. Leipzig 1929.
- Gatterer, A., Das Problem des statistischen Naturgesetzes. Philosophie und Grenzwissenschaften I, 1. Innsbruck 1924.
- Haas, A., Materiewellen und Quantenmechanik. Eine Einführung auf Grund der Theorien von de Broglie, Schrödinger, Heisenberg und Dirac. 4. und 5. Aufl. Leipzig 1934.
- Heisenberg, W., Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie. Leipzig 1930.
- Heisenberg, W., Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik: Zeitschr. für Physik 43 (1927), 172—198.
- Heisenberg, W., Quantenmechanik: Naturw. 14 (1926), 989—994.
- Heisenberg, W., Die Entwicklung der Quantentheorie 1918—1928: Naturw. 17 (1929), 490—496.
- Hermann, G., Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik. Abhandlungen der Friesschen Schule. Neue Folge VI, 2. Berlin 1935.
- Hermann, G., Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik (Auszug): Naturw. 23 (1935), 718—721.
- Hermann, G., Über die Grundlagen physikalischer Aussagen in den älteren und den modernen Theorien. Abhandlung der Friesschen Schule. Neue Folge. VI, 3/4. Berlin 1937.
- Jordan, P., Physikalisches Denken in der neuen Zeit. Hamburg 1935.
- Jordan, P., Anschauliche Quantentheorie. Eine Einführung in die moderne Auffassung der Quantenerscheinungen. Berlin 1936.
- Jordan, P., Die Physik des 20. Jahrhunderts. Einführung in den Gedankeninhalt der modernen Physik. Sg. „Die Wissenschaft“, Bd. 88. Braunschweig 1936.
- Jordan, P., Kausalität und Statistik in der modernen Physik. (Habilitationvortrag): Naturw. 15 (1927), 105—110.
- Jordan, P., Der Charakter der Quantenphysik: Naturw. 16 (1928), 765—772.

- Jordan, P., Die Erfahrungsgrundlagen der Quantentheorie: Naturw. 17 (1929), 498—507.
- Jordan, P., Die Quantenmechanik und die Grundprobleme der Biologie und Psychologie: Naturw. 20 (1932), 815—821.
- Kafka, G., Naturgesetz, Freiheit und Wunder. Paderborn 1940.
- Laplace, P. S., Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit. Herausgegeben von R. v. Mises. (Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Bd. 233). Leipzig 1932.
- v. Laue, M., Zu den Erörterungen über Kausalität: Naturw. 20 (1932), 915—916.
- v. Laue, M., Über Heisenbergs Ungenauigkeitsbeziehungen und ihre erkenntnistheoretische Bedeutung: Naturw. 22 (1934), 439—441.
- Mach, E., Die Mechanik in ihrer Entwicklung. 8. Aufl. herausgegeben von J. Petzoldt. Leipzig 1921.
- Mach, E., Populär-wissenschaftliche Vorlesungen. 3. Aufl. Leipzig 1903. Naturwissenschaft und Metaphysik. Abhandlungen zum Gedächtnis des 100. Geburtstages von Franz Brentano. Brünn und Leipzig 1939.
- Neuberg, A., Das naturwissenschaftliche Weltbild der Gegenwart. 1. Teil: Das neue Weltbild der Physik. Göttingen 1939.
- Planck, M., Wege zur physikalischen Erkenntnis. Reden und Vorträge. Leipzig 1933.
- Planck, M., Determinismus oder Indeterminismus? Leipzig 1938.
- Reiche, F., Die Quantentheorie. Ihr Ursprung und ihre Entwicklung. Berlin 1921.
- Schlick, M., Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik: Naturw. 19 (1931), 145—162.
- Schrödinger, E., Abhandlungen zur Wellenmechanik. Leipzig 1927.
- Schrödinger, E., Vier Vorlesungen über Wellenmechanik. Berlin 1928.
- Schrödinger, E., Aus der Antrittsrede des neu in die Akademie eingetretenen Herrn Schrödinger: Naturw., 17 (1929), 732.
- Schrödinger, E., Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik: Naturw. 23 (1935), 807—812, 823—828, 844—849.
- Sommerfeld, A., Atombau und Spektrallinien. 3. Aufl. Braunschweig 1922.
- Sommerfeld, A., Atombau und Spektrallinien. Wellenmechanischer Ergänzungsband. Braunschweig 1929.
- de Vries, J., Denken und Sein. Ein Aufbau der Erkenntnistheorie. Freiburg 1937.
- v. Weizsäcker, K. F., Ortsbestimmung eines Elektrons durch ein Mikroskop: Zeitschr. für Physik 70 (1931), 114—130.
- Wenzl, A., Metaphysik der Physik von heute. Sfg. Wissenschaft und Zeitgeist 2. Leipzig 1935.