

herausgearbeitet worden, ihre logische aber hat auch dieser größte Gegenspieler Hegels liegen gelassen.

Ein Nachdenken über den Sinn und die Einseitigkeit des Hegelschen Religionsbegriffes zeigt aber darüber hinaus, daß seine Religionsphilosophie uns überhaupt ein Desiderat umfassender Art hinterlassen hat, das nämlich nach einer ausgearbeiteten Identitätslehre, welche Hegel mit seinem Identitätssystem gerade nicht geleistet hat. Doch hat er ihre Notwendigkeit eindringlich zum Bewußtsein gebracht. Eine solche hätte, wie man sieht, in einer ausgearbeiteten Theorie der Philosophie der Religion eine zentrale Stelle, und von ihr aus würde auch die Auseinandersetzung sowohl mit dem wichtigsten Gedanken des 19. Jahrhunderts über die Religion wie mit dem existenziellen Denken der Gegenwart, welches sich wesentlich von Kierkegaardschen Impulsen nährt, über eine bloße äußere Polemik hinauszuführen sein. Gerade im Bereiche der Religionsphilosophie ist vielleicht der alte aristotelische Satz noch lange nicht ausgiebig genug bedacht worden: τὸ δὲν πολλαχῶς λέγεται.

Zur philosophischen Deutung des quantenmechanischen Indeterminismus

Von Wolfgang Büchel S. J.

Die philosophische Diskussion des quantenphysikalischen Indeterminismus geht oft von der Voraussetzung aus, daß es sich dabei vor allem um eine Störung des zu messenden Objekts durch den Meßprozeß handle¹. Daß diese Formulierung unzureichend ist, hat u. a.

¹ So z. B. noch jüngst Nicolai Hartmann, Philosophie der Natur, Berlin 1950, 372. Die 374 f. angestellten Betrachtungen über statistische Gesetzmäßigkeit treffen in Strenge nur die klassische, nicht die quantenmechanische Statistik. Bei dieser ist es gerade die Frage, ob die statistische Gesetzmäßigkeit nicht durch die gleiche „Motivationslage“ für eine in sich freie Einzelentscheidung hervorgerufen wird. Ebenso kann die „Unfaßbarkeit des Gesamtsachenkomplexes im Atomaren“ nicht als Tatsache vorausgesetzt werden; denn es ist wieder gerade die Frage, ob die Quantenphysik alle vorliegenden Ursachen erfaßt oder nicht. — Ein Entsprechendes gilt für die Überlegungen, mit denen Max Hartmann die Kausalität als Voraussetzung der Quantenphysik aufweisen will. Er schreibt (Die philosophischen Grundlagen der Naturwissenschaften, Jena 1948, 204 f.): „Auch die reine Statistik und Wahrscheinlichkeit setzt ihrerseits wieder eine ihr zugrunde liegende Kausalgesetzlichkeit voraus. . . . Bei einem chaotischen Zustand der Weltwirklichkeit, bei einem freien, willkürlichen Handeln der Elementarteilchen wäre eben überhaupt keine Ordnung, keine Gesetzmäßigkeit möglich, auch keine statistische, wahrscheinlichkeitstheoretische.“ — In diesem letzten Satz ist entscheidend die Verkoppelung von Freiheit mit Willkür und Chaos. Bei einem willkürlichen Handeln der Elementarteilchen könnten tatsächlich auch keine statistischen Gesetzmäßigkeiten herrschen; bei einem freien Handeln, das aber von gesetzmäßigen Motivationen beeinflusst würde, dagegen wohl.

Reichenbach gezeigt². Durch den bloßen Hinweis auf den Störungscharakter der Messung kann also das Auftreten der grundsätzlichen Nicht-Vorausbestimmbarkeit in der Quantenphysik nicht erklärt werden.

Andererseits ist es unzulässiger Positivismus, ohne weiteres aus der erkenntnismäßigen Unbestimmbarkeit auf seismäßige Unbestimmtheit zu schließen oder die Frage nach einer empirisch nicht feststellbaren seismäßigen Determiniertheit als sinnlos zu erklären³.

Es wurden jedoch von v. Neumann und von Heisenberg Überlegungen angestellt, die unabhängig von dieser positivistischen Grundvoraussetzung die Annahme einer seismäßigen Determiniertheit als unvereinbar mit den Ergebnissen der Quantenphysik nachweisen sollen. Sie wurden in der philosophischen Diskussion bisher weniger beachtet und seien im folgenden kurz besprochen. Außerdem sei ein in die entgegengesetzte Richtung gehender Versuch von Henry-Hermann betrachtet, der strenge Kausalität sogar als Voraussetzung der Quantenphysik nachweisen will.

Es wird sich zeigen, daß von der Physik her die Entscheidung zwischen Kausalität oder Freiheit weder in dem einen noch in dem anderen Sinn gefällt werden kann, *daß aber die positive Behauptung einer ‚Freiheit‘ der Elementarteilchen mit den gleichen Schwierigkeiten zu kämpfen hat, die man gewöhnlich der deterministischen Auffassung allein zuschiebt.*

1. Die Unmöglichkeit „verborgener Parameter“ nach v. Neumann⁴

Zum Verständnis der v. Neumannschen Überlegungen ist kurz vorzuschicken, in welcher Weise die Quantenphysik ein physikalisches System (Elementarteilchen, Atom, Molekül usw.) charakterisiert. Sie ordnet einem solchen System eine sogenannte *Zustandsfunktion* zu. Diese Zustandsfunktion (in der allgemeinverständlichen Darstellung meist als *Wahrscheinlichkeitswelle* oder ähnlich bezeichnet) ist jedoch — wenigstens von der Quantenphysik her — nicht aufgefaßt als Abbild des wirklichen Zustands des Systems, sondern lediglich als mathematisches Hilfsmittel, um die Ergebnisse von zukünftigen Messungen, die an dem betreffenden System vorgenommen werden, mit Wahrscheinlichkeit vorauszusagen. Zu diesem Zweck ist jeder physikalischen meßbaren Größe (Ort, Geschwindigkeit, Energie usw.) eine

² H. Reichenbach, *Philosophische Grundlagen der Quantenmechanik*, Basel 1949, 25 ff.

³ Z. B. Reichenbach a. a. O. 11 ff.

⁴ J. v. Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin 1932, 160—173.

mathematische Operation zugeordnet, die man mit der Zustandsfunktion vornehmen muß, um zu erfahren, welche Resultate sich bei einer Messung der betreffenden Größe ergeben können, und wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, ein bestimmtes dieser möglichen Meßresultate zu erhalten.

Die Zustandsfunktion kann nun von der Art sein, daß sie für eine bestimmte physikalische Größe, etwa die Geschwindigkeit, nur einen einzigen möglichen Meßwert ergibt. Das bedeutet, daß eine Messung mit Gewißheit diesen Wert liefern wird. Es ist dies z. B. immer der Fall unmittelbar nach der Vornahme einer Messung der betreffenden Größe. Denn wenn ich etwa die Geschwindigkeit eines Teilchens messe und diese Messung sofort anschließend wiederhole, dann muß ich ja bei dieser zweiten Messung mit Gewißheit den gleichen Meßwert erhalten (innerhalb der Fehlergrenzen), wenn anders der Meßprozeß überhaupt einen Sinn haben soll.

Wenn so die Zustandsfunktion für eine bestimmte Größe nur einen einzigen möglichen Meßwert ergibt, existiert immer eine zweite Größe, in unserem Fall der Ort des Teilchens, für die nach der Zustandsfunktion mehrere verschiedene Meßwerte möglich sind. Eine anschließende Ortsmessung wird dann einen dieser Werte tatsächlich liefern.

Dies entspricht genau dem wirklichen Verhalten von atomaren Systemen. Es seien etwa 100 Elektronen gegeben von der Art, daß eine Messung ihrer Geschwindigkeit stets den gleichen Wert ergibt. Diesem Wert der Geschwindigkeit entspricht eine bestimmte Zustandsfunktion der Elektronen, die für eine anschließende Ortsmessung verschiedene mögliche Meßwerte mit verschiedener relativer Wahrscheinlichkeit vorhersagt. Stelle ich nun bei *jedem* Elektron *seinen* Ort fest, so erhalte ich einen dieser möglichen Meßwerte, und die durchschnittliche Häufigkeit der verschiedenen tatsächlich gemessenen Werte entspricht ganz der vorhergesagten Wahrscheinlichkeit.

Gewöhnlich drückt man dies so aus: Wenn die Geschwindigkeit des Teilchens bestimmt ist, ist der Ort unbestimmt. Ebenso gilt das Umgekehrte: Ist der Ort genau bestimmt, so ist die Geschwindigkeit unbestimmt. Entsprechendes gilt für alle „kanonisch konjugierten“ Größen.

Im allgemeinen wird jedoch weder der Ort noch die Geschwindigkeit ganz genau bestimmt sein, sondern bei beiden eine gewisse Unbestimmtheit, also Streuung der möglichen Meßwerte, vorliegen. Dann ist das Produkt des Betrags der beiden Streubereiche von der Größenordnung des Planckschen Wirkungsquantums (Heisenbergsche Unschärfebeziehung).

Diese Unbestimmtheit des Ortes bei genau bestimmter Geschwindigkeit (und entsprechend umgekehrt) stellt das dar, was gewöhnlich als

Indeterminismus der Quantenphysik bezeichnet wird. In der Tat würde daraus ein seinsmäßiger Indeterminismus folgen, wenn die Charakterisierung eines atomaren Systems durch seine Zustandsfunktion adaequat wäre, d. h. wenn Systeme mit der gleichen Zustandsfunktion sich auch seinsmäßig in keiner Weise (von der Individualität abgesehen) voneinander unterscheiden.

Man wird daher zur Wahrung des Determinismus fragen, ob wirklich die Charakterisierung durch die Zustandsfunktion adäquat ist. Könnten nicht die einzelnen Teilchen, die durch die gleiche Zustandsfunktion charakterisiert werden, sich doch noch durch verschiedene unbekannte Bestimmungsstücke, „verborgene Parameter“, voneinander unterscheiden? Und könnte es nicht von diesen verborgenen Parametern abhängen, welchen der verschiedenen möglichen Meßwerte eine anschließende Messung tatsächlich liefert?

Nun gibt es gewiß in der heutigen Quantenphysik keinen Anhaltspunkt, der auf die Existenz solcher verborgener Parameter hinwiese. Aber damit ist natürlich die Frage noch nicht entschieden. v. Neumann will deshalb darüber hinaus zeigen, daß die Annahme verborgener Parameter mit empirisch erhärteten Gesetzmäßigkeiten der Quantenphysik in Widerspruch stehe.

Ein derartiger Beweis müßte, um vollgültig zu sein, natürlich alle überhaupt denkbaren Arten von Parametern berücksichtigen. v. Neumann betrachtet jedoch nur die folgende Fragestellung⁵: Gegeben sei eine Gesamtheit von Elementarteilchen, etwa 100 Elektronen, von denen die Quantenphysik behauptet, daß sie alle durch die gleiche Zustandsfunktion zu charakterisieren sind. Ist es denkbar, daß in Wirklichkeit die verschiedenen Elektronen durch verschiedene Zustandsfunktionen zu charakterisieren wären, wobei die Unterscheidung dieser Zustandsfunktionen durch die verborgenen Parameter erfolgte? Und könnte dann durch die Kenntnis dieser Parameter der Indeterminismus der Quantenphysik behoben werden?

Auf diese Frage kann Neumann mit einem eindeutigen Nein antworten. Aber damit ist das wesentliche Problem der verborgenen Parameter noch nicht entschieden. Denn es geht ja gerade darum, ob die Elektronen vielleicht überhaupt nicht durch quantenphysikalische Zustandsfunktionen, sondern in irgendeiner anderen Weise zu charakterisieren und voneinander zu unterscheiden sind. Diese letztere Möglichkeit erscheint v. Neumann so abseitig, daß er sie überhaupt nicht in Betracht zieht.

Diese Beurteilung der v. Neumannschen Überlegungen stimmt überein mit der Kritik, die Reichenbach — in diesem Punkt gewiß zuständig und unverdächtig — daran übt⁶. Er skizziert die Hypo-

⁵ Vgl. hierzu besonders a. a. O. 141 Mitte. ⁶ A. a. O. 25 Anm.

these der verborgenen Parameter in dem Sinn, wie wir sie eingangs entwickelten, und erklärt ausdrücklich, daß eine solche Möglichkeit durch rein logische Überlegungen nicht ausgeschlossen werden könne, auch nicht durch die Überlegungen v. Neumanns. Speziell zu diesen sagt er: Der Beweis „zeigt nur, daß die Annahme von verborgenen Parametern nicht mit einer allgemeinen Gültigkeit der Quantenmechanik vereinbar ist“. Hier ist unter der „Allgemeingültigkeit der Quantenmechanik“ nicht etwa ihre Gültigkeit in dem Bereich verstanden, in dem sie sich erfahrungsgemäß bewährt hat, sondern es ist damit die Voraussetzung gemeint, daß ein atomares Gebilde grundsätzlich nur durch eine quantenphysikalische Zustandsfunktion und in keiner anderen Weise charakterisiert werden könne; „wenn“ aber, bemerkt Reichenbach, „der Indeterminismus der Quantenphysik kritisiert wird, dann wird diese Annahme gleichfalls in Frage gestellt“.

2. Die Unmöglichkeit verborgener Parameter nach Heisenberg und die ‚Freiheit‘ der Elementarteilchen

Tiefer als die v. Neumannschen Gedanken dringen in den Kern des Problems die Betrachtungen Heisenbergs über den „Schnitt“ zwischen einem zu messenden Objekt und dem Meßinstrument ein⁷. Heisenberg untersucht den Vorgang der Messung eines atomphysikalischen Objekts durch ein Meßinstrument und fragt, wo hier der quantenphysikalische Indeterminismus zur Geltung komme. Die Beschreibung eines solchen Meßvorganges setzt sich aus der Beschreibung des zu messenden Objekts und der des Meßinstrumentes zusammen. Die Beschreibung des zu messenden Objekts erfolgt durch die quantenphysikalische Zustandsfunktion. Diese Zustandsfunktion kann eindeutig festgelegt werden, und für ihre Veränderung im Laufe der Zeit gelten eindeutige Gesetze. Das Meßinstrument dagegen wird nach Art der klassischen Physik beschrieben, die zeigt, inwiefern der Zeiger des Instruments an der und der Stelle stehen muß, wenn die zu messende Größe den und den Wert hat. In beiden Teilbeschreibungen, jeweils für sich betrachtet, herrscht also ein eindeutiger und notwendiger Zusammenhang; nur daß sich diese Eindeutigkeit und Notwendigkeit in der klassischen Beschreibung des Meßinstrumentes auf das *wirkliche* physikalische Geschehen bezieht, in der quantenphysikalischen Beschreibung des mikrophysikalischen Objekts dagegen auf die Entwicklung der Zustandsfunktion, also der *Wahrscheinlichkeitsverteilung* für die möglichen

⁷ Die ausdrückliche Formulierung: W. Heisenberg, Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft, Stuttgart 1949, 43 ff. — Die zugrunde liegende Gesamtkonzeption: ders., Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie, Leipzig 1944, 42 ff.

Meßwerte. Die Unbestimmtheit kommt an der Stelle in die Gesamtbeschreibung hinein, wo quantenmechanische Beschreibung des Objekts und klassische des Meßinstruments aneinanderstoßen. Dort muß sich entscheiden, welchen Wert (aus allen gemäß der Zustandsfunktion möglichen) die zu messende Größe tatsächlich hat; dieser Wert wird dann durch das Meßinstrument in einen Zeigerausschlag übersetzt.

An dieser Stelle des „Schnitts“ zwischen der quantentheoretischen und der klassischen Teilbeschreibung des Gesamtvorganges müßten nun, so sagt Heisenberg, die verborgenen Parameter wirksam sein, sofern sie existierten. Denn sie sollen ja dazu dienen, die noch übrigbleibende Unbestimmtheit zu beseitigen; die Unbestimmtheit tritt aber einzig an der Stelle dieses Schnitts auf. Vor und hinter dem Schnitt läuft alles mit eindeutiger Notwendigkeit ab, so daß für eine zusätzliche Bestimmung überhaupt kein Raum mehr ist.

Wenn nun den unbekanntem Parametern und ihrer physikalischen Auswirkung objektive, von der Systembeschreibung unabhängige Realität zukommen soll, so muß auch die Schnittstelle, an der allein der Einfluß der Parameter sich bemerkbar macht, eine objektive, von Willkür unabhängige Lage haben.

Und das ist nun gerade nicht der Fall! Man kann im Gegenteil die Lage der Schnittstelle verschieben, ohne an dem Naturvorgang selbst das Geringste zu ändern, indem man z. B. auch noch einen Teil des Meßinstruments quantentheoretisch beschreibt und erst den Rest klassisch⁸. Dann ist gleichsam ein Stück des Meßinstruments noch mit zu dem Objekt gerechnet, und der Schnitt ist jetzt in das Meßinstrument hinein verlegt. In dieser zweiten Form der Beschreibung des genau gleichen Naturvorgangs, den die Messung darstellt, müßten daher auch die verborgenen Parameter an der neuen Schnittstelle angesetzt werden; an der früheren ist ja jetzt überhaupt nichts mehr zu bestimmen.

Da nun bei der Annahme verborgener Parameter der Ort des Schnittes objektiv festliegen müßte, während er in Wirklichkeit von der subjektiven Willkür in der Wahl der Beschreibungsweise abhängt, so folgt, daß die Annahme verborgener Parameter sinnlos ist.

Das Gesagte sei erläutert am Beispiel eines Elektrons, dessen Ort festgestellt werden soll⁹. Zu diesem Zweck wird das Elektron mit einem einzigen Lichtquant beleuchtet; das abgebeugte Licht fällt in das Objektiv eines Mikroskops und bildet schließlich das Elektron auf einer photographischen Platte ab. Die Zustandsfunktion des Elektrons sei vor der Messung von der Art, daß der Ort des Elektrons unbestimmt ist.

Man kann nun bei der Beschreibung des Meßvorganges den Heisenbergschen Schnitt in den Augenblick des Zusammenstoßes von Elektron und

⁸ Den mathematischen Beweis bringt z. B. v. Neumann a. a. O. 222 ff.

⁹ Vgl. v. Weizsäcker, Ortsbestimmung eines Elektrons durch ein Mikroskop; Zeitschrift für Physik 70 (1931) Heft 1 u. 2.

Lichtquant verlegen. Dann entscheidet sich in diesem Augenblick, welchen Ort das Elektron wirklich hat; von diesem Punkt aus fällt das abgebeugte Licht in das Objektiv und wird nach den Regeln der klassischen Optik auf den entsprechenden Punkt der Photoplatte geworfen.

Man kann aber auch den Schnitt in den Augenblick des Auftreffens des Lichtquants auf die Photoplatte verlegen und das Verhalten von Elektron und Photon bis zu diesem Augenblick quantenphysikalisch beschreiben. Die Quantenphysik ordnet vor dem Zusammenstoß von Elektron und Photon jedem Teilchen eine eigene Zustandsfunktion zu; nach dem Zusammenstoß jedoch bilden die Teilchen eine Einheit mit einer gemeinsamen Zustandsfunktion, in der das Schicksal beider Teilchen unzertrennlich miteinander verflochten erscheint. Denn diese neue Zustandsfunktion gibt die jeweilige Wahrscheinlichkeit an, das Photon an einer Stelle der Photoplatte und zugleich das Elektron an dem entsprechenden Punkt vor dem Objektiv zu finden. In dem Augenblick des Auftreffens des Photons auf der Platte entscheidet es sich, an welcher Stelle es *wirklich* auftrifft und wo darum auch das Elektron *wirklich* zu finden ist.

Im ersten Fall müßten also die verborgenen Parameter vor dem Objektiv, in der Umgebung des Elektrons wirksam sein; im zweiten Fall hinter dem Objektiv an der Photoplatte.

Die Kernfrage bei der Beurteilung der Heisenbergschen Argumentation ist die, ob die verborgenen Faktoren vielleicht auch schon vor dem willkürlich zu ziehenden Schnitt in dem quantenphysikalisch zu beschreibenden Geschehensbereich angesetzt werden könnten. (Daß sie im Bereich der klassischen Beschreibung ausgeschlossen sind, liegt auf der Hand.) Heisenberg sagt, daß dort kein Platz für sie sei. Man möchte einwenden, gerade die verbleibende Unbestimmtheit zeige, daß Platz sein müsse. Aber eine nähere Untersuchung ergibt, daß hinter dieser Unbestimmtheit doch u. U. mehr stehen muß als ein bloßes erkenntnismäßiges Nicht-Wissen. Wenn z. B. ein Photon auf einen Schirm fällt, in dem sich mehrere Öffnungen befinden, so kann es je nach der Beschaffenheit der Zustandsfunktion des Photons unbestimmt bleiben, durch welche der Öffnungen das Photon hindurchgegangen ist, wenn man es nachher hinter dem Schirm antrifft. Dieses Photon zeigt aber dann auch hinter dem Schirm ein wesentlich anderes Verhalten (Interferenzerscheinungen) als ein Photon, welches durch eine einzige Öffnung hindurchgegangen wäre. Die quantenphysikalische Unbestimmtheit kann hier infolgedessen kaum so gedeutet werden, daß das Photon in Wirklichkeit durch eine bestimmte Öffnung hindurchgegangen sei und wir bloß nicht wüßten, durch welche.

Andererseits gibt es Grenzfälle, in denen hinter der quantenphysikalischen Unbestimmtheit sicher bloß ein erkenntnismäßiges Nicht-Wissen steht. So z. B., wenn man die quantenphysikalische Beschreibung ausdehnt bis zur Ablesung der Zeigerstellung des Meßinstruments durch den Beobachter. Die Quantenphysik gibt dann wieder nur

eine bestimmte Wahrscheinlichkeit dafür, daß der Zeiger auf dieser oder jener Skalenmarke steht und infolgedessen die vom Zeiger zurückgeworfenen Lichtstrahlen auf diese oder jene Netzhautstelle im Auge des Beobachters fallen. Aber in diesem Fall steht der Zeiger in Wirklichkeit bestimmt nur an einer Stelle, und es entscheidet sich nicht erst im Auge des Beobachters, auf welche Netzhautstellen das vom Zeiger reflektierte Licht tatsächlich fällt. Heisenberg selbst erklärt, daß bei einer solchen Ausdehnung der quantenphysikalischen Beschreibungsweise „die Physik verschwunden und nur mehr ein mathematisches Schema geblieben“ sei¹⁰. Er sagt darum auch nur, daß man „innerhalb bestimmter Grenzen“ den Schnitt sinnvollerweise beliebig verlegen könne. Innerhalb dieser Grenzen scheint aber tatsächlich eine nähere Festlegung nicht möglich zu sein. Im Gegenteil: Wenn man auf Grund sachlicher Überlegungen aussagen zu können glaubt, daß der Übergang von der Unbestimmtheit zur Bestimmtheit objektiv an dieser oder jener Stelle liegen müsse, lassen sich meist genau so gewichtige Gründe dafür bringen, daß er an der betreffenden Stelle gar nicht liegen kann.

Dies ist schon so in dem einfachen, oben erwähnten Fall des Durchgangs eines Photons durch Öffnungen in einem Schirm. Unsere obigen Überlegungen hatten zu dem Resultat geführt, daß der Unbestimmtheit der zum Durchgang benutzten Öffnung irgend etwas Reales entsprechen müsse, etwa ein „Führungsfeld“ oder eine „Führungswelle“; eine solche Welle kann ja tatsächlich durch alle Öffnungen gleichzeitig hindurchgehen, und die quantenphysikalische Zustandsfunktion hat hier auch in wesentlichen Punkten die gleiche mathematische Struktur wie die elektromagnetische Lichtwelle der klassischen Physik. Aber es kann nun auch geschehen, daß das gleiche Photon mit der gleichen Zustandsfunktion nicht durch die Öffnungen durchgeht, sondern irgendwo auf dem Schirm hängen bleibt. Dann müßte sich unsere Führungswelle schlagartig, mit Überlichtgeschwindigkeit auf den Auftreffpunkt des Photons zusammenziehen; denn von dem Augenblick des Auftreffens an gibt es ja keine wirkliche Ortsunbestimmtheit mehr. Ein solches schlagartiges Sich-Zusammenziehen eines Feldes oder einer Welle erscheint aber physikalisch völlig widersinnig. (Gemäß den experimentell nachgewiesenen Kohärenzeigenschaften müßten sich u. U. Wellenzüge von zehn und mehr Metern Breite momentan zusammenziehen.) Daraus folgt, daß es eine derartige Welle nie gegeben hat, daß es vielmehr „in Wirklichkeit“ auch schon vor dem Augenblick des tatsächlichen Auftreffens festgelegt war, zu welchem Punkt das Photon hinfliegen würde. Damit liegt der Widerspruch auf der Hand.

Das Paradoxon läßt sich auch nicht so auflösen, daß man sagt: Das

¹⁰ Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie 44.

Photon, das wirklich hindurchgegangen ist, hat eben auch schon vorher ein breitausgedehntes Führungsfeld gehabt, und das andere, das auf dem Schirm hängen blieb, nicht. Denn man kann die Öffnungen im Schirm verschließen; dann bleibt jedes Photon hängen; und man kann die Zahl der Öffnungen so vermehren, daß praktisch jedes Photon durchgeht. Ein anfliegendes Photon kann aber vor seinem Anlangen am Schirm unmöglich „wissen“, was ihm dort bevorsteht; um also für beide Möglichkeiten gerüstet zu sein, müßte jedes Photon ein Führungsfeld bei sich haben und auch wieder nicht bei sich haben. Und ähnlich liegt der Sachverhalt bei fast allen derartigen Fällen.

Die Konsequenz, die sich aus der geschilderten Sachlage für die *Beschreibung* des Verhaltens des Photons ergibt, liegt auf der Hand: Der ganze fragliche Geschehensbereich muß quantenphysikalisch beschrieben werden; dann können *logische* Widersprüche nicht auftreten. Aber die *sachliche Deutung* bleibt völlig unklar.

Es zeigt sich also, daß der zunächst etwas formal erscheinende Einwand Heisenbergs sich beim Heranziehen sachlicher Überlegungen nicht löst, sondern nur noch vertieft. Aber ein Zweites wird gleichfalls klar: daß er nicht nur die Hypothese der verborgenen Parameter trifft (was Heisenbergs unmittelbare Absicht war), *sondern auch die einer ‚freien Wahlentscheidung‘ der Elementarteilchen in irgendeiner Form*. Denn auch diese ‚freie‘ Entscheidung müßte stattfinden an der Stelle des Schnitts; und da der Schnitt keine objektive Lage hat, kann auch der ‚freien‘ Entscheidung keine objektive Realität zukommen. Wenn also die Überlegungen Heisenbergs überhaupt zutreffen — woran man kaum zweifeln kann —, dann erweist die Physik selbst alle Spekulationen über eine ‚Freiheit‘ der Elementarteilchen und die daraus gezogenen Folgerungen als hinfällig. Es geht bei dem Problem des statistischen Charakters der Quantenphysik gar nicht um die Frage nach Kausalität oder Freiheit, sondern es geht um das Zusammentreffen zweier strukturverschiedener Beschreibungsweisen der Natur, deren jede einzelne auf ihrem Gebiet sinnvoll ist. Infolgedessen kann das Wesen des quantenphysikalischen Indeterminismus nicht geklärt werden (wenigstens zunächst nicht) durch Untersuchungen über das Verhältnis von Freiheit und Notwendigkeit, sondern nur durch Beantwortung der Frage, was der quantenphysikalischen Zustandsfunktion jeweils objektiv entspricht.

3. Kausalität als Voraussetzung der Quantenphysik nach Henry-Hermann

Heisenberg bemerkt am Schluß seiner Ausführungen, daß die Quantenphysik „die Gründe für das Eintreten eines Ereignisses nachträglich stets vollständig aufzuzählen gestattet, selbst wenn sie eine

Voraussage des zukünftigen Ereignisses nicht möglich macht“. Den hiermit angedeuteten Gedanken hat Grete Henry-Hermann benutzt, um zu zeigen, daß die Quantenphysik die strenge Kausalität nicht nur nicht leugne, sondern sie sogar voraussetze¹¹. Wir werden uns dieser Folgerung zwar nicht anschließen können, wollen aber zunächst, um den Überlegungen Hermanns folgen zu können, das von Heisenberg Gemeinte am Beispiel des Elektrons unter dem Mikroskop verdeutlichen.

Die Quantenphysik beschreibt, wie erwähnt, den Zustand des Elektrons und des Photons nach ihrem Zusammenstoß durch eine Gesamtfunktion, in der der Ort des Elektrons und der Auftreffpunkt des Photons miteinander verkoppelt, aber beide unbestimmt sind. Nach dem Auftreffen des Photons auf der Platte ist diese Unbestimmtheit behoben. Nun ist es physikalisch sinnlos, anzunehmen, daß das Photon nach seinem Auftreffen auf der Platte noch irgendeine „Rückwirkung“ auf das Elektron ausgeübt habe, um dessen vorher unbestimmten Ort festzulegen. Man muß also den ganzen Vorgang wohl dahingehend interpretieren, daß die Entscheidung über den Ort des Elektrons spätestens in dem Augenblick fiel, in dem noch eine Wechselwirkung von Elektron und Photon möglich war, d. h. im Augenblick des Zusammenstoßes der beiden Teilchen. Und dann wird man das Auftreffen des Photons gerade auf dieser Stelle der Platte damit begründen, daß sich das Elektron im Augenblick des Zusammenstoßes an dem entsprechenden Punkt vor dem Objektiv befand.

Wir haben also folgenden Sachverhalt: Vor der Feststellung des Schwärzungspunktes durch den Beobachter konnte die Quantenphysik nicht voraussagen, welche Stelle der Platte geschwärzt würde; nachher gibt sie genau den Grund dafür an, warum gerade diese Stelle geschwärzt wurde.

Diese nachträgliche Begründung läßt sich experimentell nachprüfen. Denn man kann nach der Ablesung der Platte durch andere Meßmethoden direkt den Ort des Elektrons feststellen, und wenn diese zweite Ortsmessung unmittelbar nach dem Eintreffen des Photons auf der Platte vorgenommen wird, ergibt sie genau das gleiche Resultat wie die Auswertung der Photoplatte.

Genau genommen handelt es sich jedoch bei dieser nachträglichen „kausalen“ Begründung nicht eigentlich um eine Aussage der Quantenphysik selbst, sondern schon um eine sachliche Interpretation. Denn die quantenphysikalische Zustandsfunktion für das System Elek-

¹¹ G. Hermann, Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik, Abhandlungen der Friesschen Schule, Bd. VI, Heft 2, 69—152, gekürzt in: Die Naturwissenschaften 23 (1935) 718 ff.; Hermann-May-Vogel, Die Bedeutung der modernen Physik für die Theorie der Erkenntnis, Leipzig 1937, 8—14, 124 f.; Henry-Hermann, Die Kausalität in der Physik: Studium generale 1 (1947/1948) 375—383.

tron + Photon behauptet nur den *konditionalen* Zusammenhang: Wenn das Photon an dieser Stelle auftrifft, so findet eine unmittelbar anschließende direkte Ortsmessung des Elektrons dieses an dem zugehörigen Punkt vor dem Objektiv (und umgekehrt). Wie dieser konditionale Zusammenhang sachlich zu interpretieren ist, bleibt von der Quantenphysik her offen¹².

Hermann stützt sich nun auf die angegebene Interpretation, um die Lage des Kausalitätsproblems in der Quantenphysik wie folgt zu kennzeichnen: Auch die Quantenphysik gibt für vorher nicht vorauszubestimmende Ereignisse nachträglich die kausale Begründung an. Die Kausalität, der Zusammenhang von Ursache und Wirkung, wird also gar nicht bestritten. Nur das Kriterium für das Vorliegen der Kausalität ist ein anderes geworden. Das Vorliegen der Kausalität kann nicht mehr wie in der klassischen Physik durch die Vorausbestimmung der Wirkung aus der Ursache nachgewiesen werden. Wohl aber lassen sich aus der vorausgesetzten kausalen Verknüpfung nachträglich Folgerungen ziehen und diese experimentell bestätigen (die direkte Ortsmessung des Elektrons).

Man wird zunächst wieder anmerken müssen, daß, streng genommen, nur die konditionale Verknüpfung durch die daraus gezogenen Folgerungen bestätigt wird. Aus der konditionalen wird eine kausale Verknüpfung nur dadurch, daß eine Rückwirkung des Photons von der Platte her auf das Elektron als ausgeschlossen vorausgesetzt wird.

Darüber hinaus erhebt sich jedoch folgendes gewichtigere Bedenken: Wenn die Behauptung von der Voraussetzung der Kausalität durch die Quantenphysik objektiv-sachliche Gültigkeit haben soll, so bedeutet dies doch, daß in der objektiven Wirklichkeit der Schwärzungspunkt auf der Platte durch das Geschehen beim Zusammenstoß Elektron-Photon festgelegt ist. Die Unbestimmtheit des Schwärzungspunktes in der quantenphysikalischen Beschreibung würde also in diesem Fall nur ein erkenntnismäßiges Nicht-Wissen ausdrücken. Gerade

¹² Auf die hier auftretenden Fragen wurde in allgemeiner Form zum ersten Male von Einstein hingewiesen mit der Tendenz, die quantenphysikalische Unbestimmtheit als Ausdruck eines bloßen Nicht-Wissens nachzuweisen (Einstein-Podolsky-Rosen: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?: The Physical Review 47 [1935] 777 ff.). Bohr gab eine Erwiderung (a. a. O. 48 [1936] 696 ff. unter dem gleichen Titel), von der Reichenbach (a. a. O. 188 f.) zeigen will, daß sie unausgesprochen die Einsteinschen Folgerungen voraussetzt. Schrödinger entwickelte bei dieser Gelegenheit ausführlich seine Zweifel an der Endgültigkeit der heutigen Fassung der Quantenmechanik (Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik: Die Naturwissenschaften 23 [1935] 807 ff., 823 ff. und 844 ff.). Reichenbach (a. a. O.) löst das Problem durch die Einführung einer Logik mit den drei Wahrheitswerten Wahr, Falsch, Unbestimmt. Eine solche Logik ist nützlich, wenn es sich darum handelt, aus quantenphysikalischen Vorhersagen weitere Folgerungen zu ziehen; für die eigentliche naturphilosophische Deutung wird jedoch das Problem nur neu formuliert.

diese Folgerung aber lehnt Hermann ab mit dem richtigen Hinweis, daß man damit all den Erscheinungen nicht mehr gerecht werde, die als experimentelle Anzeichen für die Wellennatur der Elementarteilchen angeführt werden. Tatsächlich träten hier genau die gleichen Paradoxien auf, die uns oben bei der Betrachtung des Durchgangs eines Photons durch einen Schirm mit Öffnungen begegneten.

Wie soll es aber dann zu verstehen sein, daß beide Beschreibungsweisen, die vorgängige mit ihrer Unbestimmtheit des Schwärzungspunktes und die nachträgliche mit der kausalen Rückführung des Schwärzungspunktes auf den entsprechenden Elektronenort, gleichwertig nebeneinander stehen? Hermann weist zur Erklärung auf den relativen Charakter der quantenphysikalischen Naturbeschreibung hin: Aus der Tatsache des Nebeneinanderbestehens der beiden Beschreibungen folgt, daß die quantenphysikalische Naturbeschreibung „keine endgültige, absolute Charakterisierung des betreffenden Systems sein kann. Sie gilt vielmehr nur relativ zu den Beobachtungen, auf Grund derer sie aufgestellt worden ist, und läßt die Möglichkeit offen, das gleiche System, und zwar für den gleichen Zeitpunkt, relativ zu einem anderen Beobachtungszusammenhang durch eine andere Wellenfunktion zu beschreiben“¹³.

In unserem Beispiel: Der Beobachtungszusammenhang zu Beginn des Versuches war hergestellt durch das, was aus früheren Messungen über das Verhalten des Elektrons und Photons bekannt war; relativ zu diesem Beobachtungszusammenhang galt eine Zustandsfunktion, in der der Ort des Elektrons und der Schwärzungspunkt zwar konditional miteinander verkoppelt, aber beide unbestimmt waren. Der spätere Beobachtungszusammenhang wird hergestellt durch die Feststellung des Schwärzungspunktes: relativ zu diesem Beobachtungszusammenhang gilt jetzt eine Zustandsfunktion, in der Elektron und Photon als voneinander unabhängig und der Ort beider als eindeutig bestimmt erscheinen.

Mit diesem Hinweis Hermanns scheint jedoch das Problem eher gestellt als gelöst. Denn wenn man mit dem kritischen Realismus die Existenz einer objektiven, vom Beobachtungszusammenhang unabhängigen Naturwirklichkeit unterstellt: Was bedeutet dann das Nebeneinander der Beschreibungsweisen für den realen, ontologischen Sachverhalt und Kausalzusammenhang?

Hermann scheint auf diese Frage mit den folgenden Gedanken eine Antwort geben zu wollen: Alle Dinge der Natur stehen in beständiger Wechselwirkung miteinander. Um aber Naturwissenschaft zu treiben, müssen wir notwendig die Dinge aus dieser vielfältigen Verflechtung herauslösen, um sie zunächst einmal in ihrem Für-Sich-Sein zu betrachten. Erst auf der so gewonnenen Grundlage können wir später auch

¹³ Studium generale 1 (1947/1948) 379.

die Wechselbeziehungen zwischen den Dingen studieren. So stellt auch jede Messung eine Herauslösung eines Dinges aus seinem Gesamtzusammenhang dar. Verfolgen wir nun das weitere Schicksal des gemessenen Objektes in seiner Wechselwirkung mit anderen Dingen, so zeigt sich, daß die Isolierung unseres Meßobjektes wieder aufhört, daß es vielmehr mit den anderen Dingen, mit denen es in Wechselwirkung tritt, zu einer Einheit verschmilzt, in der man kein individuelles Einzelschicksal mehr verfolgen kann. In unserem Beispiel haben wir das an der Verkoppelung der Zustandsfunktion für Elektron und Photon gesehen. Greift man bei einer neuen Messung wieder ein einzelnes, isoliertes Objekt heraus, so tritt man damit in einen ganz neuen Beobachtungszusammenhang ein, in dem eben das Teilchen nicht mehr in seiner Verflechtung mit der übrigen Natur, sondern in seiner neugeschaffenen Isolierung erscheint.

Das Nebeneinander der beiden Beschreibungen wäre also so zu verstehen: Die eine (vorgängige, unbestimmte) beschreibt das Teilchen in seiner Verflechtung mit der übrigen Natur; die andere (nachträgliche, bestimmte) sieht das Teilchen auch schon vor der zweiten Messung in der durch diese Messung neugeschaffenen Isolation.

So wichtig dieser Hinweis auf die wesenhafte Verflechtung der materiellen Dinge miteinander ist: zur Lösung unseres Problems scheint er nichts beitragen zu können. Denn die Unbestimmtheit und mit ihr das Nebeneinander der beiden Beschreibungsweisen tritt schon bei einem einzelnen Teilchen auf, an dem etwa die physikalische Größe p und unmittelbar anschließend die Größe q gemessen wird, ohne daß das Teilchen in der Zwischenzeit Gelegenheit zur Wechselwirkung mit irgendwelchen anderen Elementarteilchen hatte. Sind p und q kanonisch konjugiert, dann muß in der Beschreibung, die sich auf die erste Messung (von p) gründet, q unbestimmt sein; in der nachträglichen Beschreibung, die auf der zweiten Messung (von q) gründet, ist dagegen q natürlich bestimmt.

Man wird darauf hinweisen, daß das Teilchen eben mit dem Meßinstrument in Wechselwirkung trete. Aber dies führt nicht weiter. Denn auch wenn man bei der zweiten Messung das Meßinstrument noch quantenphysikalisch beschreibt und so die Wechselwirkung zwischen Teilchen und Meßinstrument rechnerisch verfolgt, kommt man zu dem gleichen Ergebnis. Angenommen, die unbestimmte Größe q habe bei dem Teilchen, bevor es in Wechselwirkung mit dem Meßinstrument tritt, gemäß der Zustandsfunktion des Teilchens mit der Wahrscheinlichkeit w_1 den Wert q_1 , mit der Wahrscheinlichkeit w_2 den Wert q_2 usw. Dann erhält man nach Einsetzen der Wechselwirkung für das Gesamtsystem Teilchen + Meßinstrument eine Zustandsfunktion, die besagt, daß mit der Wahrscheinlichkeit w_1 an dem Teilchen die

Größe q den Wert q_1 hat und gleichzeitig der Zeiger des Meßinstruments in der entsprechenden Stellung Z_1 steht. Das gleiche für q_2 usw. Durch die Wechselwirkung mit dem Meßinstrument tritt also keine neue Unbestimmtheit auf — sonst wäre das Instrument auch nicht als Meßinstrument brauchbar —, sondern es wird nur die an dem Teilchen vorliegende Unbestimmtheit von q mit einer entsprechenden Unbestimmtheit der Zeigerstellung verkoppelt¹⁴.

Die Frage nach der Realbedeutung der quantenphysikalischen Unbestimmtheit kann also nicht durch den Hinweis auf die wesenhafte Verflechtung der materiellen Naturdinge miteinander beantwortet werden, und das Problem des Nebeneinander der beiden Beschreibungsweisen, der vorgängigen unbestimmten und der nachträglichen kausalen, bleibt ungelöst. Dann kann man aber auch kaum behaupten, daß die Quantenphysik die Kausalität voraussetze. Denn diese Behauptung muß sich, wenn anders sie überhaupt real-ontologisch gemeint ist, einseitig auf die nachträgliche kausale Beschreibungsweise stützen; wenn Hermann trotzdem und mit Recht auch die vorgängige unbestimmte Beschreibungsweise nicht als bloßen Ausdruck eines erkenntnismäßigen Nicht-Wissens angesehen haben will, so hebt sie, wie uns scheint, damit ihre eigene Behauptung von der Kausalität als (real-ontologischer) Voraussetzung der Quantenphysik auf.

Zu den Ausführungen Hermanns ist allgemein noch folgendes anzumerken: Sie gelten uneingeschränkt nur für solche Ereignisse, die — wenigstens grundsätzlich — als Zeigereinstellung eines Meßinstruments aufgefaßt werden können. (In unserem Beispiel war der Schwärzungspunkt der „Zeiger“, der den Ort des Elektrons angab.) Bei andersartigen Ereignissen liefert die Quantenphysik zwar u. U. auch noch eine nachträgliche Begründung für ein vorher unbestimmtes Geschehen, aber die empirische Nachprüfung dieser Begründung, die Hermann als Kriterium für das Vorliegen von Kausalität angibt, ist dann meist *nicht* mehr möglich¹⁵.

Als Beispiel sei das Auftreffen eines Photons auf einem Schirm gewählt. Das Atom, von dem das Photon emittiert wird, stehe dem Schirm in einigem Abstand gegenüber. Damit der Auftreffpunkt des Photons auf dem Schirm wirklich unbestimmt ist, muß die Emission des Photons klassisch aufgefaßt werden können als Ausstrahlung einer Welle, die den Schirm auf seiner ganzen Fläche trifft; denn nur dann treten hinter einem Schirm mit Öffnungen die Interferenzerscheinungen auf, die die Annahme des Durchgangs des Photons durch eine bestimmte Öffnung unmöglich machen. Das

¹⁴ Vgl. etwa v. Neumann a. a. O. 233.

¹⁵ Aus diesem Grund erschien das Auftreten solcher nachprüfbarer Verknüpfungszusammenhänge als eine gewisse Paradoxie; vgl. die Literatur in Anm. 12.

hat nach der Quantenphysik zur Voraussetzung, daß der Ort des Atoms hinreichend scharf bestimmt ist¹⁶.

Die Zustandsfunktion, durch die die Quantenphysik das System Atom+Photon nach der Emission beschreibt, beinhaltet nun u. a. folgenden Konditionalzusammenhang: Wenn das Photon auf einem bestimmten Schirmpunkt auftrifft, dann muß das Atom einen Rückstoß erhalten haben, der genau die entgegengesetzte Richtung der Verbindungslinie Atom-Auftreffpunkt hat. Man kann dies so interpretieren, daß eben das Photon von vornherein vom Atom in der Richtung des späteren Auftreffpunktes emittiert wurde und bei dieser Emission das Atom den entsprechenden Rückstoß erhielt; auf diese Weise würde der vorher unbestimmte Auftreffpunkt nachträglich kausal begründet. Aber eine empirische Nachprüfung dieser Begründung ist in diesem Fall *nicht* möglich. Diese müßte erfolgen durch die Messung der Impulsänderung, die das Atom infolge des Rückstoßes erfahren hat. Nun war der Ort des Atoms verhältnismäßig genau festgelegt; infolgedessen ist sein Impuls von vornherein mit einer gewissen Unschärfe behaftet. Die Durchrechnung liefert für die Impulsunschärfe einen solchen Wert, daß sich die Impulsänderungen, die zu den verschiedenen Rückstoßrichtungen und damit zu den verschiedenen Auftreffpunkten gehören, nicht mehr unterscheiden lassen.

Man kann natürlich die ganze Versuchsanordnung so einrichten, daß sich die Impulsänderung hinreichend genau bestimmen läßt. Dann muß der Ort des Atoms entsprechend unbestimmt bleiben, und die Ausstrahlung eines derartigen Atoms muß nach der Quantenphysik aufgefaßt werden als eine Welle, die nur in einer bestimmten Richtung, auf einen bestimmten Schirmpunkt hin ausgestrahlt wird (Nadelstrahlung). Bei einer solchen Strahlung verhält sich aber ein Photon hinter einem Schirm mit Öffnungen genau so, wie es der Annahme des Durchgangs durch nur eine Öffnung entspricht. Die Unkenntnis des Auftreffpunktes stellt also in diesem Fall keine „echte“ quantenphysikalische Unbestimmtheit dar, sondern ein bloßes Nicht-Wissen. Sie könnte behoben werden, indem vor der Feststellung des Auftreffpunktes die Impulsmessungen ausgewertet und daraus der Auftreffpunkt vorausberechnet würde.

Heisenberg hat das angegebene Beispiel diskutiert, um daran zu zeigen, wie im ersten Fall gerade durch die Ununterscheidbarkeit der Impulsänderungen ein innerer, logischer Widerspruch in der Quantenphysik vermieden wird. Denn wären die Impulsänderungen zu unterscheiden, so wäre der Auftreffpunkt auf Grund der Impulsmessungen eindeutig bestimmt, auf Grund des genau bekannten Orts des Atoms dagegen (nach dem oben Gesagten) unbestimmt. Wenn demnach das Versagen des von Hermann angegebenen Kausalitätskriteriums in diesem Fall (und in ähnlichen) nicht zufällig, sondern innerlich notwendig ist, wird man die Behauptung eines allgemeinen, durchgängigen kausalen Zusammenhangs kaum auf ein derartiges Kriterium stützen können. * * *

¹⁶ W. Heisenberg, Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie 65 ff.

Die Auseinandersetzung mit den Gedanken Hermanns hat es erneut deutlich werden lassen, worum es bei dem quantenphysikalischen Indeterminismus eigentlich geht: um die jeweilige Realbedeutung der quantenphysikalischen Zustandsfunktion. Man hat dafür das Begriffspaar von Akt und Potenz¹⁷ herangezogen. Der quantenphysikalischen Unbestimmtheit einer physikalischen Größe p entspräche dann eine gewisse „Potentialität“ dieser Größe, die im Augenblick der Messung von p in die „Aktualität“ von p überginge. Aber dieser Übergang von der Potentialität zur Aktualität müßte genau wie die verborgenen Parameter und die ‚freie Wahlentscheidung‘ an der objektiven Stelle des Heisenbergschen Schnitts angesetzt werden, und so kehren alle dort behandelten Schwierigkeiten wieder. Außerdem wäre dann mit dem Hervortreten der Größe p in die Aktualität immer das Zurückdrängen der zu p kanonisch konjugierten Größe q in die Potentialität verbunden — eine Verkoppelung, die wenigstens in der ursprünglichen begrifflichen Fassung von Akt und Potenz kaum enthalten sein dürfte —. Ein Versuch des Verfassers, auf der Grundlage des Begriffs der „praesentia definitiva“ eine Deutung der Zustandsfunktion zu geben¹⁸, läßt die Schwierigkeiten der Schnitt-Überlegungen auch ungelöst¹⁹.

Läßt sich also einstweilen eine allseitig befriedigende naturphilosophische Interpretation der quantenphysikalischen Zustandsfunktion noch nicht geben, so haben doch unsere Überlegungen eines mit aller Deutlichkeit gezeigt: daß die bestehenden Schwierigkeiten sich in der gleichen Weise gegen die Hypothese einer freien Wahlentscheidung wie gegen die eines durchgehenden Determinismus richten. Eine solche Folgerung ist zum erstenmal ausgesprochen in den Arbeiten von Hermann, dort jedoch abgeleitet aus der These von der Kausalität als Voraussetzung der Quantenphysik; da diese These anfechtbar erscheint, war unsere Absicht, unabhängig davon lediglich durch Auswertung der Heisenbergschen Schnitt-Überlegungen ein entsprechendes Resultat zu gewinnen.

¹⁷ A. Wenzl z. B. in: *Metaphysik der Physik von heute*, Leipzig 1935.

¹⁸ W. Büchel, *Der Materiebegriff der modernen Physik*: PhJb 58 (1948) 55—64.

¹⁹ Das gleiche gilt für die im übrigen sehr beachtlichen Deutungen von H. Pohl, *Der Weltäther*, Innsbruck 1951, und W. Böhm, *Über die Anwendung des Hylemorphismus und der Metamorphosenlehre in der heutigen Naturwissenschaft*: PhJb 61 (1951) 38—48.