

Zur naturphilosophisch-erkenntnistheoretischen Problematik der Quantenphysik

Von Wolfgang Büchel S. J.

In einer früheren Untersuchung¹ wurde herausgestellt, daß es sich bei dem vielerörterten Problem des quantenphysikalischen Indeterminismus in erster Linie nicht um die Frage nach Kausalität oder Freiheit, sondern um die Realbedeutung der quantenphysikalischen Zustandsfunktion („Wahrscheinlichkeitswelle“) handelt. Bei der Diskussion dieses letzteren Problems hat man einerseits vom naturphilosophisch-ontologischen Standpunkt aus den Gedanken eines „Möglichkeitsfeldes“, innerhalb dessen die Elementarteilchen sich jeweils neu „aktualisieren“, vorgeschlagen; andererseits wurde vom erkenntnistheoretischen Standpunkt aus die Gültigkeit der zweiwertigen Logik wie die des kritischen Realismus in Zweifel gezogen. In der Auseinandersetzung mit diesen Auffassungen soll im Vorliegenden eine gewisse Eingrenzung des Problembereichs versucht werden, indem als Grundproblem des ganzen Fragenkomplexes der Analogiecharakter der Erkenntnis der Mikrowelt wahrscheinlich gemacht wird. Wenn infolgedessen eine restlos einsichtige Lösung hier vielleicht ebensowenig möglich erscheint wie etwa bei den aus dem Analogiecharakter der menschlichen Gotteserkenntnis entspringenden Problemen, so sind doch wohl gewisse Abgrenzungen möglich, die z. B. für das Kausalitätsproblem nicht uninteressant sind.

Im Folgenden wird zunächst umschrieben, in welcher Form sich das Problem der Deutung der Zustandsfunktion in der Quantenphysik stellt (I); die Auseinandersetzung mit dem Gedanken des „Möglichkeitsfeldes“ (II) leitet zu der eigentlichen erkenntnistheoretischen Problematik (III) über. Dabei ist es unvermeidlich, etwas genauer auf den physikalischen Sachverhalt einzugehen, als dies gewöhnlich geschieht; denn gerade daraus ergeben sich für die philosophische Diskussion Gesichtspunkte, die oft übersehen werden.

Zu der Diskussion von *Gedankenexperimenten*, auf die wir uns gelegentlich beziehen, eine Vorbemerkung: Die tatsächlich durchgeführten physikalischen Experimente erfordern gewöhnlich einen gewissen Aufwand an technischen Hilfsmitteln, der den eigentlichen Grundgedanken für den Nichtphysiker oft nur mehr schwer erkennbar werden läßt. Verzichtet man auf diese Hilfsmittel, um den Grundgedanken klarer hervortreten zu lassen, so wird das Experiment technisch (d. h. praktisch, nicht grundsätzlich) undurchführbar und kann nur mehr durchgerechnet werden, d. h. es wird zum Gedankenexperiment. Die Diskussion eines solchen Gedankenexperiments ist insoweit beweiskräftig, als die Gültigkeit der zugrundegelegten Theorie voraus-

¹ Schol 27 (1952) 225 ff., bes. 233.

gesetzt werden darf. In unserem Fall handelt es sich um die Quantenmechanik und Quantenelektrodynamik, deren Gültigkeit (innerhalb des in Frage stehenden Bereiches) von den Diskussionspartnern anerkannt wird und sich aus der stets wiederholten Bewährung in den tatsächlich durchgeführten Experimenten ergibt.

I. Physikalische Voraussetzungen

a) Allgemeine Charakterisierung der quantenphysikalischen Naturbeschreibung

Das Problem der quantenphysikalischen Zustandsfunktion ergibt sich aus der grundsätzlichen Eigenart der quantenphysikalischen Naturbeschreibung. Die Quantenphysik beschreibt ein physikalisches Gebilde — Elementarteilchen, Atom, Molekül usw. —, indem sie ihm eine sog. *Zustandsfunktion* zuordnet. Diese Zustandsfunktion (auch als Zustandsvektor, in der allgemeinverständlichen Darstellung meist als Wahrscheinlichkeitswelle oder ähnlich bezeichnet) ist jedoch — wenigstens von der Quantenphysik her — nicht als Abbild des wirklichen Zustandes des betreffenden Objektes aufgefaßt, sondern lediglich als mathematisches Hilfsmittel, um die Ergebnisse von zukünftigen Messungen mit Wahrscheinlichkeit vorauszusagen, als „Erwartungskatalog“ (Schrödinger) der späteren Meßresultate. Zu diesem Zweck ist jeder physikalisch meßbaren Größe (Ort, Impuls, Energie usw.) eine 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.

Das beschriebene Verfahren sei kurz veranschaulicht am Beispiel eines frei, d. h. ohne den Einfluß von irgendwelchen Kräften, durch den Raum fliegenden Elementarteilchens mit der Masse m und der Geschwindigkeit v . Bezeichnet man den Impuls, d. h. das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit des Teilchens mit p und seine Energie mit E , so gilt nach der klassischen Mechanik die Beziehung

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

Ersetzt man in dieser Gleichung E und p durch die mathematischen Operationen, die der Energie- bzw. Impulsmessung gemäß der Quantenphysik zugeordnet sind, so wird aus der obigen Gleichung eine Art Wellengleichung für eine Welle, die sich in dem Raum ausbreitet, in dem sich das Teilchen bewegt, und deren Wellenlänge λ gegeben ist durch $\lambda = h/p$ ($h =$ Plancksches Wirkungsquantum). Daraus ergibt sich weiter, daß die Zustandsfunktion für das Teilchen die Gestalt einer solchen Welle hat.

Fragt man nun nach der Wahrscheinlichkeit, das Teilchen an einem bestimmten Raumpunkt P vorzufinden, so entspricht diese Wahrscheinlichkeit der Amplitude, d. h. der Schwingungsweite der beschriebenen Welle am Punkt P (genauer: dem Quadrat des Betrages der Amplitude): Eine große Amplitude bedeutet eine große Wahrscheinlichkeit, eine kleine eine geringere usw.

Aus dem Gesagten ergibt sich schon, daß es nicht möglich ist, die Zustandsfunktion einfachhin als Abbild des wirklichen Zustands des Teilchens aufzufassen; denn die beschriebene „Wahrscheinlichkeitswelle“ erfüllt *kontinuierlich* den ganzen Raum, das Teilchen dagegen tritt immer nur an einem *einzigem* Raumpunkt auf. —

Läßt man das beschriebene Teilchen gegen einen im übrigen undurchdringlichen Schirm anlaufen, in den in regelmäßigen Abständen Öffnungen eingeschnitten sind, so hat die Zustandsfunktion die Form einer Welle, die durch die Öffnungen im Schirm in den Raum hinter dem Schirm eindringt. Dabei kommt es zu *Interferenzerscheinungen*, womit folgendes gemeint ist: Betrachtet man einen herausgegriffenen Punkt Q in dem Raum hinter dem Schirm, so wird dieser Punkt von Wellenzügen überstrichen, die von all den verschiedenen Öffnungen des Schirms herkommen. Es kann sein, daß alle diese Wellenzüge in Q gerade im gleichen Takt schwingen; dann werden sie sich gegenseitig verstärken, und als Folge davon ist die Wellenbewegung in Q sehr lebhaft, hat in Q eine große Amplitude. Es kann aber auch sein, daß die verschiedenen Wellenzüge sich in Q gegenseitig aufheben, indem ein Wellenberg des einen Wellenzuges auf ein Wellental des anderen trifft; als Folge davon herrscht in Q überhaupt keine Wellenbewegung, die Amplitude der Welle ist dort gleich Null. Außerdem können natürlich noch die Zwischenzustände eintreten. Auf jeden Fall entsteht hinter dem Schirm eine gesetzmäßige Verteilung von Raumpunkten mit großer und von solchen mit kleiner Amplitude; die Art dieser Verteilung hängt im wesentlichen ab von dem Abstand der Schirmöffnungen voneinander und von der Wellenlänge der betreffenden Welle.

Genau das gleiche gilt nun auch für die Zustandsfunktion eines Teilchens, das gegen einen derartigen Schirm anläuft: Es entsteht hinter dem Schirm eine gesetzmäßige Verteilung von Stellen, an denen die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen anzutreffen, groß, und von anderen Stellen, an denen diese Wahrscheinlichkeit gering ist. Läßt man nun viele derartige Teilchen hintereinander (oder auch gleichzeitig, aber dann so, daß die Teilchen sich nicht gegenseitig beeinflussen) gegen einen solchen Schirm anlaufen, so verteilt sich die durchschnittliche Häufigkeit der Teilchen in dem Raum hinter dem Schirm genau gemäß der durch die Interferenzeffekte der Zustandsfunktion festgelegten Wahrscheinlichkeitsverteilung, und da man den Abstand der Schirmöffnungen kennt, kann man auch umgekehrt aus der beobachteten Häufigkeitsverteilung auf die Wellenlänge der „Wahrscheinlichkeitswelle“ zurückschließen und findet genau die obige Formel $\lambda = h/p$ bestätigt. (Praktisch benutzt man keinen derartigen Schirm, sondern Kristalle, in denen die regelmäßige Anordnung der Atome die gleiche Wirkung wie die regelmäßige Abfolge der Schirmöffnungen hat.)

Eine derartige Übereinstimmung der quantenphysikalischen Naturbeschreibung mit dem experimentellen Befund zeigt, daß die quantenphysikalische Zustandsfunktion, wenn sie auch nicht einfachhin als Abbild des wirklichen Zustands des betreffenden Systems angesehen werden kann, dennoch in irgendeiner Form Grundstrukturen dieses wirklichen Zustandes wiedergeben muß; andernfalls wäre eine derartige Übereinstimmung von Voraussage und experimentellem Befund nicht möglich.

b) Verschränkte Systeme

Von besonderer Bedeutung für die Frage nach der Realinterpretation der Zustandsfunktion ist ein Hinweis auf eine (scheinbare oder tatsächliche?) Paradoxie in der quantenphysikalischen Beschreibung gewisser miteinander in Wechselwirkung stehender Systeme, den Einstein gegeben hat². Man bezeichnet die betreffenden Systeme

² Einstein—Podolsky—Rosen, Phys. Rev. 47 (1935) 777 ff.; vgl. auch Schrödinger, Naturwiss. 23 (1935) 807 ff., 823 ff., 844 ff.

als „verschränkt“³ und versteht darunter Systeme, die für eine gewisse Zeit in physikalischer Wechselwirkung miteinander gestanden haben, später aber wieder getrennt worden sind. Diese Systeme bleiben dann unter Umständen trotzdem in der quantenphysikalischen Beschreibung derart miteinander „verschränkt“, daß die Messung einer physikalischen Größe an dem einen System den Wert einer Größe im anderen System bestimmt, obgleich dieses letztere System durch den Akt der Messung gar nicht mehr physikalisch beeinflusst wird. Eine derartige Verschränkung liegt z. B. in dem Gedankenexperiment der Beobachtung eines Elektrons vor, welches von C. F. v. Weizsäcker durchgerechnet wurde⁴. Für die Herausarbeitung und Veranschaulichung der in unserem Zusammenhang interessierenden Eigenschaften verschränkter Systeme dürfte dieses Beispiel wohl geeigneter sein als das von Einstein selbst angegebene; darum sei es im Folgenden behandelt.

Zuvor ist jedoch noch kurz zu erklären, wie die bekannte *Heisenbergsche Unschärfebeziehung* in der quantenphysikalischen Beschreibung eines physikalischen Systems durch eine Zustandsfunktion zum Ausdruck kommt. Die Heisenbergsche Unschärfebeziehung besagt, daß es unmöglich ist, etwa Ort und Impuls eines Teilchens gleichzeitig genau zu messen; je genauer die Ortsmessung ist, desto ungenauer muß die Impulsmessung werden, und umgekehrt, wobei das Produkt der beiden Ungenauigkeiten größer oder gleich dem Betrag des Planckschen Wirkungsquantums ist. In der quantenphysikalischen Charakterisierung eines (materiellen) Teilchens durch eine Zustandsfunktion kommt das folgendermaßen zum Ausdruck: Wenn durch eine Messung festgestellt ist, daß sich das Teilchen in einem bestimmten Augenblick an dem Raumpunkt P befindet, dann ist die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen in dem gleichen Augenblick irgendwo anders als in P zu finden, natürlich gleich Null; demgemäß erhält das Teilchen als Zustandsfunktion eine „Wahrscheinlichkeitswelle“, die völlig auf den Punkt P „zusammengedrängt“ ist, d. h. deren Schwingungsweite in P groß, dagegen im ganzen übrigen Raum gleich Null ist. Eine solche Wahrscheinlichkeitswelle kann aber, wie die Rechnung zeigt, nicht dauernd auf den Punkt P zusammengedrängt bleiben, sondern sie wird in kürzester Zeit nach allen Seiten hin auseinanderlaufen. Dies bedeutet, daß die Geschwindigkeit, mit der sich das Teilchen von P aus weiterbewegt, sowohl der Größe wie der Richtung nach völlig unbestimmt ist, und das gleiche gilt für den Impuls als Produkt aus Masse und Geschwindigkeit. Wird dagegen der Ort des Teilchens nicht genau gemessen, sondern nur festgestellt, daß sich das Teilchen innerhalb eines gewissen Raumbereiches befindet, so ist innerhalb dieses ganzen Raumbereiches die Schwingungsweite der Wahrscheinlichkeitswelle von Null verschieden. Die Wahrscheinlichkeitswelle ist also weniger stark zusammengedrängt, und das hat zur Folge, daß sie auch weniger rasch auseinanderläuft: Die Geschwindigkeit des Teilchens ist zwar noch unbestimmt, aber nicht mehr völlig, sondern nur innerhalb gewisser Grenzen, und diese Grenzen rücken um so enger zusammen, je größer die Ausdehnung des Raumbereiches wird, auf den die Wahrscheinlichkeitswelle ursprünglich zusammengedrängt war. Will man daher ein Teilchen beschreiben, dessen Geschwindigkeit und Impuls ganz genau bestimmt sind, so darf die entsprechende Wahrscheinlichkeitswelle überhaupt nicht auf einen bestimmten Raumbereich zusammengedrängt sein, sondern muß sich bis ins Unendliche hinein erstrecken: Der Ort dieses Teilchens ist also völlig unbestimmt. Näherhin hat diese Wahrscheinlichkeitswelle die Gestalt einer ins Unendliche aus-

³ Vgl. Reichenbach, *Philosophische Grundlagen der Quantenmechanik*, Basel 1949, 185 ff.

⁴ *Zeitschr. f. Physik* 70 (1931) 114 ff. — Auf die philosophische Bedeutung dieses Beispiels wies als erste G. Hermann, *Die naturphilosophischen Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin 1935, hin.

gedehnten ebenen Welle, die sich in der gleichen Richtung wie das Teilchen selbst bewegt und deren Wellenlänge durch $\lambda = h/p$ (vgl. S. 162) gegeben ist. (Zum Begriff der ebenen Welle vgl. Abb. 1.)

v. Weizsäcker betrachtet nun ein Elektron, von dem auf irgendeine Weise bekannt ist, daß es sich irgendwo auf der Ebene E (vgl. Abb. 2) befindet; innerhalb dieser Ebene ist jedoch der Ort des Teilchens völlig unbestimmt, sein Impuls aber nach Richtung und Größe genau bestimmt⁵. Um nun den Ort dieses Elektrons messend

ZUM BEGRIFF DER EBENEN WELLE

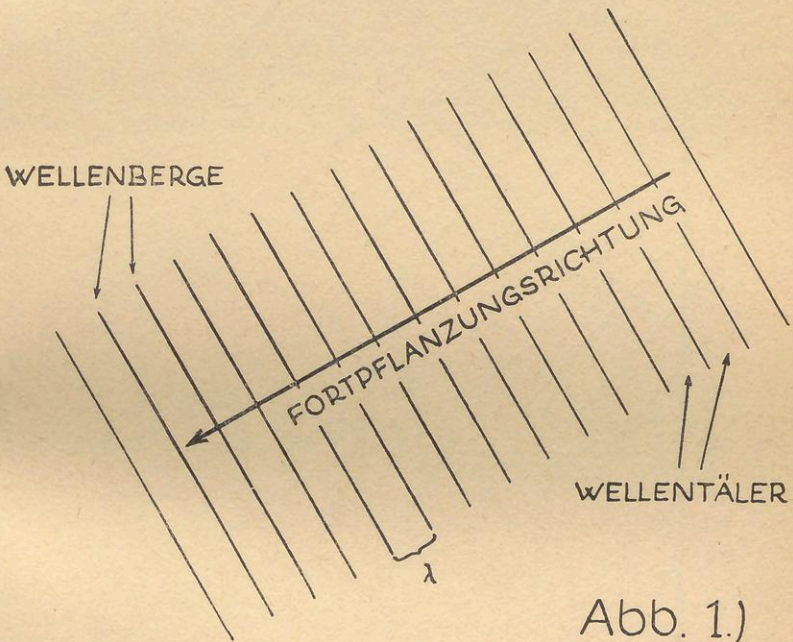


Abb. 1.)

festzustellen, wird ein Mikroskop-Objektiv O auf die Ebene E scharf eingestellt, so daß es die Ebene E auf eine photographische Platte P scharf abbildet. Dazu muß das Elektron natürlich beleuchtet werden; dies geschieht vermittels eines einzigen Lichtquants (Photon), welches mit genau bestimmtem Impuls auf die Ebene E und das darin befindliche Elektron fällt.

Nun kann man zwar diesem Lichtquant keine Wahrscheinlichkeitswelle zuordnen, die der quantenmechanischen Wahrscheinlichkeitswelle eines materiellen Elementarteilchens exakt entspräche⁶; aber die im jetzigen Zusammenhang interessierenden Züge im Verhalten dieses Lichtquants lassen sich doch durch eine Art „Welle“

⁵ Wenn hier und im Folgenden vom Impuls des Elektrons einfachhin gesprochen wird, so soll damit immer die in die Ebene E fallende Impulskomponente gemeint sein. Beim Impuls des Quants interessiert gleichfalls nur diese Komponente; sein Impuls werde jedoch als völlig bekannt vorausgesetzt, vgl. Anm. 7.

⁶ Vgl. etwa Pauli in: Handbuch der Physik², Bd. 24, 1. Teil, S. 259.

beschreiben, die wir im Folgenden der Kürze halber einfach als „Lichtwelle“ bezeichnen wollen, obwohl sie mit der Lichtwelle der klassischen Physik nur mittelbar zusammenhängt. Das Lichtquant, welches mit genau bestimmtem Impuls auf die Ebene E und das darin befindliche Elektron fällt, ist demgemäß zu charakterisieren durch eine unendlich ausgedehnte ebene Welle, deren Fortpflanzungsrichtung der Impulsrichtung des Quants entspricht und deren Wellenlänge durch den Betrag des Impulses gemäß $\lambda = h/p$ gegeben ist. An dem Elektron wird das Lichtquant

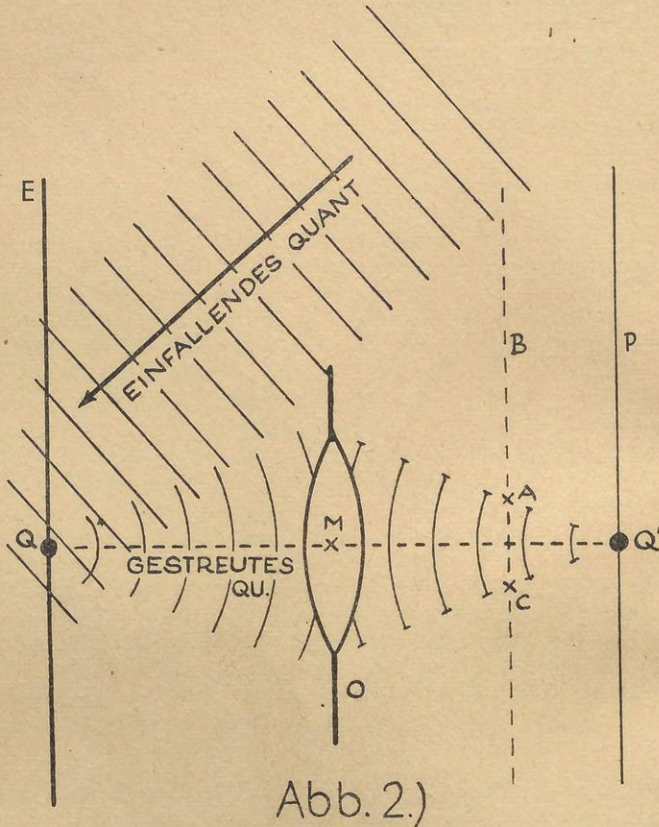


Abb. 2.)

„gestreut“, d. h. von dem Punkt Q der Ebene E, in dem sich das Elektron tatsächlich befindet, geht eine kugelförmige Lichtwelle aus; diese Kugelwelle, die das Lichtquant nach seiner Wechselwirkung mit dem Elektron repräsentiert, fällt in das Objektiv des Mikroskops und wird von diesem so beeinflusst, daß sie hinter dem Objektiv wieder auf einen Punkt Q' der Ebene P hin zusammenläuft (denn die Scharfeinstellung des Mikroskops bedeutet gerade, daß die Entfernungen zwischen E, O und P so gewählt werden, daß jede Kugelwelle, die von einem Punkt in E ausgeht und in das Objektiv fällt, wieder auf einen entsprechenden Punkt in P hin zusammenläuft. Man sagt dann, daß die Photoplatte in der zur Ebene E gehörigen „Bildebene“ liegt. Q' liegt so, daß die Verbindungsgerade QQ' durch den Mittelpunkt M des Objektivs läuft). Wenn also das Photon in Q' ankommt und dort durch eine photo-

chemische Reaktion die Platte schwärzt, so wissen wir, daß das Elektron sich in dem entsprechenden Punkt Q der Ebene E befindet, und eine sofort anschließende unmittelbare Ortsmessung würde das Elektron auch dort finden (wenn wir der Einfachheit halber davon absehen, daß das Lichtquant für den Weg von Q nach Q' eine wenn auch sehr kleine Zeit gebraucht hat und sich das Elektron in dieser Zeit wieder etwas von Q entfernt haben kann). —

Wir können aber das Mikroskop auch so einstellen, daß es uns nicht den Ort, sondern den Impuls des Elektrons nach der Wechselwirkung mit dem Photon zu messen gestattet. Dazu ist nur erforderlich, daß wir den Impuls des Photons nach der Wechselwirkung messen. Denn der Impuls von Elektron und Photon vor der Messung war uns ja bekannt, die Gesamtsumme dieser Impulse muß aber nach der klassischen wie nach der Quantenphysik bei der Wechselwirkung von Elektron und Photon unverändert bleiben; wenn wir also den Impuls des Photons nach der Wechselwirkung kennen, brauchen wir ihn nur von der Gesamt-Impuls-Summe abzuziehen, um den Impuls des Elektrons nach der Wechselwirkung zu erhalten.

Wenn wir aber so nach dem Impuls von Elektron und Lichtquant fragen, können wir an der anschaulichen Darstellung des Streuvorgangs, die wir eben gegeben haben, nicht mehr festhalten. Denn in dieser Darstellung war angenommen, daß das

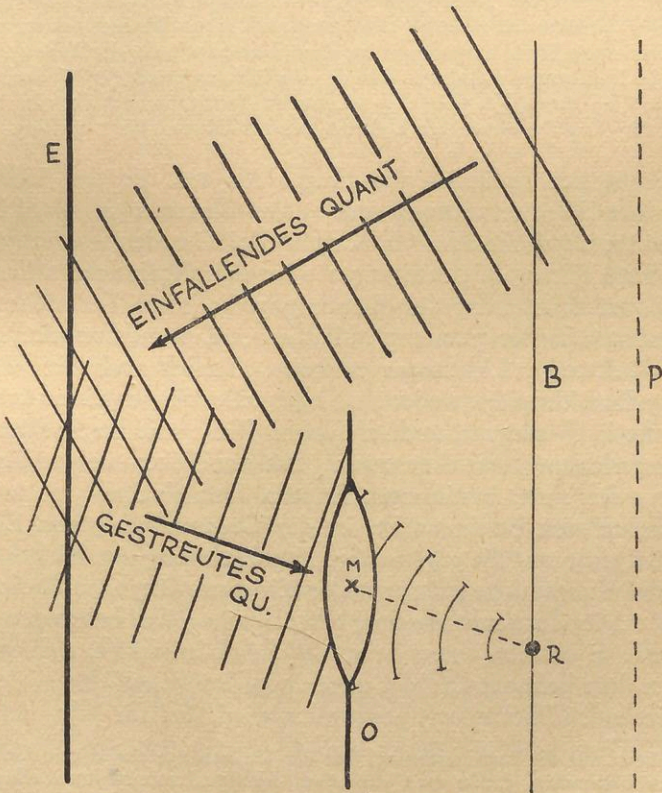


Abb. 3.)

Elektron einen *bestimmten Ort* tatsächlich habe, von dem das gestreute Licht als Kugelwelle ausging. Ort und Impuls können aber nach der Unschärfebeziehung nicht gleichzeitig genau bestimmt sein; wenn wir also jetzt nach dem Impuls des Elektrons fragen, muß sein Ort unbestimmt bleiben. Auch das Lichtquant muß jetzt durch eine ebene Welle repräsentiert werden und nicht mehr durch eine Kugelwelle; denn nur eine ebene Welle hat eine genau bestimmte Fortpflanzungsrichtung und damit einen genau bestimmten Impuls. Wir müssen also jetzt den Streuvorgang so auffassen, daß von der ganzen Breite der Ebene E her (Unbestimmtheit des Ortes des Elektrons und damit des Ortes der Wechselwirkung von Elektron und Lichtquant!) das Lichtquant als eine (grundsätzlich unbegrenzte) ebene Welle in das Objektiv fällt (vgl. Abb. 3).

Um nun die Fortpflanzungsrichtung dieser ebenen Welle und damit die Impulsrichtung des Lichtquants zu finden, legen wir die Photoplatte in die *Brennebene* des Objektivs. Die Brennebene B des Objektivs O (vgl. Abb. 3) ist dadurch definiert, daß jede ebene Lichtwelle, die in das Objektiv O fällt, durch das Objektiv so beeinflußt wird, daß sie hinter dem Objektiv auf einen Punkt in der Brennebene hin zusammenläuft, und zwar auf denjenigen Punkt der Brennebene hin, der vom Mittelpunkt M des Objektivs aus gesehen in der gleichen Richtung liegt, die die einfallende ebene Welle als Fortpflanzungsrichtung hatte. Wenn also das Lichtquant den Punkt R der in der Brennebene liegenden Photoplatte schwärzt und wir, wie oben gesagt, voraussetzen, daß das Lichtquant nach seiner Wechselwirkung mit dem Elektron als ebene Welle aufzufassen ist, dann können wir aus der Lage von R den Impuls⁷ des Lichtquants und damit auch den des Elektrons nach der Wechselwirkung bestimmen. Und tatsächlich würde, so behauptet die Quantenphysik, eine anschließende direkte Impulsmessung am Elektron den errechneten Wert ergeben.

Es erhebt sich natürlich die Frage: Als was ist das Lichtquant nach seiner Wechselwirkung mit dem Elektron in Wirklichkeit aufzufassen, als ebene oder als Kugelwelle? Gerade diese Frage wird das Problem bilden, mit dem wir uns bei der allgemeinen erkenntnistheoretischen Beurteilung des quantenphysikalischen Formalismus befassen müssen. In der quantenphysikalischen Zustandsfunktion für das System Elektron + Lichtquant erscheint nämlich nach der Wechselwirkung das Lichtquant weder als Kugelwelle, die von einem bestimmten Punkt in E ausgeht, noch als ebene Welle mit bestimmter Fortpflanzungsrichtung, und ebensowenig hat das Elektron einen bestimmten Ort oder einen bestimmten Impuls. Das einzige, was in dieser Zustandsfunktion bestimmt ist, ist der *Gesamtimpuls* von Elektron und Lichtquant und die *gegenseitige Lagebeziehung* von Elektronenort und Schwärzungspunkt auf der in der Bildebene liegenden Photoplatte. M. a. W.: Die Zustandsfunktion besagt: Für jeden beliebigen Punkt der Ebene E besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, daß sich das Elektron dort befindet und der zugehörige Punkt auf der in der Bildebene liegenden Photoplatte geschwärzt wird, und für jeden beliebigen

⁷ Zunächst nur die Impulsrichtung. Um die Wellenlänge und damit den Impulsbetrag zu bestimmen, denke man sich etwa ein (ideal monochromatisches) Filter vorgeschaltet, so daß nur Licht einer bestimmten Wellenlänge bis zur Platte gelangen kann. Grundsätzlich ist jedenfalls eine gleichzeitige Bestimmung von Impulsrichtung und -betrag möglich, und darauf kommt es hier lediglich an.

Wert (innerhalb gewisser Grenzen) des Elektronenimpulses besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, daß er bei einer unmittelbaren Impulsmessung am Elektron festgestellt und der zugehörige Punkt auf der in der Brennebene liegenden Photoplatte geschwärzt wird. Dagegen ist es unmöglich, daß eine Orts- oder Impulsmessung am Elektron einen Wert ergäbe, der nicht mit der vorher festgestellten Lage des Schwärzungspunktes vereinbar wäre.

Diese Zustandsfunktion ist gültig bis zu dem Augenblick, da die Photoplatte tatsächlich geschwärzt wird. Nehmen wir etwa an, daß die Platte in der Bildebene liegt, so ist es von diesem Augenblick an unmöglich, das Elektron irgendwo anders zu finden, als es nach den Abbildungsgesetzen der Optik dem Schwärzungspunkt entspricht; der Ort des Elektrons ist jetzt also genau bestimmt, und deswegen muß nun das ganze System durch eine Zustandsfunktion beschrieben werden, in der der Ort des Elektrons genau festgelegt ist.

Dieses „Umschlagen“ der Zustandsfunktion des Elektrons im Augenblick der Schwärzung der Platte bildet den Kern des Problems. Es wäre sehr einfach zu verstehen, wenn man die quantenphysikalische Unbestimmtheit lediglich als Ausdruck eines subjektiven Nicht-Wissens, nicht dagegen einer objektiven Unbestimmtheit auffassen würde; das „Umschlagen“ würde dann einfach den Übergang vom subjektiven Nicht-Wissen zum Wissen bedeuten. Sieht man dagegen in der quantenphysikalischen Unbestimmtheit irgendwie eine objektive Unbestimmtheit, dann würde z. B. die objektive Unbestimmtheit des Elektronenortes behoben durch ein Geschehen, das nach allen physikalischen Vorstellungen mit dem Elektron überhaupt nichts mehr zu tun hat, nämlich durch die Schwärzung der Photoplatte im Mikroskop. Auf die Paradoxie, die in einer solchen Annahme liegt, wollte Einstein mit seiner Veröffentlichung hinweisen. Andererseits würde aber die Auffassung der quantenphysikalischen Unbestimmtheit als eines lediglich subjektiven Nicht-Wissens zu ähnlichen Paradoxien bei der Deutung der Interferenzerscheinungen führen, wie dies noch auszuführen sein wird. Es erscheint demnach unmöglich, sich eindeutig für die eine oder andere Auffassung der quantenphysikalischen Unbestimmtheit zu entscheiden; diese Unmöglichkeit stellt das Problem dar, mit dem wir uns im Folgenden befassen müssen.

II. Naturphilosophische Lösungsansätze

a) Quantenphysik und klassische Wahrscheinlichkeitsrechnung

C. F. v. Weizsäcker hat neuerdings eine Auffassung vorgeschlagen, die die soeben entwickelte Schwierigkeit zu umgehen scheint. Wenn sie

auch inhaltlich etwa auf der Grenzlinie von Naturphilosophie und Erkenntnistheorie steht, so möchten wir sie doch an erster Stelle behandeln, weil ihre Diskussion eine gute Einführung in den Gedanken des „Möglichkeitsfeldes“ bietet.

v. Weizsäcker schreibt: „Soweit die Quantenmechanik als geschlossenes System vorliegt, bedeutet sie eigentlich nicht eine Änderung der klassischen Mechanik, sondern nur eine Änderung der klassischen Wahrscheinlichkeitsrechnung.“⁸ Noch deutlicher findet sich das Gemeinte an anderer Stelle formuliert: „Die aprioristische Auffassung des Wahrscheinlichkeitsbegriffes ... war ... meist mit der Illusion verbunden, man könne inhaltliche Wahrscheinlichkeitsaussagen a priori mit Gewißheit machen. Daß Wahrscheinlichkeitsgesetze genau so der Hypothese und empirischen Kontrolle unterworfen sind wie alle Naturgesetze, hat uns demgegenüber gerade die Quantenmechanik gelehrt. Sie ändert nämlich die Grundgesetze der Wahrscheinlichkeitsrechnung ab, indem sie die Zusammensetzung von Wahrscheinlichkeiten durch den Begriff der Wahrscheinlichkeitsamplitude dem Superpositionsprinzip unterwirft⁹. Quantenmechanisch kann es vorkommen, daß ein Ereignis, das im Fall A und im Fall B jeweils mit einer endlichen Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist, die Wahrscheinlichkeit Null erhält, wenn die Fälle A und B zugleich eintreten (Interferenz der Wahrscheinlichkeiten). Auch die Wahrscheinlichkeitsrechnung verliert also den Charakter als ‚reine‘ mathematische Disziplin und wird ein Teil einer ‚Wirklichkeitswissenschaft‘.“¹⁰ (Hervorhebungen von uns.)

Eine solche Auffassung erscheint jedoch unannehmbar, da das in Frage stehende Grundgesetz der Wahrscheinlichkeitsrechnung, das sog. Additionstheorem, recht verstanden, einen derart elementaren logischen Charakter trägt, daß seine Leugnung auf eine Leugnung des Widerspruchsprinzips hinauslaufen dürfte.

Das Additionstheorem der Wahrscheinlichkeitsrechnung lautet: Ist ein Ereignis E auf mehrere verschiedene Weisen verwirklichtbar und sei W_1 die Wahrscheinlichkeit dafür, daß E auf die erste Weise, W_2 die Wahrscheinlichkeit, daß E auf die zweite Weise verwirklicht wird usf., dann ist die Wahrscheinlichkeit W, daß E überhaupt, d. h. auf irgendeine Weise verwirklicht wird, gleich der Summe der Einzelwahrscheinlichkeiten: $W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$. Die scheinbare Durchbrechung dieses Theorems in der Quantenphysik läßt sich an dem eingangs behandelten Durchgang eines Teilchens durch einen Schirm mit mehreren Öffnungen veranschaulichen. Das Ereignis E sei das Eintreffen des zunächst vor dem Schirm befindlichen Teilchens im Punkt Q hinter dem Schirm; die erste (zweite usf.) Verwirklichung dieses Ereignisses bestehe darin, daß nur eine einzige Öffnung O_1 (O_2 , O_3 usf.) frei und alle anderen verschlossen sind, so daß das Teilchen auf jeden Fall durch O_1 (bzw. O_2 , O_3 usf.) hindurch muß. Q soll so liegen, daß, wenn nur O_1 offen ist, die Amplitude der durch O_1 hindurchgegangenen Wahrscheinlichkeitswelle in Q von Null verschieden sei und demgemäß die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen in Q vorzufinden, etwa 1% betrage. Sind nun alle Öffnungen gleichzeitig frei, so kann es geschehen, daß die Wirkung des durch O_1 hindurchgegangenen Wellenzuges im Punkt Q gerade von den durch die anderen Öffnungen hindurchgegangenen Wellenzügen durch

⁸ Der begriffliche Aufbau der theor. Physik, Vorlesungsnachschrift, Göttingen SS 1948, S. 210.

⁹ Damit ist nichts anderes als die eingangs erklärte Interferenz von Wahrscheinlichkeitswellen gemeint, auf die wir anschließend nochmals zurückkommen.

¹⁰ Naturwiss. 38 (1951) 533 ff.; die angeführte Stelle auf S. 543.

Interferenz aufgehoben wird; dann ist also die Amplitude der Wahrscheinlichkeitswelle in Q gleich Null und demnach auch die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen in Q zu finden, gleich Null.

Im Sinn des Vorschlags v. Weizsäckers müßten wir diesen Sachverhalt so formulieren: Die Wahrscheinlichkeit W_1 , daß das Teilchen durch die Öffnung O_1 hindurch nach Q gelangt, beträgt 1%, die Wahrscheinlichkeit W , daß es durch irgendeine Öffnung nach Q gelangt, ist dagegen gleich Null; W ist also kleiner als W_1 , und damit ist das Additionstheorem durchbrochen.

Vom Standpunkt der von v. Weizsäcker angegriffenen „aprioristischen“ Auffassung des Wahrscheinlichkeitsbegriffes aus ist dazu folgendes zu sagen: Bei der Aufstellung des Additionstheorems wird (vielleicht stillschweigend, aber jedenfalls selbstverständlich) die Voraussetzung gemacht, daß die verschiedenen in Betracht kommenden Verwirklichungsweisen sich nicht gegenseitig beeinflussen, daß z. B. die Wahrscheinlichkeit W_1 für die Verwirklichung auf die erste Weise nicht dadurch verändert wird, daß noch eine zweite Verwirklichungsweise in Betracht zu ziehen ist. Diese Voraussetzung ist für die Begründung des Theorems wesentlich; wenn sie fällt, wird niemand mehr das Theorem vertreten und sich so der „Illusion“ hingeben, a priori inhaltliche Wahrscheinlichkeitsaussagen machen zu können. Wird diese Voraussetzung aber gemacht, dann läuft die von v. Weizsäcker vorgeschlagene Form der Ablehnung des Theorems in der Tat auf einen Selbstwiderspruch hinaus. v. Weizsäcker sagt: Wenn W_1 von Null verschieden ist, kann trotzdem W gleich Null sein. Der Satz „ W_1 ist von Null verschieden“ bedeutet, daß vorgängig zur Berücksichtigung der übrigen Verwirklichungsweisen eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür besteht, daß E auf die erste Weise verwirklicht wird. Gemäß unserer Voraussetzung wird diese Wahrscheinlichkeit dadurch, daß noch andere Verwirklichungsweisen zu berücksichtigen sind, nicht verändert; auch nach der Berücksichtigung der übrigen Verwirklichungsweisen besteht also noch eine gewisse Wahrscheinlichkeit, daß E auf die erste Weise verwirklicht wird. In dem letzten Satz ist aber logisch-analytisch enthalten, daß eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür besteht, daß E überhaupt verwirklicht wird; es kann also ohne Verletzung des Widerspruchsprinzips nicht W gleich Null sein.

Wenn trotzdem in unserem obigen Beispiel W tatsächlich gleich Null ist, so folgt daraus, daß die *Voraussetzungen* für die Anwendung des Additionstheorems nicht erfüllt sind; m. a. W.: durch die Tatsache, daß noch weitere Öffnungen geöffnet werden, wird die Wahrscheinlichkeit W_1 , daß das Teilchen durch die erste Öffnung nach Q kommt, geändert und zu Null gemacht. Ob aber die Voraussetzungen für die Anwendung des Additionstheorems gegeben sind oder nicht, das kann nie a priori entschieden, sondern günstigstenfalls aus einer genaueren Theorie der in Frage stehenden Ereignisse, in unserem Fall des Durch-

gangs des Teilchens durch die Öffnungen, abgeleitet werden. Diese Theorie ist natürlich, darin hat v. Weizsäcker durchaus recht, der Hypothese und empirischen Kontrolle unterworfen wie alle Naturgesetze; aber das wußte man auch schon vor der Quantenmechanik.

b) Die Theorie des „Möglichkeitsfeldes“

Wie ist nun der Durchgang des Teilchens durch die verschiedenen gleichzeitig geöffneten Öffnungen im Schirm aufzufassen? Die Interferenzerscheinungen zeigen, daß das Verhalten des Teilchens in dem Raum hinter dem Schirm (wenn auch nur statistisch) von dem Zustand *aller* Schirmöffnungen abhängig ist, daß also das Teilchen von *allen* Öffnungen her irgendwie beeinflußt worden ist. Wie ist diese Beeinflussung zu denken?

Zunächst könnte man daran denken, daß es sich bei den Experimenten gewöhnlich um einen ganzen Strom von Teilchen handelt, die gegen einen solchen Schirm anlaufen, und vermuten, daß die durch die verschiedenen Öffnungen hindurchgegangenen Teilchen hinter dem Schirm so aufeinander einwirkten, daß daraus die Interferenz resultierte. Aber diese kommt auch dann zustande, wenn man die Teilchen den Schirm jeweils einzeln und mit so großen zeitlichen Abständen voneinander passieren läßt, daß das erste Teilchen bestimmt schon lange weggeflogen ist, bevor das folgende überhaupt an den Schirm gelangt.

Man könnte weiter daran denken, dem Teilchen ein Kraftfeld zuzuschreiben von der Art, daß das Teilchen selbst immer nur durch *eine* bestimmte Öffnung hindurchginge, durch die Vermittlung dieses Kraftfeldes aber auch mit allen übrigen Öffnungen in Wechselwirkung träte. Eine solche Auffassung dürfte nicht streng unmöglich, aber doch sehr unwahrscheinlich sein angesichts der Tatsache, daß die ganze Entwicklung der Physik darauf hinzielt, „Teilchen“ und „Kraftfeld“ nicht als zwei verschiedene Wirklichkeiten, sondern lediglich als verschiedene Aspekte derselben Wirklichkeit zu betrachten. So stellt z. B. das „Teilchen“ Lichtquant den korpuskularen Aspekt dessen dar, was andererseits als Welle des elektromagnetischen „Kraftfeldes“ erscheint. Und ein Elektron kann man sich immer aus dem Zerfall eines Mesons entstanden denken; das „Teilchen“ Meson ist aber wieder nur der korpuskulare Aspekt der Welle des „Kernkraftfeldes“. Umgekehrt führt die Quantenphysik das elektromagnetische und das Kernkraftfeld auf den „virtuellen“ Austausch von Lichtquanten bzw. Mesonen zurück.

Heisenberg gibt vom positivistischen Standpunkt aus für unser Problem folgende Lösung: Wenn kein Experiment stattfindet, welches die Feststellung des Teilchenortes kurz vor dem Durchgang durch den Schirm ermöglicht, so hat es auch keinen Sinn, von einem Teilchenort zu sprechen, und es ist durchaus verständlich, daß der ganze Schirm für

den Vorgang des Teilchendurchgangs maßgeblich ist¹¹. „Durchaus verständlich“ ist diese Begründung jedoch nur dann, wenn man mit dem Positivismus die Unterscheidung zwischen einer lediglich nicht gemessenen und einer objektiv nicht bestehenden Eigenschaft eines physikalischen Gebildes (in unserem Fall Teilchenort) als sinnlos verwirft. Hält man jedoch mit dem kritischen Realismus an der grundsätzlichen Berechtigung dieser Unterscheidung fest, so wird die Heisenbergsche Erklärung gemäß dem im Vorausgegangenen Gesagten nur dann verständlich, wenn man dem Teilchen auch objektiv eine solche Art der Raumbezogenheit zuschreibt, daß man von einem genau definierten Teilchen „ort“ nicht mehr sprechen kann, eine Art „Allgegenwart“ also, kraft deren das Teilchen durch alle Öffnungen im Schirm gleichzeitig hindurchgeht und daher auch in seinem weiteren Verhalten durch die Verteilung und Anordnung aller Öffnungen im Schirm beeinflußt wird.

Gegen die Annahme einer solchen „Allgegenwart“ des Teilchens erhebt sich jedoch folgende wesentliche Schwierigkeit¹²: Entsprechend der Ausdehnung der Wahrscheinlichkeitswelle über die ganze Schirmfläche müßten wir das Teilchen, etwa ein Elektron, auffassen als eine Art „Ladungswolke“, die breit ausgedehnt auf den Schirm zufliegt und durch alle Öffnungen gleichzeitig hindurchgeht. Was aber, wenn wir alle Öffnungen schließen, so daß das Teilchen bestimmt am Schirm „hängenbleibt“? In diesem Fall müßte sich die Ladungswolke im Augenblick des Auftreffens auf den Schirm schlagartig auf einen einzigen Punkt hin zusammenziehen; denn nur an einem einzigen Punkt tritt das Teilchen tatsächlich auf. Ein solches schlagartiges Sich-Zusammenziehen erscheint aber physikalisch zumindest äußerst merkwürdig und unwahrscheinlich.

Zwar tritt auch bei der quantenphysikalischen Wahrscheinlichkeitswelle ein gewisses „Sich-Zusammenziehen“ auf; denn in dem Augenblick, in dem der Ort des Teilchens etwa durch ein Aufblitzen auf dem Schirm festgestellt wird (wenn wir uns den Schirm mit einer beim Aufprall von Teilchen leuchtenden Masse überzogen denken), muß natürlich die alte Zustandsfunktion, gemäß welcher der Ort des Teilchens unbestimmt war, ersetzt werden durch eine neue, gemäß der das Teilchen sich mit Gewißheit an dem Ort des Aufblitzens und nirgendwo anders befindet. Man bezeichnet dies als „Reduktion“ der Zustandsfunktion durch die Vornahme der (Orts-) Messung; eine derartige Reduktion der Zustandsfunktion tritt ganz allgemein immer dann ein, wenn eine gemäß der Zustandsfunktion unbestimmte physikalische

¹¹ Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie⁴, S. 59; die Stelle ist wesentlich abgeändert, um den Anschluß an unser Beispiel anstelle der bei Heisenberg diskutierten Reflexion an einem Gitter herzustellen.

¹² Man könnte einwenden, eine solche Auffassung habe auch alle anderen Schwierigkeiten der ursprünglichen Schrödingerschen Ladungswolken-Theorie gegen sich. Diese richten sich jedoch nur gegen eine „Ladungswolke“, die der kontinuierlichen Ladungsverteilung der klassischen Elektrodynamik nachgebildet ist, und könnten bei einer allgemeineren Fassung der „Allgegenwart“ vermieden werden; vgl. etwa W. Büchel, PhJb. 58 (1948) 55 ff.

Größe gemessen wird und dementsprechend die alte Zustandsfunktion durch eine neue ersetzt werden muß, in der die gemessene Größe genau den bei der Messung gefundenen Wert hat. Aber diese Reduktion der Zustandsfunktion besagt nach der statistischen Interpretation der quantenphysikalischen Formeln lediglich, daß man den Wert der betreffenden Größe vor der Messung nicht kannte, während man ihn nach der Messung natürlich kennt. Von einer realen, objektiven Veränderung des betreffenden Systems kann — immer nach der statistischen Interpretation — schon darum keine Rede sein, weil die statistische Interpretation einen derartigen „wirklichen“ Zustand überhaupt nicht kennt bzw. keinerlei Aussagen darüber macht. Gerade durch diese Selbstbeschränkung wird das Auftreten von Widersprüchen und physikalischen Ungereimtheiten vermieden, die sich unvermeidlich einstellen, wenn man die Zustandsfunktion als unmittelbaren Ausdruck des „wirklichen“ Zustandes des betreffenden Systems betrachtet. Denn wollte man, um zu unserem Beispiel zurückzukehren, ein wirkliches schlagartiges Sich-Zusammenziehen unserer Ladungswolke annehmen, so müßten sich, wenn wir nicht geladene materielle Teilchen, sondern Lichtquanten für unsere Versuche verwenden, gemäß den experimentell festgestellten Interferenz-Eigenschaften Wellenzüge von unter Umständen 10 und mehr Metern Breite momentan mit Überlichtgeschwindigkeit zusammenziehen, was physikalisch zumindest äußerst merkwürdig und unwahrscheinlich erscheint.

Die angegebene Schwierigkeit scheint sich (wenigstens zunächst) durch die Einführung des Begriffes des „Möglichkeitsfeldes“ umgehen zu lassen, wie sie von verschiedenen Autoren in verschiedener Form vorgeschlagen wird¹³. Nach dieser Auffassung besäße das Teilchen beim Durchgang durch den Schirm keine „aktuelle“ Realität oder wenigstens keinen „aktuellen“ Ort, sondern es wäre nur der Möglichkeit nach realisierbar bzw. lokalisierbar; diejenigen Bereiche hinter dem Schirm, in welchen sich zukünftige Aktualisationen bzw. Lokalisationen vollziehen könnten, wären durch ein „Möglichkeitsfeld“ abgesteckt, und dieses Möglichkeitsfeld wäre es, das der „Wahrscheinlichkeitswelle“ real entspräche.

An die Stelle des schlagartigen Sich-Zusammenziehens träte dann der Aktualisations- bzw. Lokalisationsprozeß: Dadurch, daß das Teilchen sich an einem bestimmten Punkt aktualisiert oder lokalisiert, wird eo ipso die Möglichkeit der Aktualisation bzw. Lokalisation an einem anderen Punkt aufgehoben¹⁴.

Auf ontologische Bedenken, die sich gegenüber einem derartigen Begriff etwa erheben könnten, möchten wir an dieser Stelle nicht eingehen, sondern nur die Frage seiner Vereinbarkeit mit den physikalischen Gegebenheiten betrachten.

¹³ Ausdrücklich von A. Wenzl, z. B. in: *Metaphysik der Physik von heute*, Leipzig 1935; aber auch die Auffassung von H. Conrad-Martius: *Naturwissenschaftlich-metaphysische Perspektiven*, Heidelberg 1947, oder von W. Böhm, *PhJb* 61 (1951) 38 ff., scheint in eine ähnliche Richtung zu gehen.

¹⁴ Das hier Gemeinte hat natürlich nichts zu tun mit der in der Quantenphysik üblichen Unterscheidung von „reellen“ und „virtuellen“ oder Zwischen-Zuständen. In den von uns betrachteten Fällen befinden sich die Elementarteilchen, physikalisch gesprochen, immer in „reellen“ Zuständen.

Diese Frage erhebt sich bei dem Versuch, die Theorie auf ver-
 schränkte Systeme anzuwenden. An welcher Stelle soll etwa in dem
 oben beschriebenen Beispiel des Elektrons unter dem Mikroskop der
 Aktualisations- oder Lokalisationsprozeß angesetzt werden?¹⁵ Verlegt
 man ihn in den Augenblick des Auftreffens des Lichtquanten auf die
 Photoplatte, so ergibt sich die paradoxe Rückwirkung von der Photo-
 platte auf das Elektron, auf die Einstein hinwies: Durch die Aktuali-
 sation des Lichtquanten an der Platte würde gleichzeitig das Elektron
 vor dem Objektiv aktualisiert bzw. lokalisiert. Infolgedessen
 bleibt wohl nichts anderes übrig, als den Aktualisationsprozeß in den
 Augenblick der Wechselwirkung von Elektron und Lichtquant zu ver-
 legen¹⁶. Man müßte also sagen: Bis zu ihrer Wechselwirkung haben
 Elektron wie Lichtquant keinen bestimmten Ort, sondern sind lediglich
 durch Möglichkeitsfelder künftiger Aktualisationen charakterisiert. In
 und durch die Wechselwirkung geschieht ihre Aktualisation; d. h. durch
 die Wechselwirkung wird ein bestimmter, sehr kleiner Raumbereich
 (denn ein Raum„punkt“ stellt natürlich eine Idealisierung dar) derart
 ausgezeichnet, daß sich das Elektron jetzt mit Gewißheit innerhalb
 dieses Raumbereiches befindet und das Lichtquant (das ja nicht dort
 „stehenbleiben“ kann) durch eine Kugelwelle zu charakterisieren ist,
 die von diesem Raumbereich als Zentrum ausstrahlt. Hinter dem
 Objektiv läuft diese Kugelwelle wieder auf einen sehr kleinen, prak-
 tisch punktförmigen Bereich der Bildebene hin zusammen; und wenn
 die Photoplatte in der Bildebene liegt, kann nur in diesem „Bildpunkt“
 des Elektronenortes das Quant auf die Platte treffen und die zur
 Schwärzung führende chemische Reaktion einleiten.

Was aber, wenn die Platte in der Brennebene liegt, das Mikroskop
 also für Impulsmessung eingerichtet ist? Wie aus der Abb. 2 auf S. 166
 hervorgeht, durchsetzt eine Kugelwelle, die auf einen Punkt Q' in der
 Bildebene P hin zusammenläuft, die Brennebene B in einem recht aus-

¹⁵ Die folgende Überlegung stellt eine Art Anwendung der Heisenbergschen „Schnitt“-Überlegung dar; vgl. Schol 27 (1952) 229 ff. Es zeigt sich dabei jedoch, daß das eigentliche Problem nicht in der Verschiebbarkeit des formalen „Schnitts“, sondern in der Verschränkung von Quant und Elektron nach ihrer Wechselwirkung besteht. Bestünde diese Verschränkung nicht, so könnte man unbeschadet der Verschiebbarkeit des formalen „Schnitts“ den realen Aktualisationsprozeß eindeutig in den Augenblick der Wechselwirkung von Quant und Elektron legen.

¹⁶ Vgl. Wenzl a. a. O. 23: „Licht und Materie sind, wenn sie *energetische* Erscheinungen liefern, *Korpuskeln*, *in actu Korpuskeln*, materialisiert, lokalisiert als Korpuskeln.“ Eine solche Auffassung scheint jedoch nicht nur bei dem im Text diskutierten Beispiel, sondern auch schon bei der Beugung an einem Gitter zu Schwierigkeiten zu führen. Denn das durchgehende Teilchen gibt die Impulsdifferenz, die der Ablenkung bei der Beugung entspricht, an das Gitter ab. Mit einem solchen Impulsaustausch ist aber immer auch eine energetische Wechselwirkung verbunden (wenn man nicht die Masse des Gitters fiktional als „unendlich groß“ ansetzt). Trotzdem führt diese energetische Wechselwirkung zu *keiner* Lokalisation des Teilchens.

gedehnten Bereich, der in unserer Zeichnung von A bis C geht. Wenn also die Photoplatte nicht in der Bildebene P, sondern in der Brennebene B liegt, dann ist es wieder unbestimmt, wo zwischen A und C der tatsächliche Auftreffpunkt des Quants liegt; es bedarf also eines erneuten Aktualisationsprozesses am Lichtquant, um dessen Auftreffpunkt und damit den Schwärzungspunkt eindeutig festzulegen. Diesen Aktualisationsprozeß kann man vernünftigerweise nur in den Augenblick des Auftreffens des Quants auf die Platte verlegen; auf jeden Fall hat er mit dem Elektron vor dem Objektiv nichts mehr zu tun.

Andererseits ist auch der Impuls des Elektrons bei dem ersten Aktualisationsprozeß, der zur Festlegung des Elektronenortes führte, gemäß der Heisenbergschen Unschärfebeziehung unbestimmt geworden. Wird nun nach irgendeinem Verfahren der Impuls des Elektrons gemessen, so braucht es einen dritten Aktualisationsprozeß, um den bei der Messung sich ergebenden Wert des Impulses festzulegen; dieser dritte Aktualisationsprozeß spielt sich auf jeden Fall irgendwo vor dem Objektiv ab und hat mit dem zweiten Aktualisationsprozeß an der Photoplatte sicher nichts zu tun.

Wenn aber der zweite und der dritte Aktualisationsprozeß nichts miteinander zu tun haben — wie soll es dann möglich sein, aus dem Resultat des zweiten einen Rückschluß auf das des dritten zu ziehen? Dies *ist* aber möglich; denn die Lage des Schwärzungspunktes auf der in der Brennebene liegenden Photoplatte gibt den Impuls des Lichtquanten nach der Wechselwirkung an, und daraus läßt sich, wie oben angegeben, der Impuls des Elektrons nach der Wechselwirkung und damit auch das Resultat einer anschließenden Impulsmessung am Elektron berechnen. Um diesen Zusammenhang verständlich zu machen, haben wir oben bei der anschaulichen Darstellung der Impulsmessung das Quant nach der Wechselwirkung nicht durch eine Kugelwelle, sondern durch eine ebene Welle charakterisiert. Wir konnten das damals tun, weil es ja lediglich ein Hilfsmittel zur Verdeutlichung des von der Quantenphysik behaupteten Zusammenhanges und keine Aussage über den „wirklichen“ Zustand des Quants bedeutete. Jetzt dagegen haben wir angenommen, daß das Quant *in Wirklichkeit* von einem bestimmten Punkt Q der Ebene E als Kugelwelle ausgehe — denn Q ist jetzt der *wirkliche* Elektronenort —; und dann ist natürlich eine Darstellung des Quants durch eine ebene Welle nicht mehr zulässig.

An dieser Schwierigkeit scheint die Deutung der „Wahrscheinlichkeitswellen“ als „Möglichkeitsfeld“ zu scheitern. Man müßte höchstens zwei verschiedene Arten von Aktualisationsprozessen einführen, eine, durch die der Ort, und eine andere, durch die der Impuls von Elektron und Quant nach der Wechselwirkung festgelegt würden, und es durch

die Lage der Photoplatte in der Bild- bzw. Brennebene bestimmt sein lassen, was für ein Aktualisationsprozeß tatsächlich einträte¹⁷. Aber eine solche „Vorauswirkung“ der Photoplatte auf das Geschehen vor dem Objektiv erschiene ebenso paradox wie die früher besprochene „Rückwirkung“.

III. Erkenntnistheoretische Lösungsansätze

a) Lösungsansätze außerhalb des kritischen Realismus

Angesichts der Schwierigkeiten, die sich dem mehr ontologisch orientierten Versuch der Deutung der „Wahrscheinlichkeitswelle“ als eines „Möglichkeitsfeldes“ entgegenstellen, liegt es nahe, das Problem vom erkenntnistheoretischen Standpunkt aus anzugehen. Tatsächlich verschwinden für den *Positivismus* sämtliche Schwierigkeiten, wie der oben angeführte Satz von Heisenberg zeigt, und man muß weiterhin zugeben, daß die positivistische Geisteshaltung auf die Entwicklung der modernen Quantenphysik einen großen Einfluß ausgeübt hat. —

Reichenbach schlägt zur Vermeidung der Schwierigkeiten eine *dreiwertige Logik*¹⁸ vor, in der es neben den Wahrheitswerten „Wahr“ und „Falsch“ noch den Wahrheitswert „Unbestimmt“ gibt, der Aussagen über quantenphysikalisch unbestimmte Größen zugeschrieben werden und die ausdrücken soll, daß solche Aussagen weder als wahr noch als falsch angesehen werden dürfen. Dabei ist „unbestimmt“ nach *Reichenbach* sorgfältig von „unbekannt“ zu unterscheiden: der Ausdruck „unbekannt“ kann auch auf Aussagen der zweiwertigen Logik angewandt werden, deren Wahrheitswert man zwar nicht kennt, von denen man aber weiß, daß sie auf jeden Fall wahr oder falsch sind; die „unbestimmten“ Aussagen dagegen sind gerade dadurch charakterisiert, daß die Alternative von Wahr und Falsch auf sie nicht angewandt werden kann.

Für die Auflösung der uns beschäftigenden Schwierigkeiten vermittelt der dreiwertigen Logik ein Beispiel: Bei den durch den durchlöcherten Schirm fliegenden Teilchen ist ihr Ort und damit die zum Durchgang benutzte Öffnung „unbestimmt“. Man darf darum nach *Reichenbach* nicht behaupten („aussagen“), daß ein Teilchen durch eine bestimmte Öffnung durchgegangen sei, und darf darum auch nicht folgern, daß es von den anderen Öffnungen her nicht beeinflußt worden sein kann. Andererseits darf man aber auch nicht „aussagen“, daß es *nicht* durch eine bestimmte Öffnung gegangen sei, und kann darum

¹⁷ Prozesse der letzten Art könnten übrigens nur als Aktualisations-, nicht mehr als Lokalisationsprozesse bezeichnet werden, weil dabei der Ort der Wechselwirkung von Quant und Elektron unbestimmt bleiben muß; vgl. S. 168 oben.

¹⁸ A. a. O. 159 ff.

keine Paradoxie darin finden, daß das Teilchen sich beim Verschließen aller Öffnungen nur an einem einzigen Punkt des Schirms und nirgendwo anders bemerkbar macht.

Im Grunde stellt die Reichenbachsche Logik nichts anderes als die systematische Formulierung der tatsächlich in der Quantenphysik gebräuchlichen Ausdrucks- und Schlußweise dar. Somit bleibt als eigentliches Problem die Frage bestehen, wie das Aussageverbot für die „unbestimmten“ Aussagen erkenntnistheoretisch aufzufassen und zu begründen ist. —

Die von *Bohr* begründete¹⁹ und auch in außerphysikalischen Kreisen geläufigste Auffassung der erkenntnistheoretischen Situation der Quantenphysik legt den Nachdruck auf die *Komplementarität* der jeweils auf Grund der Unschärfebeziehung nicht gleichzeitig genau meßbaren Größen. Nach dieser Auffassung bleiben die klassische Physik und ihre Naturgesetzlichkeit an sich bestehen; sie werden nur der einen wesentlichen Beschränkung unterworfen, daß niemals über komplementäre Größen gleichzeitig Angaben gemacht werden dürfen. *C. F. v. Weizsäcker* interpretiert diese Komplementarität als wesentliche *Subjektbezogenheit* der quantenphysikalischen Naturbeschreibung: Je nachdem, mit welcher subjektiven Fragestellung, d. h. mit welcher experimentellen Anordnung ich an das zu untersuchende Objekt herantrete, erscheint es mit dieser oder mit jener der komplementären Eigenschaften ausgestattet²⁰. Daraus folgt die *Nicht-Objektivierbarkeit* der quantenphysikalischen Aussagen: Wenn unter Objektivierbarkeit die Eigenschaft einer Aussage verstanden ist, daß ihr Inhalt nicht von den Bedingungen abhängt, unter denen die sie verifizierenden Erfahrungen gewonnen werden, so ist gerade die Nicht-Objektivierbarkeit der quantenphysikalischen Aussagen der charakteristische Unterschied gegenüber der klassischen Physik²¹. Im wesentlichen dieselbe Auffassung vertritt *G. Hermann*²².

Soweit diese Auffassung nur eine Charakterisierung der *quantenphysikalischen* Naturbeschreibung geben will, muß man ihr durchaus zustimmen: Die quantenphysikalische Naturbeschreibung ist in dem angegebenen Sinn komplementär, subjektbezogen und nicht-objektivierbar. *v. Weizsäcker* möchte jedoch weitergehen und allgemein und grundsätzlich formulieren: „*Ontologisch* bedeutet dies, daß der Begriff

¹⁹ Vgl. etwa *N. Bohr*, *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, Berlin 1931; *New Theories in Physics*, Paris 1939; speziell zum Problem verschränkter Systeme: *Phys. Rev.* 48 (1935) 696 ff.

²⁰ *C. F. v. Weizsäcker*, *Zum Weltbild der Physik*, Leipzig 1943, 61 f. u. a.

²¹ *A. a. O.* 67, 60.

²² Vgl. *Anm. 4*. Außerdem: *Hermann—May—Vogel*: *Die Bedeutung der modernen Physik für die Theorie der Erkenntnis*, Leipzig 1937, 41—44; *Studium generale* 1 (1947/48) 375 ff.

des Objekts nicht mehr ohne Bezugnahme auf das Subjekt der Erkenntnis verwendet werden kann“, wobei allerdings die Bedeutung des Terminus „Subjekt“ noch in gewisser Weise eingeschränkt wird. Auch G. Hermann deutet wenigstens an, daß der skizzierte Charakter der quantenphysikalischen Naturbeschreibung zu einer erneuten Beschäftigung mit der Kantischen Antinomienlehre nötige, „nach der uns die Naturerkenntnis nicht eine ‚an sich‘ bestimmte Wirklichkeit zeigt, sondern nur Relationsgefüge, die sich nicht auf absolute Bestimmungen des Wirklichen zurückführen lassen“. —

Als „*Dialektik*“ betrachten die quantenphysikalische Komplementarität G. Kropp²³ und M. Wundt²⁴, dieser im ausdrücklichen Anschluß an Hegel.

b) Lösungsansatz im Sinn des kritischen Realismus

Ein erkenntnistheoretischer Lösungsansatz, der vom kritischen Realismus ausgeht, muß das entscheidende Problem wohl in der Nicht-Objektivierbarkeit sehen: Wie ist es aufzufassen, daß z. B. das Elektron unter dem Mikroskop bald als mit einem bestimmten Impuls, bald als mit einem bestimmten Ort ausgestattet erscheint, je nachdem mit welcher „subjektiven Einstellung“ ich an es herantrete, d. h. je nachdem ob die Photoplatte in der Brenn- oder Bildebene liegt, und daß es trotzdem unmöglich ist, dem Elektron beide Eigenschaften zur gleichen Zeit zuzuschreiben? Von der Gedankenwelt des kritischen Realismus aus gesehen, scheint diese Frage eine gewisse Verwandtschaft zu besitzen mit der bekannten anderen: Wie kommt es, daß eine Wand bald gelb, bald grün erscheint, je nachdem ob sie mit weißem oder mit blauem Licht angestrahlt wird? Die Antwort ist bekannt: Die Wand ist in Wirklichkeit weder „grün“ noch „gelb“, sondern sie besitzt ein selektives Absorptionsvermögen für bestimmte Lichtwellenlängen, und aus dem Zusammenwirken dieses Absorptionsvermögens mit den Eigenschaften der Beleuchtungsvorrichtung wie des menschlichen Sinnesorgans resultiert das wahrgenommene Gelb bzw. Grün. Dieses Gelb bzw. Grün ist nicht rein subjektiv, denn es hängt mit dem Absorptionsvermögen der Wand gesetzmäßig zusammen; und es ist auch nicht rein objektiv, denn es hängt sowohl von der Beschaffenheit des menschlichen Sinnesorgans wie der Beleuchtungsvorrichtung ab, die beide mit dem Objekt, der Wand, an sich nichts zu tun haben.

Ähnlich wird man darum auch im Fall des Elektrons geneigt sein, zu antworten: Das Elektron hat in Wirklichkeit weder einen bestimmten Ort noch einen bestimmten Impuls; denn diese Begriffe sind, was

²³ G. Kropp, Das Außenweltproblem der modernen Atomphysik, Berlin 1948.

²⁴ Universitas 1 (1946) 547, 703.

ihren psychologischen Ursprung angeht, gewonnen an makrophysikalischen „Körpern“, die in Wirklichkeit eine Zusammenballung einer Unzahl von Elementarteilchen darstellen, und es ist darum von vornherein zu erwarten, daß derartige Begriffe sich auf das einzelne Elementarteilchen ebensowenig unmittelbar anwenden lassen, wie etwa die Begriffe der Bevölkerungsstatistik eine unmittelbare Anwendung auf das Schicksal des Einzelmenschen gestatten. Andererseits lassen sich die makrophysikalischen Begriffe mit einer gewissen Annäherung auch auf die Elementarteilchen anwenden; das zeigt ja gerade ihr (durch die Unschärfebeziehung eingeschränkter) Gebrauch in der Quantenphysik. Der „Ort“, der in diesem Sinn dem Elektron unter dem Mikroskop zugeschrieben wird, ist nicht etwas rein Subjektives, denn dahinter steht diejenige *Realität*, die die Verknüpfung zwischen dem Schwärzungspunkt auf der in der Bildebene liegenden Photoplatte und dem Resultat einer weiteren unmittelbaren Ortsmessung herstellt; daß andererseits im Begriff des Elektronen„orts“ wesentlich *subjektive* Elemente enthalten sein müssen, ergibt sich aus der ganzen Nicht-Objektivierbarkeit der quantenphysikalischen Aussagen und ist in Anbetracht des psychologischen Ursprungs dieses Begriffes durchaus verständlich.

In dieser Auffassung erscheint also die erkenntnistheoretische Problematik der Quantenphysik als Folge der Diskrepanz zwischen der objektiven Naturwirklichkeit und den auch in der Quantenphysik zur Beschreibung der Natur verwendeten Begriffen der klassischen Physik „Ort“, „Impuls“, „Energie“ usw. Es ist nun zu fragen, ob eine solche Auffassung möglich und, wenn ja, ob sie wahrscheinlich ist („wahrscheinlich“ in dem Sinn, in dem die Beweisführung des kritischen Realismus die „Wahrscheinlichkeit“, d. h. praktische Gewißheit, für die Existenz einer realen Außenwelt dartut).

Was die *Möglichkeitsfrage* angeht, so stellt sich v. Weizsäcker die zunächst ähnlich klingende Frage: „Könnte es nicht eines Tages eine noch umfassendere Theorie als die Quantenmechanik geben, welche die von der Quantenmechanik abgewiesene Frage nach den objektiven Werten unbestimmter Größen doch noch zu beantworten gestattet?“²⁵ Nachdem er die Anforderungen umrissen hat, denen eine solche Theorie genügen müßte, antwortet er: „Die Schwierigkeit, sich dergleichen auch nur vorzustellen, und das Scheitern aller bisher in dieser Richtung unternommenen Versuche ist vielleicht für den Physiker das stärkste Argument, eine nochmalige Revision gerade dieser Züge der Quantenphysik nicht zu erwarten.“

Ohne auf die Diskussion dieser Begründung einzugehen, möchten wir zugeben, daß eine Theorie von der angegebenen Art wohl kaum

²⁵ A. a. O. 63.

mehr entwickelt werden wird. Aber die Frage nach der Möglichkeit einer solchen Theorie fällt nicht mit der Frage nach der Möglichkeit unseres objektivistischen erkenntnistheoretischen Ansatzes zusammen. Denn der kritische Realismus muß gerade als „kritischer“ Realismus durchaus mit der Möglichkeit rechnen, daß die Diskrepanz zwischen dem Ausgangspunkt all unserer Begriffsbildung, der anschaulichen Erfahrung der Makrowelt, und der Wirklichkeit der Mikrowelt so groß ist, daß sie die Formung adäquater Begriffe zur Beschreibung der Mikrowelt praktisch unmöglich macht. Eine Theorie, wie sie v. Weizsäcker beschreibt, würde aber Begriffe verlangen, die der Mikrowelt wenigstens im Wesentlichsten adäquat angepaßt wären; die Unmöglichkeit einer solchen Theorie hat also von unserem erkenntnistheoretischen Standpunkt aus an sich nichts Überraschendes.

Was die *Wahrscheinlichkeit* unseres Ansatzes betrifft, so gibt v. Weizsäcker, wenn wir ihn recht verstehen, zu, daß im Bereich der klassischen, also der Makrophysik der „praktische“ Realismus der alltäglichen Erfahrung berechtigterweise zum „prinzipiellen“ oder „metaphysischen“ Realismus, wie er unsere Auffassung bezeichnet, ergänzt wird; erst die erkenntnistheoretischen Probleme der Quantenphysik führen beim Festhalten am „praktischen“ Realismus zur Preisgabe des „prinzipiellen“²⁶. M. a. W.: Im Bereich der Makrowelt kann der Begriff des Objekts ontologisch ohne Bezugnahme auf das Subjekt der Erkenntnis verwendet werden, erst bei der Erforschung der mikrophysikalischen Feinstruktur des makrophysikalischen Objekts wird diese Bezugnahme notwendig. Bedeutet das aber nicht, daß jedenfalls der makrophysikalische Tisch oder Baum „wirklich“ existiert, existiert im Sinn des „metaphysischen“ Realismus? Und wenn wir vielleicht v. Weizsäcker falsch verstehen und er die „wirkliche“ Existenz auch des makrophysikalischen Baumes bestreiten will, so bleiben doch die Argumente des kritischen Realismus für den makrophysikalischen Bereich ungeschwächt und geben uns somit das Recht, mit praktischer Gewißheit die „wirkliche“ Existenz des makrophysikalischen Tisches und Baums vorauszusetzen.

Wenn aber der Tisch als Ganzes jedenfalls existiert — was bedeutet es dann, daß bei der Beschreibung seiner mikrophysikalischen Feinstruktur die Bezugnahme auf das erkennende Subjekt, d. h. auf die Apparate, mit denen wir den Tisch untersuchen, notwendig wird? Soll das bedeuten, daß die ontologische Struktur des Subjekt-Objekt-Verhältnisses sich beim Eindringen in die Feinstruktur des Tisches verändert, und zwar ohne daß für diese Veränderung ein Grund anzugeben wäre? Hier dürfte doch die wahrscheinlichste und nächstliegende Annahme die sein, daß es die zunehmende Diskrepanz zwischen dem Aus-

²⁶ A. a. O. 66 f.

gangspunkt all unserer Begriffsbildung und dem zu erforschenden Objekt ist, die die Verwendung unserer makrophysikalischen Begriffe auf einen Rahmen einschränkt, der durch die jeweils verwendete Versuchsanordnung bestimmt und insofern „subjektbezogen“ ist. In diesem Sinn halten wir uns für berechtigt, den kritischen Realismus auch im Bereich der Mikrophysik nicht nur als möglich, sondern als nahezu ebenso wahrscheinlich wie im Bereich der Makrophysik anzusehen. —

Gemäß der beschriebenen Auffassung wollen wir also nicht eigentlich von einem Ort, einem Impuls, einer Energie usw. der Elementarteilchen sprechen, sondern nur annehmen, daß die Elementarteilchen gewisse Merkmale oder Eigenschaften besitzen, für die uns eben die adäquaten Begriffe fehlen und die dafür maßgeblich sind, welche Zeigerausschläge (oder Schwärzungspunkte und dergl.) sich bei einer Orts-, Impuls-, Energie-Messung usw. ergeben. Gewiß wird zwischen diesen Merkmalen und dem Inhalt der makrophysikalischen Begriffe Ort, Impuls, Energie usw. eine gewisse Verwandtschaft bestehen; sonst könnten die makrophysikalischen Körper, deren Eigenschaften sich ja aus dem Zusammenspiel aller „Merkmale“ der im Makrokörper enthaltenen Elementarteilchen ergeben, nicht tatsächlich einen Ort, Impuls, eine Energie usw. haben. Aber andererseits müssen wir unter Umständen wohl auch dann davon absehen, einem Elementarteilchen einen bestimmten Ort zuzuschreiben, wenn an dem Teilchen jener Meßprozeß vorgenommen wurde, den die Physik als „Ortsmessung“ bezeichnet, und darum das Teilchen in der quantenphysikalischen Ausdrucksweise einen bestimmten Ort „hat“; darauf weist uns wieder das Beispiel des Elektrons unter dem Mikroskop hin. Denn *vor* der Schwärzung der Photoplatte können wir dem Elektron jedenfalls keinen wirklichen Ort oder Impuls zuschreiben; das haben unsere Überlegungen S. 176 ergeben. *Nach* der Schwärzung aber ebensowenig; denn sonst hätte das Teilchen, das vor der Schwärzung keinen wirklichen Ort besaß, durch die Schwärzung einen solchen bekommen, und wir hätten wieder die Rückwirkung von der Platte auf das Elektron. Die quantenphysikalische Aussage „Das Elektron hat diesen Ort“ dürfen wir daher nur so interpretieren, daß wir sagen: An dem Elektron wurde der Meßprozeß vorgenommen, den die Physik als „Ortsmessung“ bezeichnet, und diejenigen Eigenschaften des Elektrons, die für den Ausfall dieses Meßprozesses maßgeblich sind, haben ein bestimmtes Resultat sich ergeben lassen und werden darum bei einer unmittelbar anschließenden „Ortsmessung“ wieder zu dem gleichen Resultat führen.

Wenn die Quantenphysik trotzdem einem Teilchen nach einer „Ortsmessung“ immer einen bestimmten Ort zuschreibt, so beschreibt sie folglich unmittelbar nicht die objektive Wirklichkeit selbst, sondern

eine Art *Modell* der Wirklichkeit — so freilich, daß alle aus dieser Modellbeschreibung ableitbaren Folgerungen durch anschließende Messungen verifiziert werden, weil eben die Modellbeschreibung im Grunde nur eine Kurzfassung der angegebenen umständlicheren Beschreibung des objektiven Sachverhalts darstellt. — Entsprechendes gilt für andere Meßprozesse. —

Um zum Beispiel des Elektrons unter dem Mikroskop zurückzukommen, so müssen wir wohl, um die Rück- bzw. die Vorauswirkung von der Platte auf das Elektron zu vermeiden, uns den Folgerungen, die Einstein aus der Existenz verschränkter Systeme zieht (S. 169), insofern anschließen, als wir dem Elektron schon vor jeder Messung die für die „Orts-“ und „Impulsmessung“ maßgeblichen Merkmale *gleichzeitig* zuschreiben. (Entsprechendes gilt natürlich auch für alle anderen Messungen.) Das genügt jedoch noch nicht, wenn wir nicht auch dem Lichtquant den *gleichzeitigen* Besitz von Merkmalen zuschreiben, die dafür maßgeblich sind, an welcher Stelle eine Schwärzung entsteht, wenn die Platte in der Brennebene bzw. in der Bildebene liegt. Dann wird man aber natürlich auch Merkmale annehmen müssen, die den Schwärzungspunkt festlegen, wenn die Platte irgendwo zwischen diesen beiden Ebenen liegt. Diese Merkmale brauchen jedoch nicht voneinander verschieden zu sein, wie Jordan meint²⁷, so daß wir zu einer unendlichen Anzahl voneinander verschiedener Merkmale kämen und damit unsere Annahme ad absurdum führten. Man könnte z. B., um lediglich eine Denkmöglichkeit zu erwähnen, annehmen, daß durch die Anfangsbedingungen des Versuches und durch allgemeine Naturgesetze eine Schar von Kurven festgelegt wäre, aus denen durch ein einziges „Merkmal“ des Lichtquants eine Kurve ausgewählt würde so, daß die Photoplatte jeweils im Schnittpunkt der Plattenebene mit dieser Kurve geschwärzt würde. Aber diese Annahme soll, wie gesagt, lediglich als eine Denkmöglichkeit hingestellt werden, um den Jordanschen Einwand als nicht allgemeingültig zu erweisen.

Andererseits müssen wir einem Teilchen, das hinter einem Schirm mit Öffnungen Interferenzerscheinungen zeigt, auch objektiv eine gewisse „Allgegenwart“ beim Durchgang durch den Schirm zuschreiben, wie dies oben begründet wurde; aber diese „Allgegenwart“ läßt sich gleichfalls in keinem der uns zur Verfügung stehenden Begriffe adäquat fassen. Der scholastische Begriff der „praesentia definitiva“ könnte vielleicht die Richtung angeben, in der ein entsprechender Begriff zu

²⁷ P. Jordan, Anschauliche Quantentheorie, Berlin 1936, 282 ff. Für den bei Jordan herangezogenen Durchgang von Licht durch Polarisatoren hat Fack, Hamburg, in einer noch unveröffentlichten Arbeit eine Denkmöglichkeit zur Konstruktion verborgener Parameter angegeben.

suchen wäre²⁸; es fragt sich jedoch, ob nicht schon der Inhalt dieses Begriffes einen mehr negativen (Leugnung der kontinuierlichen Ausdehnung) als positiven Charakter trägt. — Für eine Ortsmessung, die an einem solchen Teilchen vorgenommen wird, gilt wieder das, was wir oben allgemein über den Meßprozeß sagten; auf diese Weise vermeiden wir die Schwierigkeit des schlagartigen Sich-Zusammenziehens. —

Die Überlegungen, die wir im Voraufgehenden anstellten, tragen gewiß einen Zug des Konstruierten, lassen viele Fragen offen und können dem Physiker, dem es vor allem auf eindeutige Zuordnungsverhältnisse ankommt, wenig oder gar nichts bieten. Im Grunde dürfte dieser Zug des Konstruierten und Unbefriedigenden aber nichts anderes darstellen als den Ausdruck der Inadäquatheit all unserer Begriffe, mit denen wir an die Mikrowelt herantreten, und ist in ähnlicher Form überall dort zu finden, wo mit nur analogen Begriffen operiert werden muß (man denke etwa an die theologischen Schwierigkeiten, die sich aus dem nur analogen Charakter unserer Gotteserkenntnis ergeben). —

Die *Stellungnahme zur dreiwertigen Logik* Reichenbachs ergibt sich aus dem Gesagten. Zunächst könnte man daran denken, das Aussageverbot, das diese Theorie für die „unbestimmten“ Aussagen aufstellt, als Ausfluß der Inadäquatheit der in diesen Aussagen verwendeten Begriffe aufzufassen — so ähnlich wie wir es oben abgelehnt haben, einfachhin von einem „Ort“ der Elementarteilchen zu sprechen. Diese Auffassung läßt sich jedoch nicht durchführen; denn eine Aussage etwa über den Ort eines Teilchens ist gemäß der dreiwertigen Logik unmittelbar nach einer Ortsmessung nicht unbestimmt, sondern wahr oder falsch, während wir aus den oben angegebenen Gründen glauben, auch unmittelbar nach einer Ortsmessung dem Teilchen nur mit Einschränkungen einen bestimmten Ort objektiv zuschreiben zu können.

Man muß vielmehr beachten, daß Reichenbachs Logik ein Regelsystem sein will für die Sprache, in der die Quantenphysik sich ausdrückt²⁹. Die Quantenphysik, die dem Teilchen unmittelbar nach einer Ortsmessung immer einen bestimmten Ort zuschreibt, beschreibt aber damit nach unserer Auffassung nicht die Wirklichkeit selbst, sondern (unmittelbar) nur ein *Modell* der Wirklichkeit, während wir uns in den voraufgegangenen Überlegungen auf Aussagen über die Wirklichkeit selbst bezogen. Ist eine quantenphysikalische Aussage wahr oder falsch, so bedeutet dies, daß das betreffende Element der Modellvorstellung angewandt werden kann und alle daraus gezogenen Folgerungen durch spätere Messungen verifiziert werden; ist eine quantenphysikalische Aussage dagegen unbestimmt, so bedeutet dies, daß die

²⁸ Vgl. Anm. 12.

²⁹ A. a. O. 150, 194.

betreffende Seite der Modellvorstellung nicht angewandt und infolgedessen auch keine Folgerungen daraus gezogen werden können. Dies ist u. E. die Begründung des Reichenbachschen Aussageverbots für die unbestimmten Aussagen.

Betrachtet man also die Reichenbachsche Logik als ein Regelsystem für die quantenphysikalische Ausdrucksweise und sieht in der letzteren eine Beschreibung nicht (unmittelbar) der Naturwirklichkeit selbst, sondern eines Modells der Wirklichkeit, so ist gegen eine derartige Einführung einer dreiwertigen Logik nichts einzuwenden.

Schließlich macht unsere Auffassung die *Bedeutung des Positivismus* für die Entwicklung der Quantenphysik verständlich. Wenn sich die Aussagen der Quantenphysik unmittelbar nur auf ein Modell der Naturwirklichkeit beziehen, so sind im Rahmen einer solchen Modellvorstellung natürlich auch Annahmen gestattet (z. B. „komplementäre“ Verbindung einander widersprechender Modelle, Dreiwertigkeit der Logik usw.), die in einer Beschreibung der Wirklichkeit selbst unzulässig wären und Widerspruch von philosophischer Seite hervorrufen müßten. Gerade diese Freiheit zur Einführung aller nur brauchbar erscheinenden Annahmen stellt aber den eigentlichen Beitrag der positivistischen Leugnung aller Philosophie für die Entwicklung der Quantenphysik dar; wir sehen, daß der kritische Realismus gerade als „kritischer“ grundsätzlich nicht weniger zu geben vermag. Wenn trotzdem der Positivismus bei der Entwicklung der Quantenphysik eine so große Rolle spielte, dann wohl darum, weil bei ihm die Kritik im Vordergrund steht, während die Vertreter des kritischen Realismus normalerweise den Nachdruck mehr auf den Realismus ihrer Auffassung legen; der grundsätzlichen „Hemmungslosigkeit“ des Positivismus auf philosophischem Gebiet ist es zu verdanken, daß beim Aufbau der Quantenphysik Hemmungen philosophischer Art überwunden wurden, die tatsächlich unberechtigt waren. (Man muß jedoch in diesem Zusammenhang auch bedenken, welche Einwände von dem älteren Positivismus gegenüber der Atomtheorie und von Mach gegenüber der Relativitätstheorie erhoben wurden!)