

Die Diskussion um die Interpretation der Quantenphysik

Von Wolfgang Büchel S. J.

Während die Diskussion um die Interpretation der Quantenphysik sich heute meist im Rahmen vorwiegend philosophisch orientierter Veröffentlichungen vollzieht, brachten die Jahre 1952 und 1953 wieder einige interessante Beiträge zu diesem Thema in physikalischen Fachzeitschriften — eine kleine Erinnerung an die lebhafteste Diskussion in der Zeit nach 1925/1926, dem Geburtsjahr der modernen Quantenphysik. Zwei philosophische Fragen stehen nach wie vor im Vordergrund:

a) Die Frage nach Determinismus oder Indeterminismus im anorganischen Bereich: Bedeutet die Unschärfebeziehung nur eine Grenze der Voraussagbarkeit oder einen realen Spielraum echter Unbestimmtheit des Naturgeschehens? Zur Begründung der letzteren Auffassung wird meist auf den *v. Neumannschen* Beweis für die Unmöglichkeit „verborgener Parameter“ und auf die in die gleiche Richtung zielenden Überlegungen von *Heisenberg* über den „Schnitt“ zwischen klassischer und quantenphysikalischer Beschreibung des Meßprozesses hingewiesen; vgl. Schol 27 (1952) 225 ff.

b) Die erkenntnistheoretische Frage, ob die quantenphysikalische Art der Naturbeschreibung mit einem erkenntnistheoretischen (kritischen) Realismus vereinbar sei oder nicht vielmehr zwangsläufig zu einer stärkeren Betonung des subjektiven Moments der Erkenntnis sei es in positivistischem, sei es in mehr idealistischem Sinn hinführe. Es ist das besonders von *v. Weizsäcker* herausgearbeitete Problem der „Nicht-Objektivierbarkeit“ der Quantenphysik: Es erscheint unmöglich, die quantenphysikalische Naturbeschreibung auf eine „an sich“, unabhängig vom Erkennenden Subjekt existierende objektive Naturwirklichkeit zu beziehen; die Abhängigkeit vom Erkennenden Subjekt scheint nicht nur für die Form, sondern auch für den Inhalt der quantenphysikalischen Naturbeschreibung konstitutiv zu sein. Vgl. Schol 28 (1953) 161 ff., vor allem 178 ff. — Das Problem ist nicht das gleiche wie bei der Relativitätstheorie, an die man vielleicht bei der Frage nach der Subjektivität der menschlichen Naturerkenntnis zunächst denken möchte. Denn nach der Relativitätstheorie sind zwar räumliche und zeitliche Größen, jeweils für sich betrachtet, vom Bewegungszustand des Beobachters abhängig und insofern subjektiv; aber diese subjektiven Bestimmungen lassen sich wenigstens mathematisch auf ein absolutes, objektives Relationsgefüge, die vierdimensionale Raum-Zeit-Welt, zurückführen und in diesem Sinn „objektivieren“. Gerade diese Rückführung auf ein objektives Relationsgefüge scheint aber bei der Quantenphysik unmöglich zu sein. Erst die Beachtung dieses Unterschiedes macht es verständlich, daß gerade Einstein, der Begründer der Relativitätstheorie, sich im Namen der Objektivität der Naturerkenntnis gegen die übliche Interpretation der Quantenphysik wendet.

Die beiden Fragenkomplexe hängen eng miteinander zusammen: Stellt man sich auf den positivistischen, erkenntnistheoretischen Standpunkt, so hat es gar keinen Sinn mehr, nach einer hinter der erkenntnistheoretischen Unberechenbarkeit verborgenen seinsmäßigen Bestimmtheit des Naturgeschehens zu fragen. Vertritt man umgekehrt einen erkenntnistheoretischen Realismus, so scheinen gewisse von *Einstein* aufgewiesene Zusammenhänge im quantenphysikalischen Formalismus selbst die Annahme eines verborgenen Determinismus ziemlich unvermeidlich zu machen; es erscheint also schon vom Physikalischen her schwer möglich, die Annahme eines realen Unbestimmtheits-Spielraums im Naturgeschehen mit einem realistischen erkenntnistheoretischen Standpunkt zu verbinden, wie es verschiedentlich versucht

wird. Wegen ihrer Bedeutung seien die infolge ihrer mathematischen Einkleidung in philosophischen Kreisen vielfach unbekanntes Überlegungen Einsteins hier kurz wiedergegeben¹.

Das durch die Unschärfebeziehung aufgeworfene Problem lautet bekanntlich (bei Voraussetzung einer realistischen Erkenntnistheorie): Ist das Meßresultat *sowohl* einer Orts- *als auch* einer Impulsmessung, die an einem mikrophysikalischen Teilchen vorgenommen wird, seinsmäßig eindeutig vorausbestimmt? Oder schärfer, da man diese beiden Messungen nicht gleichzeitig genau vornehmen kann: Wenn man an einem Teilchen nach Belieben eine Orts- bzw. Impulsmessung vornimmt, ist dann für jede dieser Messungen das Resultat seinsmäßig eindeutig vorausbestimmt? Zur Beantwortung dieser Frage betrachtet Einstein zwei Teilchen, die einmal in Wechselwirkung miteinander gestanden haben, sich aber dann wieder voneinander trennen und in keiner physikalischen Verbindung mehr miteinander stehen. Die Wechselwirkung war von der Art, daß die Quantenphysik für die getrennten Teilchen sowohl die *Summe* ihrer Impulse als auch Größe und Richtung ihres *Abstands* voneinander genau angibt; dagegen ist sowohl der Ort des *einzelnen* Teilchens, für sich allein betrachtet, wie auch sein Impuls völlig „unbestimmt“. Wird nun an jedem Teilchen (einzeln) eine Impulsmessung vorgenommen, so muß die Summe der erhaltenen Werte (den von der Quantenphysik für die Impulssumme angegebenen Betrag ausmachen und würde es bei der praktischen Durchführung des Versuchs auch wirklich tun, wenn anders die Quantenmechanik überhaupt gültig ist); wird dagegen an jedem Teilchen (einzeln) eine Ortsmessung vorgenommen, so muß die Differenz der erhaltenen Koordinatenwerte den von der Quantenphysik für den Abstand der Teilchen vorausgesagten Wert ausmachen.

Einstein argumentiert nun folgendermaßen: Die Teilchen stehen in keinerlei physikalischem Zusammenhang mehr miteinander; ein Meßprozeß, den ich an dem einen Teilchen vornehme, wirkt also in keinerlei physikalischer Weise mehr auf den Zustand des anderen Teilchens ein. Wäre nun das Resultat etwa der Ortsmessungen seinsmäßig unbestimmt in der Art, daß es sich erst bei der tatsächlichen Vornahme der Ortsmessung zufällig entschiede, welches Resultat herauskommt, so könnte der von der Quantenphysik selbst behauptete streng gesetzmäßige Zusammenhang zwischen den Ortsmessungen nicht zustande kommen. Denn wenn etwa zuerst der Ort des Teilchens A gemessen wird, so wird durch den an A vorgenommenen Meßprozeß der Zustand des Teilchens B in keiner Weise verändert (kein physikalischer Zusammenhang zwischen den Teilchen!); d. h. das Resultat einer anschließend (oder auch gleichzeitig) an B vorgenommenen Ortsmessung ist nach wie vor rein vom Zufall abhängig. Wenn aber das Resultat beider Ortsmessungen rein vom Zufall abhängt, kann es nie zu einem streng gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen ihnen kommen. Infolgedessen muß man entweder entgegen aller physikalischen Erfahrung die physikalische Unabhängigkeit der Teilchen voneinander aufgeben und eine unmittelbare und zeitlose Fernwirkung zwischen ihnen annehmen, durch die im Augenblick der Ortsmessung an A der Zustand von B so verändert wird, daß jetzt das Resultat der Ortsmessung an B nicht mehr vom Zufall abhängt; oder man muß annehmen, daß bei beiden Teilchen schon vor jeder Messung das bei einer Ortsmessung herauskommende Resultat durch irgendwelche Eigenschaften eindeutig festgelegt war. Das gleiche gilt aber natürlich auch für die Impulsmessung. Infolgedessen bleibt nur die Wahl zwischen einer zeitlosen Fernwirkung und der Annahme, daß das Resultat *sowohl* der Orts- *als auch* der Impulsmessung schon bei jedem einzelnen Teilchen durch irgendwelche „verborgene Bestimmungsstücke“ festgelegt

¹ Physical Review 47 (1935) 777 ff. — Das Problem der „verschränkten“ Systeme wurde zwar schon in *dieser* Zeitschrift behandelt: Schol 28 (1953) 163 ff.; eine kurze Zusammenfassung dürfte dennoch nicht unangebracht sein.

ist². (Diese einschränkende Formulierung erscheint notwendig; denn daß die Teilchen gleichzeitig einen bestimmten Ort und Impuls im eigentlichen Sinn besäßen, kann man aus anderen Gründen — vor allem wegen der experimentellen Beweise für die sog. Wellennatur der Teilchen — kaum annehmen. Man wird daher das Ergebnis von Meßprozessen im allgemeinen in der folgenden einschränkenden Form deuten müssen: Diejenigen verborgenen Parameter, die für das makrophysikalische Resultat — d. h. für die Lage eines Schwärzungspunktes auf einer Photoplatte, die Einstellung des Zeigers eines Meßinstruments usw. — des als „Ortsmessung“ bezeichneten Prozesses verantwortlich sind, werden bei einer unmittelbar anschließend wiederholten „Ortsmessung“ zu dem gleichen Resultat führen bzw. bei Vornahme einer andersartigen Messung — etwa des „Impulses“ — deren Resultat in einer solchen Weise statistisch beeinflussen, wie es den Sätzen der Quantenphysik über die Beziehungen zwischen aufeinanderfolgenden Orts- und Impulsmessungen entspricht — wobei die „statistische“ Beeinflussung im Sinn einer über einem determinierten Unterbau errichteten Statistik zu verstehen ist.)

Gibt man aber die Existenz verborgener Parameter für den von Einstein betrachteten Fall zu, so ist kein Grund ersichtlich, sie für andere Fälle zu leugnen; denn die Besonderheiten des Einsteinschen Falls beziehen sich lediglich auf die Beobachtungsanordnung, nicht auf den physikalischen Zustand der Teilchen.

Bohr lehnt in seiner Antwort an Einstein³ wie dieser eine zeitlose Fernwirkung ab, stellt aber die erkenntnistheoretische Voraussetzung Einsteins, die Annahme einer „an sich“ existierenden objektiven Naturwirklichkeit, mit dem Hinweis auf die Nicht-Objektivierbarkeit der quantenphysikalischen Naturbeschreibung in Frage. Hier setzt, von Einstein angeregt, die Arbeit eines amerikanischen Physikers *D. Bohm* ein⁴, welche ein objektives, eindeutig determiniertes Elementarteilchen-Modell entwirft, das alle Ergebnisse der Quantenphysik liefert und so die verschiedentlich vertretene Auffassung von der grundsätzlichen inneren Widersprüchlichkeit eines derartigen Modells widerlegt. Bohm faßt die Elementarteilchen als Punkt-Korpuskeln auf, auf die außer den bekannten Kraftfeldern der klassischen Physik noch ein zusätzliches Kraftfeld einwirkt, das für die wellenhaften Erscheinungen verantwortlich ist. Punkt-Korpuskel und Wellenfeld sind also beide objektive Realitäten, und der Zusammenhang zwischen ihnen besteht in der „Führung“ der Korpuskel durch das Wellenfeld. Ist zu einem beliebigen Zeitpunkt der Zustand des Wellenfeldes und die Lage der Korpuskel im Wellenfeld gegeben, so ist damit alles weitere Geschehen eindeutig festgelegt. Bei dem augenblicklichen Stand der Quantenphysik kann jedoch die Lage der Korpuskel im Wellenfeld nicht völlig eindeutig festgestellt werden; weiter ist zu beachten, daß jedes Meßinstrument

² *O. C. de Beauregard* nimmt zur Wahrung des Indeterminismus an, daß nicht die Messung an A unmittelbar auf B einwirke, sondern er läßt von der Messung an A einen zeitlich rückwärts gerichteten Einfluß auf die frühere Wechselwirkung zwischen A und B ausgehen, durch den B schon bei dieser Wechselwirkung so beeinflusst wird, daß die zu der späteren Messung an A gehörige Größe bestimmt und die andere unbestimmt wird. Eine solche Umkehr der zeitlichen Reihenfolge im Ursache-Wirkungs-Verhältnis erscheint vom philosophischen Standpunkt aus wohl noch weniger tragbar als die Annahme einer unmittelbaren Fernwirkung; um aber dem Gedanken Beauregards gerecht zu werden, muß man ihn im Zusammenhang der völligen Symmetrie zwischen Vergangenheit und Zukunft sehen, wie sie im Formalismus der Relativitätstheorie besteht und durch die jüngere Entwicklung der Quantenphysik auch in diese Eingang fand. Auf diesen auch philosophisch sicher nicht unerheblichen Fragenkomplex kann jedoch hier nicht eingegangen werden. Vgl. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences* 236 (1953) 1632.

³ *Physical Review* 48 (1935) 696 ff.

⁴ *Physical Review* 85 (1952) 166 ff.; 180 ff.; 89 (1953) 458 ff.

gleichfalls aus Korpuskeln mit ihren Wellenfeldern besteht und das Resultat einer Messung nach der Bohmschen Theorie u. U. nicht nur von dem zu beobachtenden Objekt selbst, sondern auch von der Lage der Korpuskeln des Meßinstruments in ihrem Wellenfeld abhängt, die ihrerseits wieder nur statistisch bekannt ist. So kommt es zur Unschärfebeziehung als einer Grenze der Voraussagbarkeit des Naturgeschehens. Diese Grenze brauchte jedoch nicht absolut zu sein; es wäre denkbar, daß bei Raumdimensionen unter 10^{-13} cm, bei denen die gegenwärtige Quantenphysik ohnehin auf Schwierigkeiten stößt, Abänderungen der heutigen mathematischen Form der Wellengleichungen vorzunehmen wären, die eine genaue Bestimmung der Lage der Korpuskel gestatteten.

Eine große Wahrscheinlichkeit kann man dem Bohmschen Modell trotz seiner allseitigen mathematischen Durchführung allerdings wohl kaum zuschreiben. Einmal mit Rücksicht auf die *Aufspaltung des Wellenfeldes* beim Auftreffen auf Hindernisse, Durchgang durch Beugungsanordnungen usw. In diesen Fällen spaltet sich die Welle in mehrere auseinanderlaufende Teilwellen auf, und die Korpuskel läuft gesetzmäßig in eine dieser Teilwellen hinein. Was geschieht aber mit den übrigen Teilwellen? Bohm begnügt sich mit dem Hinweis, daß man für die Rechnung diese korpuskellosen Teilwellen außer acht lassen und so weiterrechnen kann, als ob die eine die Korpuskel mit sich führende Teilwelle allein da wäre. Das ist gewiß richtig, aber diese abgespaltenen Teilwellen stellen doch objektive Realitäten dar, wenn sie auch in keiner Weise mehr erkennbar und feststellbar sind; und da sich solche Abspaltungsprozesse seit Beginn der Welt in ununterbrochener Folge vollzogen hätten, müßte man neben der erkennbaren Welt der mit Korpuskeln verbundenen Wellen eine noch viel umfassendere „Schattenwelt“ korpuskelloser und darum unerkennbarer Teilwellen als ebenso real annehmen — eine Annahme, die natürlich nicht experimentell widerlegt werden kann, aber doch keine allzu große innere Wahrscheinlichkeit besitzen dürfte.

Ein zweites: Im oben beschriebenen Fall der von Einstein betrachteten beiden Teilchen tritt nach der Bohmschen Theorie tatsächlich eine *zeitlose Fernwirkung* auf, ebenso in anderen, ähnlich gelagerten Fällen. Denn bei einer Impulsmessung etwa am Teilchen A wird nach Bohm durch die Einwirkung des Meßinstruments der Impuls von A in unkontrollierbarer Weise verändert, und das Meßresultat gibt diesen veränderten Impuls an. Damit nun trotzdem die Summe der Impulsmessungen an den beiden Teilchen stets den von der Quantenphysik vorgeschriebenen Wert ergibt, muß gleichzeitig auch der Impuls von B so verändert werden, daß eine anschließend an B vorgenommene Impulsmessung (die dann den Impuls von B nicht mehr verändert) das passende Resultat liefert. Diese Einwirkung von A auf B erfolgt mit unendlich großer Geschwindigkeit. Der unmittelbare Widerspruch zur Relativitätstheorie, nach der die Lichtgeschwindigkeit nicht überschritten werden kann, wird einstweilen nur dadurch vermieden, daß die Unmöglichkeit der genauen Feststellung der Lage der Korpuskel im Wellenfeld in hier nicht zu erörternder Weise eine Ausnützung dieser Fernwirkung zur Signalübermittlung und damit eine Feststellung der durch den Bohmschen Ansatz wieder eingeführten objektiven Gleichzeitigkeit unmöglich macht. Sollte diese Unmöglichkeit bei einer Modifikation der Quantenphysik hinfällig werden, so wäre, meint Bohm, vielleicht auch eine entsprechende Abänderung der Relativitätstheorie zu erwarten — eine nicht sehr befriedigende Antwort.

Eine Schwierigkeit der Bohmschen Auffassung finden manche Kritiker auch darin, daß das Wellenfeld, im Gegensatz zu den klassischen Kraftfeldern, nur auf „seine“ zugeordnete Korpuskel und nicht auch auf andere, an der gleichen Stelle befindliche Korpuskeln wirkt, weiter darin, daß das Zusammenspiel der zu verschiedenen Korpuskeln gehörigen Wellenfelder im hochdimensionalen Konfigu-

rationsraum beschrieben werden muß. Aber das brauchte wohl nur zu bedeuten, daß hier eben ein neuartiger Typ von „Kraftfeldern“ in der Physik auftritt, für dessen Darstellung der Konfigurationsraum ein ebenso geeignetes mathematisches Hilfsmittel ist wie in der klassischen Physik der „Phasenraum“. Was den komplexen Charakter der Wellenfunktion betrifft, so würde Bohm wohl antworten, daß die Wellenfunktion in dieser Form wieder nur mathematisches Hilfsmittel zur Berechnung der eigentlich bedeutsamen reellen Größen sei⁵.

Nicht lange nach Bohm nahm auch *de Broglie* zum Problem der Interpretation der Quantenphysik in verschiedenen Arbeiten Stellung, die später zusammen mit früheren einschlägigen Arbeiten *de Broglies* und Beiträgen von *J. P. Vigié* in Buchform erschienen⁶. Aus dem für das Problem und die Geschichte der Interpretation der Quantenphysik äußerst aufschlußreichen Inhalt des Buches kann hier nur einiges herausgegriffen werden: *de Broglie* weist darauf hin, daß er den gleichen Gedanken wie Bohm schon 1927 als Theorie der „onde-pilote“ vortragen, dann aber fallen gelassen und sich, wenn auch mit Widerstreben, der allgemeinen „orthodoxen“ Deutung der Quantenphysik angeschlossen habe, weil er befürchtete, letzten Endes mit der „onde-pilote“ doch in Widerspruch zu experimentellen Gegebenheiten zu geraten. Ursprünglich hatte jedoch *de Broglie* eine etwas andere Auffassung vertreten, auf die er jetzt zurückkommen möchte. Denn wenn bei Bohm der Dualismus Korpuskel-Führungswelle als ein realer Dualismus aufgefaßt und die Führung der Korpuskel durch die Welle axiomatisch postuliert wird, so möchte *de Broglie* allein die Welle als real anerkennen und die Korpuskel durch eine Singularität der Welle, d. h. durch eine kleine Stelle extrem hoher Schwingungsweite ersetzen. Die „Führung“ dieser Singularität durch die übrige Welle soll sich rein aus den Wellengleichungen ergeben, ebenso natürlich auch das Zusammenhalten der Singularität beim Auftreffen auf Hindernisse, Durchgang durch Beugungsanordnungen usw. Zur Ermöglichung der mathematischen Durchführung dieses Gedankens müßten die Wellengleichungen der Quantenphysik ein wenig abgeändert werden, so allerdings, daß diese Abänderungen nur in unmittelbarer Nähe der singulären Stelle, also in Größenordnungen kleiner als 10^{-13} cm wirksam würden. Lösungen solcher Gleichungen, die die erwünschte Singularität beschrieben, kann *de Broglie* wegen der großen mathematischen Schwierigkeiten dieses Problems noch keine angeben. Er konnte jedoch zeigen, daß dieser Ansatz, wenn er sich durchführen läßt, eine einfache Ableitung des bekannten Pauli-Prinzips liefert: Es wäre der mathematische Ausdruck der Tatsache, daß mehrere gleichartige Teilchen ebenso viele Singularitäten einer und derselben Welle darstellten.

Eine Frage könnte man gegenüber dieser Deutung der Quantenphysik aufwerfen: Soweit ersichtlich, werden die *de Broglieschen* Singularitäten im wesentlichen auf den gleichen Bahnen geführt wie die Bohmschen Korpuskeln; müßte dann im Fall der von Einstein betrachteten beiden Teilchen bei *de Broglie* nicht auch die gleiche zeitlose Fernwirkung auftreten wie bei Bohm?

J. P. Vigié weist in seinen Beiträgen u. a. darauf hin, daß eine ähnliche Dualität von diskreter Korpuskel und kontinuierlichem Feld, wie sie bei Bohm als reale Dualität aufgefaßt wird, auch in der allgemeinen Relativitätstheorie auftritt: Auch hier stehen metrisches Feld und felderzeugende materielle Masse nebeneinander, und die „Führung“ der (kräftefreien) Masse auf den geodätischen Linien des Feldes wird axiomatisch postuliert. Es ist darum sehr verständlich, daß auch hier Be-

⁵ Im wesentlichen dasselbe wie zu dem Bohmschen Ansatz ist zu der von *M. Renninger* — Zeitschr. f. Physik 136 (1953) 251 ff. — vorgeschlagenen Auffassung zu sagen, die bei folgerichtiger Durchführung auf den Bohmschen Ansatz hinausläuft.

⁶ *L. de Broglie*, La physique quantique restera-t-elle indéterministe? Paris 1953, Gauthier-Villars.

mühungen im Gange sind, die materielle Korpuskel als Singularität des metrischen Feldes aufzufassen, deren Führung durch das Feld sich aus den Feldgesetzen ergibt. Am Ende solcher Bemühungen stände dann die Rückführung der Natur „à une substance unique, matérielle, describable géométriquement, dont les formes successives; en perpétuelle transformation, rendent compte de la prodigieuse diversité des phénomènes élémentaires“⁷.

Vom philosophischen Standpunkt aus ist noch die Begründung interessant, die de Broglie für seinen Standpunkt gibt. Auf die Frage, warum er sich so sehr um eine Neuinterpretation der Quantenphysik bemühe, wenn doch die übliche „orthodoxe“ allen physikalischen Anforderungen genüge, entgegnet er u. a.: „A cela, on peut d'abord répondre que le retour à des conceptions claires, cartésiennes, respectant la validité du cadre de l'espace et du temps, satisferait certainement beaucoup d'esprits.“ Denn von der „orthodoxen“ Interpretation gilt: „En effet, cette interprétation, . . . aboutit logiquement à une sorte de ‚subjectivisme‘ apparenté à l'idéalisme au sens des philosophes et elle tend à nier l'existence d'une réalité physique indépendante de l'observateur. Or le physicien reste instinctivement, comme Meyer-son l'a naguère fortement souligné, un ‚réaliste‘ et il a pour cela quelques bonnes raisons: les interprétations subjectivistes lui causeront toujours une impression de malaise et je crois que finalement il serait heureux de s'en affranchir.“⁸

Wird bei de Broglie der korpuskulare Charakter der Elementarteilchen auf den wellenhaften zurückgeführt, so versucht der Bonner Theoretiker *W. Weizel*⁹ das Umgekehrte: Gemäß seinem Ansatz gibt es in Wirklichkeit nur Korpuskeln; die Wellenerscheinungen treten erst bei der Betrachtung der durchschnittlichen Bewegung vieler Korpuskeln auf und sind von ähnlicher Natur wie die Schallwellen, die bei der Bewegung vieler Luftmoleküle entstehen. Weizel zeigt, daß sich die Wellengleichungen der Quantenphysik ergeben, wenn man die Elementarteilchen als Korpuskeln im Sinn der klassischen Mechanik auffaßt, die während ihres Fluges anhaltenden regellosen Störungen ausgesetzt sind. Die Natur dieser Störungen läßt Weizel offen und fordert nur, daß die Störungen im Mittel keinen Impuls übertragen und die Zahl und Art der Störungen von der Geschwindigkeit der fliegenden Teilchen unabhängig sei. Es könnte sich z. B. um die Einwirkung unbekannter und sonst unmerklicher, überall im Raum dicht verteilter Teilchen handeln, ähnlich etwa den hypothetischen Neutrinos; Weizel nennt sie in Anlehnung an gewisse Erscheinungen der Quantentheorie der Wellenfelder „Zeronen“.

Der Haupteinwand gegen die Weizelsche Deutung dürfte darin bestehen, daß Weizel bei seiner Ableitung der Wellengleichung von der Annahme ausgeht, daß sehr viele Elementarteilchen auf engem Raum zusammengedrängt sind, und zwar nicht unmittelbar, aber durch Vermittlung der Zeronen in Wechselwirkung miteinander stehen. Nur bei einer solchen Anhäufung vieler Teilchen hat nämlich die „Teilchenzahl pro Volumeneinheit“, die in der Weizelschen Ableitung eine wesentliche Rolle spielt, überhaupt einen physikalischen Sinn. Weizel glaubt zwar, es dürfe nicht allzu schwer sein, beim Übergang zur Betrachtung eines einzelnen Teilchens die Teilchenzahl pro Volumeneinheit durch die Anwesenheitswahrscheinlichkeit in dem betreffenden Volumen zu ersetzen und so den vollen Anschluß an die Quantenphysik zu gewinnen. Aber gerade dies erscheint fraglich, wie *L. Jánossy* in einer ungefähr gleichzeitig erschienenen Arbeit¹⁰ gegenüber allen Versuchen dieser Art mit dem Hinweis auf die auch bei Einzelteilchen auftretenden Interferenzerscheinungen bemerkt. Der Gedanke Jánossys deckt sich mit früheren Ausführungen in dieser Zeitschrift¹¹, auf die darum verwiesen sei.

⁷ A. a. O. 111.⁸ A. a. O. 20.⁹ Zeitschr. f. Physik 134 (1953) 264 ff.¹⁰ Annalen d. Physik 6. Folge 11 (1953) 323 ff.; bes. 335 f.¹¹ Schol 28 (1953) 172 Mitte.

Aus der Einleitung Weizels zu seiner Arbeit ist noch zu erwähnen, daß für ihn eine „kausale Interpretation“ der Quantenphysik mit ihrer Ableitung aus einem den Gesetzen der klassischen Physik unterliegenden Modell gleichbedeutend ist. Aus diesem Grund stellt für Weizel das Bohmsche Modell keine kausale Interpretation dar. Diese in Physikerkreisen nicht seltene einschränkende Bedeutung des Ausdrucks „kausale Interpretation“ ist zu beachten, wenn bei Diskussionen über das Kausalitätsproblem unnötige Mißverständnisse vermieden werden sollen.

Der Arbeit Weizels waren ähnliche Untersuchungen von *Fényes*¹² vorausgegangen, in denen vor allem gezeigt wurde, daß eine Unschärfenbeziehung von der gleichen mathematischen Struktur wie in der Quantenphysik schon bei den Diffusionsvorgängen der klassischen Physik auftritt. Da der v. Neumannsche Beweis für die Unmöglichkeit einer deterministischen Interpretation der Quantenphysik gerade von diesem Formalismus der Unschärfenbeziehung ausgeht, mußte er folglich auch im Fall der Diffusionsvorgänge gelten; dort liegen aber sicherlich „verborgene Parameter“ vor.

Jánossy faßt in seiner schon erwähnten Arbeit die Elementarteilchen wieder rein als Wellen auf, jedoch ohne die de Brogliesche Singularität. Er vertritt damit wohl im wesentlichen die gleiche Auffassung, wie sie *Schrödinger* in verschiedenen Aufsätzen¹³ äußerte, ohne daß jedoch bisher eine mathematische Durchführung dieses Ansatzes gegeben werden konnte.

Blickt man zusammenfassend auf die besprochenen Arbeiten zurück, so kann man wohl sagen: Die verschiedentlich aufgestellte Behauptung von der grundsätzlichen inneren Unmöglichkeit und Widersprüchlichkeit jeder irgendwie gearteten deterministischen Interpretation der Quantenphysik ist vor allem durch die Ansätze von Bohm und de Broglie widerlegt. De Broglie erklärt darum mit Bezug auf das v. Neumannsche Argument: „M. v. Neumann . . . a simplement montré que, si l'on admet les conceptions de base de l'interprétation purement probabiliste, on ne peut plus échapper à cette interprétation. Il y a donc là une sorte de cercle vicieux et le théorème de M. v. Neumann ne me paraît plus avoir la portée que je lui attribuais moi-même dans ces dernières années.“¹⁴

Andererseits zeigen die beschriebenen Versuche deutlich die Schwierigkeiten, die sich einer „objektivierten“ Interpretation der Quantenphysik entgegenstellen. Man muß daher fragen, ob sich die Forderung nach einer objektivierbaren Naturbeschreibung wirklich zwangsläufig aus einem realistischen erkenntnistheoretischen Stand-

¹² Zeitschr. f. Physik 132 (1952) 81 ff.; vgl. auch Naturwissenschaften 39 (1952) 568.

¹³ Vgl. z. B.: Was ist ein Elementarteilchen? Endeavour Bd. IX, Nr. 35, Juli 1950; Unsere Vorstellung von der Materie, in *L'homme devant la science*, Neuchâtel 1952, Ed. Baconnière; Are there quantum jumps? *British Journal for the Philosophy of Science*, 3 (1952) Nr. 10 u. 11.

¹⁴ A. a. O. 18. — Es ist allerdings zu beachten, daß bei den betrachteten Gegenbeispielen zu dem v. Neumannschen Argument die für ein im quantenphysikalischen Sinn „unbestimmtes“ Meßresultat entscheidenden Parameter u. U. nicht in dem zu beobachtenden Objekt selbst, sondern im Meßinstrument liegen. Das ist für die grundsätzliche Frage nach Determinismus oder Indeterminismus belanglos; es führt jedoch bei dem von Einstein betrachteten Gedankenexperiment und allgemein bei „verschränkten“ Systemen auf Fernwirkungen mit Überlichtgeschwindigkeit, und darum folgerten wir oben im Anschluß an die Einsteinschen Überlegungen, daß die entscheidenden Parameter Bestandteile des atomaren Gebildes selbst seien. Dem scheint zu widersprechen, wenn Weizel daran festhält, daß durch die v. Neumannschen Überlegungen der Satz bewiesen sei: „Mit der Quantentheorie steht in Widerspruch, daß die Vorgänge an einem atomaren System sich als gesetzmäßig determinierte Veränderungen an verborgenen Parametern beschreiben lassen, welche Eigenschaften des Systems selbst sind.“ Darauf dürfte zu

punkt ergibt. Uns scheint, nein. Denn ein gleiches Nicht-Objektivierbarkeits-Problem scheint uns schon bei der menschlichen Gotteserkenntnis vorzuliegen. Nicht-Objektivierbarkeit bedeutet, daß die von verschiedenen Standpunkten aus gewonnenen Teilbeschreibungen eines und desselben Objekts sich nicht zu einer Gesamtbeschreibung zusammenfügen lassen, sondern sich gegenseitig ausschließen. Dasselbe liegt aber auch bei der Übertragung der aus dem geschaffenen Bereich gewonnenen Begriffe, etwa der Gerechtigkeit und Barmherzigkeit, auf Gott vor, die zwangsläufig zum Widerspruch, z. B. zwischen unendlicher Gerechtigkeit und unendlicher Barmherzigkeit, führt, wenn nicht der Korrekturfaktor der Analogie eingeschaltet wird. Ein gleicher Korrekturfaktor dürfte aber auch bei der Erkenntnis der Mikrowelt erforderlich sein, wenn man bedenkt, daß wir auf das mikrophysikalische Einzelteilchen Begriffe anzuwenden versuchen, die an der Makrowelt, d. h. bei der Betrachtung des Durchschnittsverhaltens eines riesigen Kollektivs solcher Einzelteilchen gewonnen sind. Von daher ist es durchaus zu erwarten, daß sich diese Begriffe auf die Wirklichkeit der Mikrowelt nur mehr analog anwenden lassen bzw. daß ihre univoke Verwendung, wie sie der quantenphysikalischen Naturbeschreibung zugrunde liegt, zu den Widersprüchen der Nicht-Objektivierbarkeit führen muß. Unter dieser Rücksicht erscheint die Forderung de Broglies nach „conceptions claires, cartésiennes“ in ähnlichem Licht wie die entsprechende Forderung des Rationalismus hinsichtlich der Gotteserkenntnis.

Der skizzierte Gedanke, auf den Verf. schon früher hinwies¹⁵, wird ausführlich von F. Selvaggi¹⁶ herausgearbeitet. Selvaggi kennt allerdings die analogia attributionis nur in der Form der attributio extrinseca und kommt infolgedessen zu ihrer Abwertung gegenüber der analogia proportionalitatis, obwohl doch wegen der kausalen Begründung der Makrophysik in der Mikrophysik sicher auch eine analogia attributionis intrinsecae zwischen den mikrophysikalischen „verborgenen Parametern“ und den entsprechenden makrophysikalischen Bestimmungsstücken „Ort“, „Impuls“, „Energie“ usw. bestehen dürfte. Davon abgesehen kann man Selvaggi nur zustimmen und so in dem Analogie-Charakter der Erkenntnis der Mikrowelt die realistische Lösung des Nicht-Objektivierbarkeits-Problems sehen. Allerdings wird dann zu untersuchen sein, ob nicht in gewissen Beweisgängen naturphilosophischer Art eine Univozität der Naturerkenntnis vorausgesetzt wird, die von hier aus nicht mehr vertretbar erscheint. Für die Beantwortung von Einwänden ergibt sich als Folge dieses Analogie-Charakters eine ähnliche Situation

antworten sein: v. Neumann wollte ausdrücklich auch die Annahme ausschließen, daß der statistische Charakter der Quantenphysik in der Unkenntnis des genauen Zustands des Meßinstruments begründet sei; vgl. J. v. Neumann, Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik, Berlin 1932, VI 3, S. 233. (Verf. hat in einer früheren Arbeit — Scho 27 [1952] 237 f. — diesen Teil der Überlegungen v. Neumanns irrümllicherweise noch für zwingend gehalten.) Der Grundgedanke des versuchten Beweises ist der gleiche wie an der voraufgehenden Stelle des v. Neumannschen Buches (IV 2, S. 171), die sich ausdrücklich gegen die Möglichkeit verborgener Parameter wendet: Es wird vorausgesetzt, daß hinsichtlich des Determinismus-Problems die quantenphysikalische Wellenfunktion die beste grundsätzlich mögliche Charakterisierung des Zustandes eines materiellen Gebildes (Meßobjekt oder Meßapparat) darstelle. Gerade das ist aber die entscheidende Frage bei der Diskussion um die Interpretation der Quantenphysik, und da diese Grundvoraussetzung v. Neumanns durch das Bohmsche Modell eklatant widerlegt wird, kann der ganze Beweis jedenfalls in seiner vorliegenden Form nicht als zwingend anerkannt werden. — Vgl. auch im Text den letzten Satz des übernächsten Abschnitts.

¹⁵ Schol 28 (1953) 161; 179 ff.

¹⁶ Le rôle de l'analogie dans les théories physiques, in: Actes du XI^e Congrès International de Philosophie vol. VI, Amsterdam/Louvain 1953, 138 ff.

wie in der Gotteslehre: Es kann nicht mehr die positive Lösung der in einem Einwand formulierten Schwierigkeit verlangt werden, sondern es muß u. U. der Aufweis genügen, daß der vorgebrachte Einwand bei Berücksichtigung des Analogiecharakters der verwendeten Begriffe usw. nicht unbedingt schlüssig ist.

Abschließend ist noch ein Einwand zu erwähnen, den R. Haag¹⁷ gegen die Annahme eines objektiven, subjekt-unabhängigen Zustandes mikrophysikalischer Gebilde erhebt. Haag weist zunächst auf Schwierigkeiten hin, die entstehen, wenn man dem „Ort“ eines Teilchens einen objektiven, von der Vornahme einer Ortsmessung unabhängigen Sinn zuschreibt; gerade darum betonten wir aber oben, daß der makrophysikalische Begriff „Ort“ auf die mikrophysikalischen Parameter, die das Resultat einer Ortsmessung bestimmen, nur im analogen, nicht im univoken Sinn angewandt werden kann. Haag untersucht weiter, was sich aus den folgenden beiden allgemeineren Annahmen über die Objektivität mikrophysikalischer Zustände mathematisch ableiten läßt:

a) „Jedes System einer Gesamtheit“ (von Systemen) „befindet sich zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem und nur einem Zustand, der durch die Werte irgendwelcher Variablen, die wir kollektiv mit ξ bezeichnen, charakterisiert wird.

b) Macht man an einem System im Zustand ξ irgendein Experiment, so soll der Ausgang (ob statistisch oder determiniert) durch ξ allein bestimmt sein (Vollständigkeitsforderung).“

Haag kommt zu dem Ergebnis: „Die kleinste Mannigfaltigkeit der objektiven Zustände eines Systems, die mit der Vollständigkeitsforderung in Einklang ist, ist die Gesamtheit aller Wellenfunktionen.“ Das bedeutet also: Es muß wenigstens ebenso viele objektive Zustände des Systems geben, als es verschiedene Formen der Wellen- (Zustands-) Funktion gibt, und die mathematischen Beziehungen zwischen diesen verschiedenen objektiven Zuständen müssen den mathematischen Beziehungen zwischen den Wellenfunktionen wenigstens entsprechen.

Soweit bedeutet dies eigentlich nichts wesentlich Neues; denn daß die mathematischen Strukturen der Zustandsfunktion in irgendeiner Form Abbilder der mathematischen Struktur der Wirklichkeit sein müssen, folgt schon aus der experimentellen Bestätigung der quantenphysikalischen Naturbeschreibung. Zu weitgehend dagegen erscheint es uns, wenn Haag daraus schließt: „Es gibt (im wesentlichen) eine einzige Möglichkeit, die Vorstellung objektiver Zustände des Einzelsystems im Sinn der Forderungen a) und b) in der Quantenmechanik aufrechtzuerhalten. Diese Möglichkeit: die Auffassung von „ ψ “ (der Wellenfunktion) „als objektivem Ausdruck für den Systemzustand, ist bereits häufig diskutiert worden. Sie führt zu Schwierigkeiten, wenn man die Wechselwirkung zweier Systeme in Betracht zieht“; hier weist Haag auf die Heisenbergsche „Schnitt“-Überlegung (vgl. Schol 27 [1952] 229) und auf das eingangs beschriebene Einsteinsche Gedankenexperiment hin. Haag fügt noch hinzu: „Man kann sich natürlich beliebig viele umfassendere Zustandsmannigfaltigkeiten ausdenken, doch besteht dazu im Rahmen unserer Forderungen kein Anlaß, und es wird nichts dadurch gewonnen.“

Wird wirklich nichts gewonnen? Eine umfassendere Zustandsmannigfaltigkeit ist doch eine solche, deren Zustände außer den in der Wellenfunktion abgebildeten Strukturen noch weitere Strukturen, eben „verborgene“ Parameter besitzen, und gerade diese verborgenen Parameter dürften, wie oben ausgeführt, die Lösung der Einsteinschen Schwierigkeit und auch des Heisenbergschen „Schnitt“-Einwands bringen (denn wenn man bei der Schnitt-Überlegung auch schon im quantenphysikalisch beschriebenen Teil des Meßprozesses verborgene Parameter annimmt, so ist der Schnitt zwischen der quantenphysikalischen und der klassischen Teilbeschreibung nicht die Stelle, an der die Parameter *wirksam* sind, sondern lediglich die Stelle, an

¹⁷ Zeitschr. f. Naturforsch. 8 a (1953) 13 ff.

der sie in die *Beschreibung* des Meßprozesses aufgenommen werden; bei dieser Auffassung hat aber die willkürliche Verschiebbarkeit des Schnitts nichts Befremdliches mehr).

Weiterhin dürfte es auch noch wesentlich verschiedene Möglichkeiten geben, die Auffassung der Zustandsfunktion als Ausdruck des objektiven Systemzustands durchzuführen: Die Bohmsche, die de Brogliesche und die Weizelsche Auffassung (letztere im Fall großer Teilchendichte) sind doch wohl — in ontologischer Hinsicht — wesentlich voneinander verschieden, und trotzdem bringt bei ihnen allen die Zustandsfunktion objektive Züge der mikrophysikalischen Wirklichkeit, wenn auch nicht alle, zum Ausdruck. Infolgedessen erscheint es jedenfalls nicht als bewiesen, daß nicht auch noch andere Arten objektiver Zustände möglich sind, deren Strukturen denen der Zustandsfunktion entsprechen, die aber die Schwierigkeiten vermeiden, die den erwähnten Modellen anhaften. Allerdings ist es sehr wahrscheinlich, daß eine explizite Beschreibung dieser Zustände andere begriffliche Hilfsmittel erfordern würde, als sie unserer von der makrophysikalischen Erfahrung ausgehenden Begriffsbildung zur Verfügung stehen, und daß in diesem Sinn die Wiedereinführung einer objektiven Naturbeschreibung unmöglich ist.

Die Konkordanz „Veritatis et sobrietatis verba loquor“, ein Werk des Benedikt von Asinago O. P. oder des Thomas von Sutton O. P.?

Von Franz Pelster S. J.

Im Jahre 1913 hat P. Mandonnet¹ auf die Bedeutung der seit Échard in Vergessenheit geratenen Konkordanzen zur Lehre des hl. Thomas nachdrücklich hingewiesen. Sie stellen scheinbare oder wirkliche Gegensätze im Sentenzenkommentar und in der Summa einander gegenüber, suchen diese zu erklären und eröffnen damit einen Einblick in die Lehrentwicklung des Heiligen und die Auffassungen, die man im 13. Jahrhundert darüber hatte. Es sind für diese älteste Zeit drei: 1. *Die Concordantia dictorum Thomae*. Sie gibt sich als ein freilich unvollendetes Schriftchen aus der letzten Lebenszeit von Thomas aus. Mandonnet² weist sie dem Thomas von Sutton zu. Sie ist in den Werken des Heiligen oftmals gedruckt. Ein fehlendes Stück wurde von G. F. Rossi³ nach Cod. lat. 14546 der Pariser Nationalbibliothek und von F. Pelster⁴ nach Cod. 238 der Bibliothek Ste Geneviève Paris herausgegeben. 2. An zweiter Stelle stehen die *Articuli, in quibus frater Thomas melius in Summa quam in Scriptis dixit*. Die Schrift ist anonym, in England vor 1300 verfaßt⁵. In

¹ Premiers travaux de polémique thomiste: RevScPhTh 7 (1913) 245—255.

² A. a. O. 252—255.

³ Il Codice latino 14546 della Biblioteca Nazionale di Parigi con gli Opuscoli di San Tommaso, Piacenza 1952, 55—59.

⁴ Die Concordantia dictorum Thomae: Greg 4 (1923) 102—105. Schon vorher wurde in der Ausgabe von Vives dieses Stück hinzugefügt.

⁵ Für englischen Ursprung spricht, daß gerade die besten Hss direkt oder indirekt in England ihre Heimat haben. Vgl. auch den spezifisch englischen Ausdruck „in pede“ statt „in solutione“, worüber Näheres im Folgenden.