

Eine philosophische Antinomie der Quantenphysik

Von Wolfgang Büchel, S. J.

W. Heisenberg charakterisiert einmal die philosophische Problematik, die sich aus der Quantenphysik ergibt, mit folgenden Sätzen: „In diesen Bereichen der Atomphysik geht dann allerdings sehr viel von der früheren anschaulichen Physik verloren. Nicht nur die Anwendbarkeit der Begriffe und Gesetze jener Physik, sondern eigentlich die ganze Wirklichkeitsvorstellung, die der exakten Naturwissenschaft bis zur heutigen Atomphysik zugrunde gelegen hat. Mit dem Wort Wirklichkeitsvorstellung ist hier die Auffassung gemeint, daß es objektive Vorgänge gebe, die in Raum und Zeit in einer bestimmten Weise ablaufen, ganz unabhängig davon, ob sie beobachtet werden oder nicht. In der Atomphysik lassen sich die Beobachtungen nicht mehr in dieser einfachen Weise objektivieren, d. h. auf einen objektiven, beschreibbaren Ablauf in Raum und Zeit zurückführen.“¹

Die Wirklichkeitsvorstellung, welche mit den zitierten Sätzen getroffen ist, ist die kartesische Auffassung der Materie als der *res extensa*. Wenn diese Auffassung sich im Hinblick auf die Quantenphysik als revisionsbedürftig erweist, dann wird man naheliegenderweise zunächst nicht an eine Revision der „res“ denken, da ja „res“ für „ens“ steht und somit eine Revision der „res“ auf eine Revision des Seinsbegriffs hinausliefe. Man wird vielmehr eine Korrektur des „extensa“, d. h. eine neue Auffassung der Räumlichkeit und Zeitlichkeit der Materie, erwarten. Heisenberg freilich will mehr; er erklärt einige Zeilen weiter ausdrücklich, daß den Elementarteilchen „Existenz im eigentlichen Sinn“ nicht zugesprochen werden könne. Im gleichen Sinn schreibt C. F. v. Weizsäcker: „Das Objekt der quantenmechanischen Kritik ist gar nicht der Begriff des Kausalnexus, sondern der des ‚Dings oder Vorgangs an sich‘.“²

Dennoch schien es bisher möglich, sich auf eine Revision der Auffassung von Räumlichkeit und Zeitlichkeit der Materie zu beschränken. Man konnte etwa wie folgt argumentieren: Die Quantenphysik muß, wie auch N. Bohr und W. Heisenberg immer wieder betonen, die mikrophysikalischen Objekte mit Begriffen beschreiben, deren Elemente aus der räumlich-zeitlichen Erfahrung gewonnen sind, weil ja der physikalischen Naturbeschreibung kein anderes begriffliches Aus-

¹ W. Heisenberg in: *L'Homme et l'Atome* (Neuchâtel 1958) 37.

² C. F. v. Weizsäcker, *Zum Weltbild der Physik* (Stuttgart 1954) 76.

gangsmaterial zur Verfügung stehen kann. Wenn man nun annimmt, daß die objektiven Strukturen der mikrophysikalischen Objekte einen unräumlichen und unzeitlichen Charakter tragen, dann ist von vornherein klar, daß diese unräumlichen und unzeitlichen objektiven Strukturen mit den räumlich-zeitlichen Begriffen der Physik nur inadäquat beschrieben werden können. Diese Inadäquatheit wird sich in Erscheinungen von der Art ausdrücken, wie sie in der quantenphysikalischen Naturbeschreibung tatsächlich auftreten: darin, daß ein und dasselbe mikrophysikalische Objekt durch zwei sich gegenseitig ausschließende Bilder — Wellenbild und Teilchenbild — beschrieben werden muß, daß die Naturgesetze nur mehr statistisch erfaßt werden können usw. Durch den Verzicht auf die Räumlichkeit und Zeitlichkeit der Mikroobjekte schien folglich ein hinreichender Grund für das Auftreten der quantenphysikalischen Paradoxien angegeben. Nur wenn sich nachweisen ließe, daß dieser Grund in Wirklichkeit noch nicht hinreichend sei, könnte es als berechtigt erscheinen, an eine Revision des fundamentalen Begriffs der „res“, also des Seinsbegriffs, zu denken. Ein derartiger Nachweis schien aber kaum möglich; denn sobald man irgend etwas Konkretes über die objektiven Strukturen der Mikrowelt aussagen wollte, mußte man sie wohl doch wieder in raum-zeitlichen Bildern beschreiben, und damit war von vornherein die Basis für einen schlüssigen Beweis verloren.

Vor einiger Zeit hat jedoch der amerikanische Physiker *J. S. Bell* eine Argumentation vorgelegt, auf die man das eben Gesagte nicht mehr ohne weiteres anwenden kann. Der tragende Gedanke in der Argumentation Bells ist die Unabhängigkeit zweier Mikroobjekte voneinander, womit gemeint ist, daß die objektiven Strukturen des einen Objekts in keiner relevanten Weise auf die objektiven Strukturen des anderen Objekts einwirken. Dieser Begriff der Unabhängigkeit ist offenbar so abstrakt, daß er von der Unterscheidung räumlich-unräumlich noch gar nicht betroffen wird. Selbstverständlich muß auch Bell mit räumlich-zeitlichen Beziehungen operieren, um überhaupt den Anschluß an die Physik zu gewinnen. Aber es handelt sich dabei vor allem um die räumlich-zeitlichen Beziehungen nicht von Mikro-, sondern von Makroobjekten, und in der Makrowelt kann die Räumlichkeit und Zeitlichkeit, soweit sie hier bedeutsam ist, nicht gut in Frage gestellt werden. Wir wollen vorerst nicht auf Einzelheiten eingehen, da diese weiter unten ausführlich behandelt werden. Es sei nur darauf hingewiesen, daß man im Anschluß an die Gedanken Bells eine Argumentation aufbauen kann, die zumindest viel Verwandtschaft mit einer philosophischen Antinomie in dem Sinn hat, wie Kant dieses Wort in der Kritik der reinen Vernunft verwendet: Ausgangspunkt ist ein eindeutiger makrophysikalischer Tatbestand,

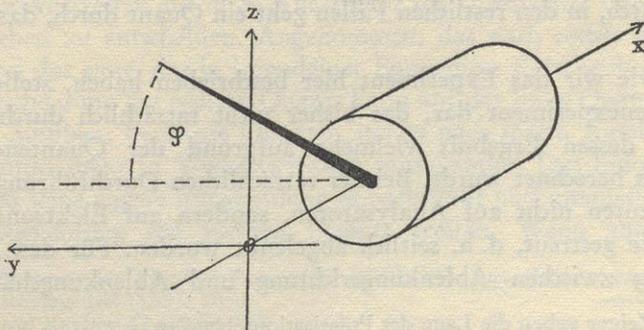
die Annahme der Unabhängigkeit zweier Elementarteilchen sowie die Voraussetzung, daß ein späteres Ereignis nicht wirkursächlich-determinierend auf ein früheres Geschehen einwirken und daß eine beobachtete statistische Regelmäßigkeit nicht auf den Zufall zurückgehen kann. Davon ausgehend läßt sich einerseits eine These, andererseits die entgegengesetzte Antithese ableiten. Man kann natürlich fragen, ob man nicht zur Vermeidung dieses Widerspruchs die Annahme der Unabhängigkeit der betreffenden Teilchen fallenlassen soll; doch das müßte der ganzen Sachlage nach als eine verlegene Ausflucht erscheinen, wie wir darlegen werden.

Die Gruppe von Experimenten, um die es sich handelt, stellt nicht irgendein Randphänomen der Quantenphysik dar, sondern sie faßt die philosophisch-erkenntnistheoretische Problematik, die der gesamten Quantenphysik zugrunde liegt, gleichsam wie in einem Brennpunkt zusammen und wurde darum in Fachkreisen seit je eingehend diskutiert. Trotzdem läßt sich alles Entscheidende so darstellen, daß die wesentliche Problematik auch dem Nichtphysiker zugänglich sein dürfte.

I. Das Experiment

Wir denken uns ein Koordinatensystem, bestehend aus einer x -, y - und z -Achse. Im Schnittpunkt der drei Achsen befindet sich eine Anzahl von Positronium-Atomen. Von ihnen brauchen wir nur zu wissen, daß sie nach einiger Zeit in je 2 Lichtquanten zerfallen, die nach entgegengesetzten Richtungen auseinanderfliegen. Wir wollen alle jene Lichtquantenpaare untersuchen, die in die Richtung der positiven bzw. negativen x -Achse fliegen. Zu diesem Zweck stellen wir auf der positiven und negativen x -Achse in einigem Abstand vom Nullpunkt je einen Polarisationsanalysator auf. Von diesem brauchen wir nur zwei Dinge zu wissen:

1. Wir denken uns jeden Analysator als ein zylindrisches Gebilde, dessen Achse mit der (positiven bzw. negativen) x -Achse zusammenfällt. Um diese Achse ist der Analysator drehbar.



Zum messenden Erfassen der Drehung ist an dem Analysator (an der Stirnfläche des Zylinders) ein Zeiger angebracht³. Wenn der Zeiger parallel zu der positiven y -Achse steht, dann liegt er in der Ebene, welche durch die x - und die y -Achse gebildet wird, bildet also mit dieser Ebene einen Winkel von 0° . Dreht man den Analysator um seine Achse, so schwenkt der Zeiger aus der x - y -Ebene hinaus und bildet mit ihr einen von Null verschiedenen Winkel. (Der Winkel beträgt 90° , wenn der Zeiger parallel zur positiven z -Achse steht.) Diesen Winkel zwischen dem Zeiger und der x - y -Ebene wollen wir bei dem einen Analysator als φ , bei dem anderen als ψ bezeichnen.

2. Wenn ein Lichtquant auf einen Analysator trifft, so geht es entweder zur Gänze durch den Analysator hindurch, oder es geht zur Gänze nicht hindurch. Eine dritte Möglichkeit, daß etwa nur ein Teil der Energie des Quants durch den Analysator hindurchginge, besteht nicht. Das Durchgehen bzw. Nicht-Durchgehen wird durch einen entsprechenden Apparat, der hinter dem Analysator aufgestellt ist, registriert.

Was geschieht nun, wenn ein beim Zerfall eines Positronium-Atoms entstandenes Quantenpaar auf die Analysatoren trifft? Das hängt von den Winkeln φ und ψ ab. Wenn $\varphi = \psi$ ist, dann geht immer ein Quant durch, das andere nicht. Ist dagegen $\varphi = \psi \pm 90^\circ$, dann gehen entweder *beide* Quanten durch, oder *beide* gehen nicht durch. Dazu ist freilich zu bemerken, daß dies nur für „ideale“ Analysatoren gilt, welche alle Quanten, die sie theoretisch durchlassen bzw. nicht durchlassen sollten, auch tatsächlich durchlassen bzw. nicht durchlassen. Von einem realen Analysator wird diese Forderung nie hundertprozentig erfüllt, aber durch einen entsprechenden technischen Aufwand kann man die Diskrepanz zwischen einem realen und einem idealen Analysator beliebig klein machen. Hierin ist also kein eigentliches Problem zu sehen.

Ist der Winkel φ weder gleich ψ noch gleich $\psi \pm 90^\circ$, dann gehen in einem gewissen Prozentsatz der Fälle beide Quanten durch bzw. nicht durch, in den restlichen Fällen geht ein Quant durch, das andere nicht.

So, wie wir das Experiment hier beschrieben haben, stellt es ein Gedankenexperiment dar, das bisher nicht tatsächlich durchgeführt wurde, dessen Ergebnis vielmehr aufgrund der Quantenelektrodynamik berechnet wurde. Bei der tatsächlichen Durchführung trafen die Quanten nicht auf Analysatoren, sondern auf Elektronen, von denen sie gestreut, d. h. seitlich abgelenkt wurden. Für den Zusammenhang zwischen Ablenkungsrichtung und Ablenkungshäufigkeit

³ Die Zeiger geben die Lage der Polarisationssebene an.

sagt die Quantenelektrodynamik ganz eigentümliche und von der klassischen Physik abweichende Beziehungen voraus, und diese wurden experimentell eindeutig bestätigt⁴. Die Ablenkungsbeziehungen bei der Streuung an Elektronen stellen aber im theoretischen Formalismus das genaue Gegenstück zu den Durchgangsbeziehungen beim Auftreffen auf Analysatoren dar; da die theoretischen Voraussagen für die Streuung eindeutig bestätigt sind, kann man folglich nicht bezweifeln, daß die Theorie auch für das Auftreffen auf Analysatoren richtige Aussagen macht.

II. These und Antithese

Betrachten wir den Fall $\varphi = \psi$. In diesem Fall wird, wie oben erklärt, mit Gewißheit eines der Quanten durchgehen, das andere nicht. Bei welchem Analysator das Quant durchgehen wird und bei welchem nicht, darüber macht die Quantenphysik keine Angaben. Im Gegenteil: Es ist nach der Quantenphysik *grundsätzlich nicht voraussagbar*, ob im Einzelfall bei dem rechten oder linken Analysator ein Quant durchgehen wird; es handelt sich hier um einen typischen Fall des grundsätzlichen quantenphysikalischen Indeterminismus.

Trotzdem kann man die *These* ableiten, daß es auch im Einzelfall eindeutig seismäßig festgelegt (wenn auch nicht voraussagbar) sein muß, bei welchem Analysator das Quant durchgeht und bei welchem nicht. Die Ableitung dieser These wurde zum erstenmal von *A. Einstein* zusammen mit *N. Rosen* und *B. Podolsky* gegeben. Diese Autoren betrachteten allerdings nicht das von uns beschriebene Experiment, sondern ein ähnliches mit gleicher Problematik⁵. Auf unser Experiment übertragen, lautet die Argumentation von Einstein-Rosen-Podolsky wie folgt:

Angenommen, die Quanten flögen auseinander, ohne daß schon entschieden wäre, ob das nach rechts oder das nach links fliegende Quant durch den Analysator hindurchgeht. Die Quanten wären also noch „frei“, sich beim Auftreffen auf ihren Analysator für Durchgehen oder Nicht-Durchgehen zu entscheiden. Angenommen, das nach rechts fliegende Quant sei das erste, das in irgendeiner Form diese Entscheidung trifft. Die Entscheidung des rechten Quants kann auf das linke Quant keinen Einfluß ausüben; denn die Quanten stehen nach ihrem Auseinanderfliegen nicht mehr in Wechselwirkung miteinander. Das linke Quant muß also seine eigene Entscheidung unbeeinflusst und unabhängig von der Entscheidung des rechten Quants treffen. Wenn aber beide

⁴ Wu-Shaknov in: *Physical Review* 77 (1950) 136; vgl. Bohm-Aharonov in: *Physical Review* 108 (1957) 1070.

⁵ *Physical Review* 47 (1935) 777.

Quanten ihre Entscheidungen unabhängig voneinander treffen, dann wird es in durchschnittlich der Hälfte der Fälle so kommen, daß *beide* Quanten durchgehen oder *beide* nicht durchgehen. In Wirklichkeit jedoch darf es bei $\varphi = \psi$ *nicht* vorkommen, daß beide Quanten durchgehen oder nicht durchgehen; es muß immer ein Quant durchgehen, das andere nicht. Also, so schließen Einstein und seine Mitarbeiter, muß man die Voraussetzung fallenlassen, von der die ganze Argumentation ausging, die Voraussetzung nämlich, daß es beim Auseinanderfliegen der Quanten noch nicht festgelegt sei, welches Quant durchgeht und welches nicht.

Man erkennt leicht, daß man eine gleichartige Argumentation für den Fall $\varphi = \psi \pm 90^\circ$ ansetzen kann, in welchem mit Gewißheit beide Quanten durchgehen oder nicht durchgehen. Es ergibt sich also: Bei dem Auseinanderfliegen der Quanten muß es in jedem Quant auf irgendeine Weise eindeutig festgelegt sein, wie sich das Quant verhält, wenn es auf einen Analysator trifft, der auf den Winkel φ bzw. ψ eingestellt ist. Dabei müssen den Quanten für die verschiedenen Werte, die die Winkel φ und ψ annehmen können, *verschiedene* „Befehle“ mitgegeben sein. Wenn nämlich die Quanten ohne Rücksicht auf die Werte von φ und ψ einfachhin etwa den „Befehl“ hätten, daß das rechte Quant durchgeht, das linke nicht, dann müßten die Quanten diesem „Befehl“ auch im Fall $\varphi = \psi \pm 90^\circ$ gehorchen; in diesem Fall gehen aber beide Quanten durch oder beide nicht.

Auf welche Weise die geforderte Festlegung der Quanten geschieht, darüber ist mit der beschriebenen Argumentation natürlich gar nichts ausgemacht. Es braucht nur *irgendeine* Festlegung zu sein, und darum konnte man glauben, daß die von Einstein abgeleitete These unwiderlegbar sei; denn zur Widerlegung hätte man — so schien es — irgendeine Voraussetzung über die konkrete Art der Festlegung machen müssen, und damit wäre stets nur diese spezielle Art von Festlegung ausgeschlossen gewesen. Hier nun liegt das Verdienst von *J. S. Bell*. Er hat in einer Überlegung von geradezu genialer Einfachheit gezeigt, daß die bloße Annahme einer wie auch immer gearteten Festlegung auf einen klaren Widerspruch zu den beobachtbaren statistischen Gesetzmäßigkeiten führt, welche für das Verhalten der Quanten gegenüber Analysatoren gelten⁶. Bell hat aus den dort auftretenden relativen Häufigkeiten eine Prozentzahl konstruiert, welche kleiner als 30 % sein müßte, wenn irgendeine Festlegung bestände; in Wirklichkeit beträgt die fragliche Zahl jedoch 70 %, und damit ist ein Widerspruch aufgewiesen, der durch keine Ungenauigkeit der Messung usw. weg erklärt werden kann. Für die Einzelheiten der Argumentation Bells muß auf den Anhang verwiesen werden. Es sei jedoch ausdrücklich

⁶ Physics 1 (1964) 195.

bemerkt, daß der Beweis Bells wesentlich verschieden ist von der Argumentation, mit der *J. v. Neumann* die Unmöglichkeit „verborgener Parameter“ in der Quantenphysik nachweisen wollte^{6a}. *v. Neumann* hat nur gezeigt, daß etwaige derartige Parameter *nicht beobachtbar* sein können, und hat insofern im Grunde nicht mehr geboten, als schon Heisenberg bei der Ableitung der Unschärfebeziehung geleistet hatte. Nur aufgrund des positivistischen Denkansatzes, der das Nicht-Beobachtbare als nicht existent betrachtet, konnte *v. Neumann* von einer „Unmöglichkeit“ verborgener Parameter sprechen. Bei Bell dagegen geht es ausdrücklich nicht um die Beobachtbarkeit, sondern um das bloße Vorhandensein einer verborgenen Festlegung; das ist das ganz Neue an Bells Argumentation.

III. Kopenhagener Interpretation

Der beschriebene Widerspruch von These und Antithese stellt für die „Kopenhagener Interpretation“ der Quantenphysik, d. h. für die philosophische Deutung, die von *N. Bohr*, *W. Heisenberg*, *C. F. v. Weizsäcker* und anderen vorgelegt wird, keine Antinomie, sondern vielmehr eine völlige Bestätigung ihrer Auffassung dar. *v. Weizsäcker* hat sogar schon lange vor Einstein diesen Problemkreis behandelt und die Deutung im Sinn der Kopenhagener Interpretation gegeben⁷. Nach der Kopenhagener Interpretation ist nur die Makrophysik der Bereich des „Faktischen“, des „Tatsächlichen“, in dem die „klassische“ Ontologie und damit die Sätze vom Widerspruch, vom ausgeschlossenen Dritten usw. gelten (vgl. jedoch dazu weiter unten). Die Mikrophysik dagegen ist der Bereich des Potentiellen, des Nur-Möglichen; nur durch die Wechselwirkung mit einem makrophysikalischen Meßinstrument geht ein Mikroobjekt aus der mikrophysikalischen Potentialität in die makrophysikalische Faktizität über. Dinge, die im Bereich des Faktischen widersprüchlich wären und sich gegenseitig ausschließen, können im Bereich des Nur-Möglichen sehr wohl miteinander koexistieren — weil sie dort eben nur verschiedene Möglichkeiten, nicht gegensätzliche Faktizitäten darstellen. Ein Elektron beispielsweise kann nicht in faktischer Wirklichkeit gleichzeitig sowohl ein korpuskulares Teilchen als auch eine Welle sein; es kann aber sehr wohl gleichzeitig die Möglichkeit besitzen, sich gegebenenfalls als Korpuskel oder als Welle im makrophysikalischen Bereich zu manifestieren. Dementsprechend ist nach der Kopenhagener Interpretation sowohl die Ableitung der obigen These als auch der Antithese unzulässig. Denn beide Argumentationen befassen sich mit

^{6a} *J. v. Neumann*, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, (Berlin 1932) 160—173.

⁷ *C. F. v. Weizsäcker* in: *Zeitschrift f. Physik* 70 (1931) 114; vgl. auch *N. Bohr* in: *Physical Review* 48 (1935) 696.

mikrophysikalischen Objekten, nämlich mit den Lichtquanten vor deren Wechselwirkung mit dem makrophysikalischen Meßinstrument, welches das Durchgehen bzw. Nicht-Durchgehen durch den Analysator anzeigt, und beide Argumentationen behandeln diese mikrophysikalischen Objekte so, als ob sie dem makrophysikalischen Bereich angehörten, in dem das harte Entweder-Oder des Widerspruchsprinzips gilt.

Für die Kopenhagener Interpretation stellt also der Sachverhalt, den wir diskutieren, kein Problem und keine Antinomie dar. Man könnte freilich fragen, ob die Kopenhagener Interpretation dafür nicht mit einer anderen Antinomie belastet sei: Sie gründet ihre Behauptung von der Nur-Potentialität des Mikrobereichs auf physikalische Gegebenheiten. Damit dieser Schluß faktisch-gültig sei und nicht selbst im Bereich des Nur-Möglichen bleibe, muß den betreffenden physikalischen Gegebenheiten faktische Realität zukommen. Diese Bedingung ist zunächst erfüllt; denn alle Gegebenheiten, auf die sich die Quantenphysik stützt, lassen sich letzten Endes zurückführen auf makrophysikalische Zeigerstände makrophysikalischer Meßapparate, und die Makrophysik ist ja auch nach der Kopenhagener Interpretation der Bereich des Faktisch-Realen.

Aber scheint nicht gerade in dieser Auffassung eine innere Inkonsequenz der Kopenhagener Interpretation zum Ausdruck zu kommen? Sie faßt den Makrokörper als eine rein kollektiv-summenhafte Zusammenballung von Mikroelementen auf; ein „Wesensunterschied“ zwischen Mikrowelt und Makrowelt, wie er etwa der aristotelischen Auffassung des Unterschieds zwischen Potentialität und Aktualität entspräche, ist der modernen Physik unbekannt⁸. Wenn aber die Makrowelt lediglich eine summenhafte Zusammenballung von Mikroobjekten darstellt, die ihrerseits einen nur-potentiellen Charakter tragen — wie kann dann die Makrowelt über den nur-potentiellen Charakter hinaus zu faktischer Realität gelangen?

Die Antwort sei anhand eines Vergleichs vorbereitet: Die Potentialität der Mikrowelt kommt in der „Doppelnatur“ der Elementarteilchen zum Ausdruck, gemäß der ein und dasselbe Objekt je nach den Umständen durch zwei sich gegenseitig ausschließende Bilder, das Wellenbild und das Teilchenbild, beschrieben werden muß. Diese Doppelnatur haftet nicht nur dem einzelnen Mikroobjekt an, sondern sie überträgt sich zwangsläufig auf jedes System und jedes Kollektiv von Mikroobjekten und damit letzten Endes auch auf den Makrokörper. Trotzdem ist die Makrophysik der Bereich der klassischen Physik, in der es keine Doppelnatur gibt. Ist das nicht ein Widerspruch?

⁸ Vgl. W. Büchel, Philosophische Probleme der Physik (Freiburg i. Br. 1965) 371ff.

Es ist kein Widerspruch, wenn man bedenkt, daß alle physikalischen Aussagen grundsätzlich nur Aussagen *im Rahmen der Meßgenauigkeit* sind. Wenn gesagt wurde, daß die Makrophysik der Bereich der klassischen Physik ohne Doppelnatur sei, so besagt dies: Im Rahmen der Meßgenauigkeit lassen sich in der Makrophysik keine Abweichungen von der klassischen Physik feststellen. Das ist aber auch nach der Quantenphysik völlig richtig; denn nach der Quantenphysik besitzen zwar auch die Makrokörper grundsätzlich eine Doppelnatur, aber die physikalischen Auswirkungen der Doppelnatur sind im makrophysikalischen Bereich im Verhältnis zu den dort meßbaren Größen so klein, daß sie sich jeder erreichbaren Meßgenauigkeit entziehen.

Auf diesem Hintergrund gesehen, bietet sich die logische und psychologische Begründung der quantenphysikalischen Aussagen über Mikroobjekte folgendermaßen dar: Die Quantenphysik geht aus von den makrophysikalischen Zeigerständen makrophysikalischer Meßinstrumente. Diese werden zunächst in „naiver“ Weise als faktisch-real unterstellt; zugleich ist sich der Physiker bewußt, daß sie mit jenen Grenzen der Meßgenauigkeit behaftet sind, die natürlich auch schon in der klassischen Physik mit jeder Meßaussage verbunden waren. In die Aussagen über die Mikrowelt, die aus den Zeigerständen der Meßinstrumente abgeleitet werden, geht folglich die Ungenauigkeit der diesbezüglichen Meßaussagen mit ein. Es zeigt sich aber dann, daß die grundsätzliche Behauptung der Doppelnatur der Mikrowelt von dem kleinen Ungenauigkeitsspielraum, der durch die Genauigkeitsgrenzen der Meßinstrumente bedingt ist, *logisch unabhängig* ist: Wenn man sich die Angaben der Meßinstrumente im Rahmen der Meßgenauigkeit variiert denkt, bleibt der grundsätzliche Schluß auf die Doppelnatur der Mikroobjekte völlig unberührt; lediglich einige physikalische Konstanten ändern ihren Wert um einen ganz kleinen Bruchteil. Hat man auf diese Weise die Doppelnatur der Elementarteilchen erschlossen, dann muß man natürlich rückschließend folgern, daß auch die Meßinstrumente, welche zunächst in „naiver“ Weise als faktisch-real, d. h. als doppelnatur-frei angesehen wurden, mit der Doppelnatur behaftet sind. Die dadurch bedingte Korrektur in der Auffassung der Meßinstrumente führt grundsätzlich zu Abweichungen von der klassisch-physikalischen Auffassung, aber diese Abweichungen sind so klein, daß sie unter den Rahmen der Meßgenauigkeit fallen. Infolgedessen wird der Schluß auf die Doppelnatur der Mikroobjekte von diesen Abweichungen ebensowenig berührt wie von den sonstigen Ungenauigkeiten der Meßinstrumente; der Schluß bleibt logisch verbindlich unabhängig davon, ob die Meßinstrumente als doppelnatur-frei oder doppelnatur-behaftet angesehen werden.

Grundsätzlich gesehen, trägt also nach der Kopenhagener Interpretation die *gesamte* Wirklichkeit einen nur-potentiellen Charakter, und das ist jene Modifikation des Seinsbegriffs, um die es diesen Autoren geht. Im makrophysikalischen Bereich wird diese Modifikation allerdings verwischt durch die Tatsache, daß im Rahmen der Meßgenauigkeit, der natürlich auch jede Sinneswahrnehmung unterliegt, alle Phänomene so sind, wie sie nach der „klassischen“ Ontologie sein müßten. Für den Physiker ist infolgedessen in der Makrowelt der Unterschied zwischen „klassischer“ und „moderner“ Ontologie irrelevant; er kann so tun und wird zweckmäßigerweise auch so tun, als ob es in der Makrowelt „echt klassisch“ zugehe, und er kommt so zu einem *scheinbaren* Wesensunterschied zwischen Mikro- und Makrowelt. In diesem Sinn ist es zu verstehen, wenn Bohr und Heisenberg als Physiker die Makrowelt für einfachhin faktisch-real erklären; bei v. Weizsäcker werden diese Verhältnisse viel nuancierter behandelt.

Das Vorstehende ist natürlich sehr summarisch und bedarf weiterer Präzisierung, aber eines dürfte klargeworden sein: Eine Auseinandersetzung mit der Kopenhagener Interpretation ist nur möglich von einem Punkt aus, der eindeutig als „echt klassisch“ nachgewiesen werden kann, d. h. bei dem die Möglichkeit einer bloßen Verwischung des Unterschiedes zwischen „klassischer“ und „moderner“ Ontologie explizit ausgeschlossen ist. Die Erfüllung dieser Forderung ist durchaus nicht trivial, auch wenn man etwa vom Selbstbewußtsein ausgeht. Denn jede Art von Bewußtsein ist mit physiologischen Prozeßabläufen verknüpft, und diese sind an sich aufs beste geeignet, die Feinheiten, um die es geht, zu verwischen; unser Bewußtsein kann ja nicht einmal zwei gleichartige Eindrücke voneinander abheben, welche um 0,1 Sekunden auseinanderliegen, obwohl es sich dabei durchaus noch um makrophysikalische Unterschiede handelt. Damit soll nicht ausgeschlossen sein, daß durch transzendente Reflexion oder auf andere Weise der Durchstoß zu einer „echt klassischen“ Ontologie möglich sei; es sollte aber betont sein, daß man sich mit der Kopenhagener Interpretation, so wie sie vor allem bei v. Weizsäcker vorliegt, gründlicher auseinandersetzen muß, als das bisher geschehen ist.

IV. Andere Lösungsversuche

Lehnt man die Kopenhagener Interpretation ab, so muß man irgendeine der Voraussetzungen fallenlassen, die bei der Ableitung der These oder der Antithese gemacht wurden.

1. Man könnte zunächst bezweifeln, daß die Quantenelektrodynamik für das Experiment mit Analysatoren zutreffende Aussagen mache, da das Experiment ja tatsächlich nicht mit Analysatoren, sondern

mit Streuung an Elektronen durchgeführt wurde. Derartige Zweifel haben sich aber bis jetzt auf die Dauer immer als unhaltbar erwiesen, solange es sich um jene Größenordnungen und Energiebeträge handelt, für die die Quantenphysik empirisch tausendfach bewährt ist, und das ist bei unserem Experiment der Fall. Es war ja in der Geschichte der Quantenphysik so, daß jene Experimente, welche die Doppelnatur der Elementarteilchen am zwingendsten zum Ausdruck bringen, nämlich die Beugungserscheinungen an einzelnen Teilchen und die Interferenzerscheinungen beim Durchgang von Elektronen durch mehrere Spalte, durch Jahrzehnte hindurch nur als Gedankenexperimente diskutiert werden konnten und erst 1949, 1957 und 1961 tatsächlich durchgeführt wurden⁹. Soweit die Realisierung der Gedankenexperimente im Herrschaftsgebiet des dialektischen Materialismus erfolgte, mag sogar die stille Hoffnung mitgespielt haben, Abweichungen von den Voraussagen der Quantentheorie zu entdecken und so den Diamat von den ideologischen Schwierigkeiten zu befreien, die ihm die Quantenphysik bereitete. Derartige Hoffnungen wurden jedoch immer enttäuscht, und darum scheint es auch in unserem Fall nicht ratsam, von dieser Seite her eine Auflösung der Antinomie zu erwarten. Es kommt hinzu, daß die Antinomie nicht nur bei dem einen Experiment auftritt, das wir beschrieben haben; es sind noch wenigstens vier weitere Gedankenexperimente aus den verschiedensten Gebieten der Quantenphysik bekannt, die zu der gleichen Antinomie führen¹⁰.

2. Man könnte daran denken, zwischen den auseinandergelaufenen Quanten eine verborgene Wechselwirkung anzunehmen, um so ihre Unabhängigkeit voneinander aufzuheben. Etwas Derartiges geschieht beispielsweise in einer von *D. Bohm* entwickelten Theorie, welche die Quantenphysik durch verborgene Parameter ergänzt, um auf diese Weise für Meßresultate, die nach der Quantenphysik grundsätzlich unvoraussagbar sind, eine seinsmäßige Vorausbestimmung zu erhalten¹¹. Für den Fall unserer beiden Quanten besagt die Bohmsche Theorie, daß in jedem der auseinanderlaufenden Quanten ein verborgener Parameter vorhanden ist, der aber noch keine endgültige Entscheidung über Durchgehen oder Nicht-Durchgehen beinhaltet. Die endgültige Entscheidung fällt erst, wenn der verborgene Parameter des einen Quants mit den verborgenen Parametern seines Analysators in Wechselwirkung tritt. Wenn diese Entscheidung gefallen ist,

⁹ Biberian-Suschkin-Fabrikant in: Doklady Akademii Nauk SSSR 66 (1949) 185; Jánossy-Naray in: Acta Physica Hungarica 7 (1957) 403; C. Jönsson in: Zeitschr. f. Physik 161 (1961) 454.

¹⁰ Vgl. Anm. 4, 5 und 7; außerdem M. Furry in: Physical Review 49 (1936) 393, 476.

¹¹ Vgl. Anm. 4.

wird durch eine Wechselwirkung, welche die Distanz zwischen den Quanten mit unendlich großer Geschwindigkeit überbrückt, der verborgene Parameter des anderen Quants so eingestellt, daß er das Ergebnis liefert, welches zu dem Verhalten des ersten Quants paßt. Als Bohm erkannte, daß seine Konzeption zu derartigen Folgerungen führt, hat er sie aufgegeben.

Den grundlegenden Einwand gegen jede Art einer solchen Wechselwirkung kann man wie folgt formulieren: Wir denken uns die beiden Analysatoren so weit von dem Positronium-Atom entfernt, daß die Flugzeit von dem Atom bis zu den Analysatoren fünf Sekunden beträgt. Wir stellen fest, wann das Atom zerfällt — etwa dadurch, daß wir das Atom mit langwelligem Licht bestrahlen, welches seitlich abgelenkt wird, solange das Atom vorhanden ist. Sobald das Atom zerfallen ist, schieben wir an seine Stelle, also zwischen die auseinanderlaufenden Quanten, eine Wand aus einem zunächst beliebigen Material. Wenn zwischen den beiden Quanten noch eine Wechselwirkung bestände, wäre zu erwarten, daß sie durch die dazwischengeschobene Wand zumindest irgendwie modifiziert würde. Verwendet man Trennwände aus den verschiedensten Materialien, so wäre also wenigstens irgendein Einfluß von der Art zu erwarten, daß die wechselseitige Zuordnung von Durchgehen und Nicht-Durchgehen jedenfalls nicht mehr so eindeutig „funktionieren“ würde wie ohne Trennwand. Die Quantentheorie erklärt jedoch, daß das Funktionieren der gegenseitigen Zuordnung von dem Einschieben einer Trennwand *grundsätzlich* nicht betroffen wird. Die Begründung dafür ist sehr einfach: Die Quantentheorie steht auf dem Boden der Relativitätstheorie, gemäß der eine Wirkungsübertragung über räumliche Distanzen hinweg höchstens mit Lichtgeschwindigkeit erfolgen kann. Wenn von dem Material der eingeschobenen Trennwand irgendein Einfluß auf die auseinandergeflogenen Quanten ausgeübt werden soll, so kann diese Einwirkung also höchstens mit Lichtgeschwindigkeit hinter den Quanten „hinterherlaufen“. Die Quanten fliegen aber selbst mit Lichtgeschwindigkeit voraus, und infolgedessen kann jegliche von der Trennwand ausgehende Einwirkung die Quanten niemals einholen und darum auch ihr Verhalten gegenüber den Analysatoren nicht modifizieren.

Es ist außerdem zu bedenken: Die für uns entscheidende Wechselwirkung zwischen den Quanten könnte erst in dem Augenblick einsetzen, in dem das erste Quant seinen Analysator erreicht und sich für Durchgehen oder Nicht-Durchgehen entscheidet. Würde nämlich die Abstimmung der Quanten aufeinander zu einem früheren Zeitpunkt erfolgen, dann wäre in *jedem* Quant schon *vor* Erreichen des Analysators für *jeden möglichen* Winkel des Analysators das Verhal-

ten eindeutig festgelegt, und das ist eben jene Annahme, welche Bell als mit den empirischen Befunden unvereinbar nachgewiesen hat. Man kann nun nach der Quantentheorie den Abstand zwischen den Analysatoren grundsätzlich beliebig groß machen, ohne daß dadurch das Funktionieren der gegenseitigen Zuordnung im Verhalten der Quanten irgendwie beeinflußt würde; denn diese Zuordnung beruht auf dem Satz von der Erhaltung des Drehimpulses, und darauf hat der Abstand zwischen den Analysatoren keinen Einfluß. Würde man die Zuordnung auf eine Wechselwirkung zwischen den Quanten zurückführen, so müßte deren Wirksamkeit folglich grundsätzlich unabhängig sein von der Größe der zu überbrückenden räumlichen Entfernung, und das ist bei keiner bisher bekannten physikalischen Wechselwirkung der Fall.

Will man bei dieser Sachlage an einer verborgenen Wechselwirkung zwischen den auseinandergelaufenen Quanten festhalten, so gibt es nur zwei Möglichkeiten: Entweder man nimmt eine Wechselwirkung an, die von jedem bekannten Material des eingeschobenen Schirms sowie von dem räumlichen Abstand zwischen den Analysatoren grundsätzlich nicht beeinflußt wird und die außerdem die Distanz zwischen den Quanten mit Überlichtgeschwindigkeit überbrückt (weil sonst eine von dem einen Lichtquant ausgehende Einwirkung das andere Quant nicht mehr einholen könnte). Die ursprüngliche Theorie Bohms führte zu solch einer absurden Annahme, und aus diesem Grund hat Bohm seine Theorie fallengelassen. Oder man bezweifelt die grundsätzliche Unabhängigkeit des beobachtbaren Verhaltens der Quanten von dem Einschieben der Trennwand, und dann gerät man in Widerspruch zur Quanten- und Relativitätstheorie und zieht sich die Schwierigkeiten zu, die wir oben unter Nummer 1 besprochen haben.

V. Zeitliche „Rückwirkung“

Den einzigen gangbaren Ausweg, der allerdings ebenfalls noch den überkommenen naturphilosophischen Auffassungen widerspricht, könnte folgende Überlegung weisen: Die Ableitung der Antithese basiert auf der Voraussetzung, daß die auseinanderfliegenden Quanten für *jeden möglichen* Wert der Winkel φ und ψ eine eindeutige Festlegung auf Durchgehen oder Nicht-Durchgehen in sich tragen. Würde man annehmen, daß die Quanten nur für den Winkel eine Festlegung in sich tragen, auf den der betreffende Analysator tatsächlich eingestellt ist, dann würde der Beweis der Antithese hinfällig. Überprüft man unter dieser Rücksicht den Beweisgang der These, so ergibt sich: Wenn man annehmen könnte, daß die Größe des Winkels, auf den der Analysator im Augenblick des Auftreffens des Quants eingestellt

ist, irgendeinen Einfluß auf das Geschehen bei der Entstehung der Quanten ausübe, dann würde die Argumentation der These nur ergeben, daß die Quanten für diese speziellen Winkel eine Festlegung in sich tragen müssen, und folglich würde die Voraussetzung für die Ableitung der Antithese entfallen. Es fragt sich also, ob man eine Einwirkung der Einstellung der Analysatoren auf das Geschehen bei der Bildung der Quanten annehmen kann.

Die wesentliche Schwierigkeit liegt in dem Umstand, daß die Flugstrecke der Quanten vom Ausgangspunkt bis zum Analysator und damit auch die Flugzeit beliebig groß gemacht werden kann. Während der Flugzeit kann die Einstellung der Analysatoren noch beliebig variiert werden; entscheidend ist erst die Einstellung in dem Augenblick, in dem das Quant auftritt. Man könnte etwa — durch ein makrophysikalisches Meßinstrument — feststellen, daß das Positronium-Atom zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr existiert, und man könnte weiter — wieder durch ein makrophysikalisches Meßinstrument — fünf Sekunden später feststellen, daß ein Quant auf einen Analysator auftritt. Wenn die Einstellung des Analysators bis zum Augenblick des Auftreffens des Quants beständig verändert wurde, müßte man folglich annehmen, daß die im Augenblick des Auftreffens vorliegende Einstellung einen irgendwie determinierenden Einfluß ausübe auf das Geschehen bei der Entstehung des Lichtquants, das sich doch — nach makrophysikalischer Zeitrechnung — fünf Sekunden *vorher* abspielte. Man käme also zu der Annahme einer Einwirkung von zukünftigem auf vergangenes Geschehen.

Diese Annahme ist jedoch nicht so abwegig, wie es auf den ersten Blick erscheint. Der Zerfall des Atoms und die maßgebliche Einstellung des Analysators stehen durch den dazwischenliegenden Flug des Lichtquants in einem Realzusammenhang miteinander, insofern das Quant beim Zerfall des Atoms entsteht und mit dem Analysator in seiner entscheidenden Einstellung in Wechselwirkung tritt. Der Flug des Quants ist ein mikrophysikalischer Einzelprozeß, und wir haben schon eingangs betont, daß man der Kopenhagener Interpretation wohl wenigstens so weit entgegenkommen muß, daß man die Kategorien des eigentlichen räumlichen Nebeneinanders und zeitlichen Nacheinanders für den mikrophysikalischen Bereich preisgibt. Infolgedessen kann man nicht sagen, daß die Entstehung des Quants im strengen und eigentlichen Sinn zeitlich vor seinem Auftreffen auf den Analysator liege; wir haben vorhin mit Absicht eine Formulierung gewählt, die lediglich zum Ausdruck brachte, daß die entsprechenden *makrophysikalischen* Instrumentenausschläge zeitlich voreinanderliegen. Man kann folglich nicht die Möglichkeit ausschließen, daß

innerhalb des unzeitlichen Vorgangs des Quantenflugs das „End“-stadium dieses Vorgangs, die Wechselwirkung mit dem Analysator, einen realen, aber nicht direkt beobachtbaren Einfluß auf das „Anfangs“-stadium, die Entstehung des Quants, ausübe.

Zugunsten einer solchen Annahme könnte man auf die Tatsache hinweisen, daß schon in der klassischen Physik, also vor der durch die Quantenphysik bedingten Relativierung der mikrophysikalischen Zeitlichkeit, die zeitliche Irreversibilität des anorganischen Naturgeschehens sehr stark den Eindruck eines nur makrophysikalischen Phänomens macht¹². Die zeitliche Irreversibilität des anorganischen Geschehens läßt sich nämlich in allen Fällen auf die Zunahme der Entropie oder verwandte Sachverhalte zurückführen. Die Zunahme der Entropie stellt aber ein wesentlich *statistisches* Phänomen dar, d. h., sie kann überhaupt nur als Eigenschaft eines *Kollektivs* vieler Elementarteilchen definiert werden. Bei einem Geschehen an einem einzelnen Teilchen, das nicht irgendwie in ein kollektiv-makrophysikalisches Geschehen (etwa in den Ablauf eines makrophysikalischen Meßprozesses) hineinverflochten ist, kann man von einer Zunahme der Entropie überhaupt nicht sprechen, und das legt zumindest die Annahme nahe, daß es bei einem derartigen mikrophysikalischen Einzelprozeß auch nicht jenen irreversiblen zeitlichen Richtungssinn gibt, der dem makrophysikalischen Geschehen zu eigen ist. Das gilt dann auch für jenen mikrophysikalischen Vorgang, der zwischen dem Entstehen des Quants und seiner Wechselwirkung mit dem Analysator liegt und den wir als „Flug“ des Quants bezeichnet haben.

Alle diese bisherige Kritik an der Zeitlichkeit der Mikroprozesse blieb freilich bei der *negativen* Aussage stehen, daß die Irreversibilität des zeitlichen Nacheinanders und des darin eingebetteten Determinierungszusammenhangs dem mikrophysikalischen Einzelgeschehen nicht zugeschrieben werden könne. Über solche nur negativen Aussagen gehen wir hinaus, wenn wir annehmen, daß das „End“-stadium des Vorgangs „Quantenflug“, die Wechselwirkung mit dem Analysator, einen realen determinierenden Einfluß auf das „Anfangs“-stadium, auf die Entstehung des Quants, ausübe; dies wäre die erste *positive* Behauptung einer mikrophysikalischen „zeitlichen Rückwirkung“.

Es scheint sogar, als ob auch dieser Lösungsversuch auf eine Antinomie, freilich an anderer Stelle, führe. Das zeitliche Nacheinander wurde seit je in metaphysisch-ontologischer Hinsicht gedeutet als Ausdruck einer unvollkommenen Einheit des zeitlichen Seienden, insofern dessen Sein in die verschiedenen Existenzmomente „auseinandergezogen“ ist. Betrachten wir unter dieser Rücksicht die Unzeitlichkeit der Mikrowelt, so müssen wir sagen, daß sie gegenüber dem

¹² Vgl. Büchel, a. a. O. 142.

eigentlichen zeitlichen Nacheinander einen höheren Einheitsgrad zum Ausdruck bringt, so daß wir richtiger nicht von Unzeitlichkeit, sondern von Überzeitlichkeit sprechen sollten.

Das läßt sich zunächst erkennen, indem wir die mikrophysikalische „zeitliche Rückwirkung“ vergleichen mit einem Phänomen, zu dessen Erklärung seit je eine irgendwie geartete Überzeitlichkeit als erforderlich angesehen wurde, nämlich mit dem natürlichen (menschlichen) Vorauswissen zukünftiger freier Ereignisse. Wir wollen hier nicht auf die Tatsachenfrage eingehen, ob es etwas Derartiges gibt; es geht uns augenblicklich nur um einen Wesenszusammenhang, den wir bei einer früheren Gelegenheit herauszuarbeiten versuchten¹³: Wenn es ein natürliches Vorauswissen zukünftiger freier Ereignisse gibt, dann bedeutet dies, daß der gegenwärtige Zustand der Psyche des Vorauswissenden durch ein zukünftiges Ereignis determiniert wird, und das kann wohl nur verstanden werden, wenn man dem Unbewußt-Physischen eine irgendwie überzeitliche Existenzweise zuschreibt. Damit soll eine Existenzweise gemeint sein, die irgendwie eine größere Einheitlichkeit aufweist als das „Auseinandergezogensein“ der eigentlich-zeitlichen Existenz und die aufgrund dieser größeren Einheitlichkeit in der Lage ist, das „auseinandergezogene“ echt-zeitliche Geschehen irgendwie „zusammenzufassen“ und so zwischen dem vorausgewußten Ereignis und dem gegenwärtigen psychischen Zustand des Vorauswissenden einen Realzusammenhang herzustellen, der einen determinierenden Einfluß des vorausgewußten Ereignisses auf die Psyche des Vorauswissenden ermöglicht. Für eine genauere Durchführung dieses Gedankens sei der Leser auf die angegebene frühere Studie verwiesen; im augenblicklichen Zusammenhang geht es lediglich darum, daß zur Ermöglichung einer „Vorausdetermination“ von gegenwärtigem Geschehen durch zukünftiges Geschehen nicht nur eine Unzeitlichkeit, sondern eine Überzeitlichkeit, also eine Existenzweise von größerer Einheitlichkeit als die des echt-zeitlichen Seins, angenommen werden muß. Bei der mikrophysikalischen „zeitlichen Rückwirkung“, um die es uns geht, liegen die Dinge aber genauso wie beim natürlichen Vorauswissen: Die Entstehung der Quanten muß „vorausdeterminiert“ sein durch jene Einstellung der Analysatoren, welche einige Sekunden später vorliegen wird, und zur Ermöglichung einer solchen Vorausdetermination muß man folglich nicht nur eine Unzeitlichkeit, sondern eine Überzeitlichkeit des mikrophysikalischen Geschehens annehmen.

¹³ Schol 30 (1955) 233. Wenn dort gesagt wurde, daß das makrophysikalische Geschehen einen im eigentlichen Sinn zeitlichen Charakter besitze, so ist das im Sinn der Ausführungen am Ende von Abschnitt III zu korrigieren: Auch das makrophysikalische Geschehen ist grundsätzlich unzeitlich, aber die Auswirkungen dieser Unzeitlichkeit sind nicht mehr erkennbar.

Noch von einem anderen und allgemeineren Gesichtspunkt aus läßt sich zeigen, daß die Unräumlichkeit und Unzeitlichkeit der Mikrowelt eine Überräumlichkeit und Überzeitlichkeit bedeutet. Zunächst bezüglich der Unräumlichkeit: Wenn die Physik ein Elektron durch das Bild eines kontinuierlich räumlich ausgebreiteten Wellenzuges beschreibt, dann bringt sie damit die Tatsache zum Ausdruck, daß das Elektron in einem räumlich ausgedehnten Bereich unmittelbar, d. h. ohne Zwischenschaltung anderer Agentien, Wirkungen ausüben und aufnehmen kann. Ein echt-räumliches Seiendes wäre dazu nur fähig, indem es den fraglichen Raumbereich in kontinuierlicher Ausdehnung erfüllte, wobei für das Kontinuierlich-Ausgedehnte der bekannte Satz gilt, daß das „continuum“ zwar „indivisum“, aber „sine fine divisibile“ ist. In der unbegrenzten Teilbarkeit kommt die unvollkommene Selbstidentität des echt-räumlich Seienden zum Ausdruck; gerade diese Teilbarkeit aber muß die Quantenphysik leugnen, weil Ladung, Masse usw. des Elektrons eine unteilbare und unzerlegbare Einheit bilden. Um diese Unteilbarkeit zum Ausdruck zu bringen, verwendet die Quantenphysik zusätzlich zum Wellenbild das Bild eines streng punktförmigen korpuskularen Teilchens; denn das Bild des Punktes stellt ja die einzige Möglichkeit dar, die grundsätzliche Unteilbarkeit und Unzerlegbarkeit in einem räumlichen Bild darzustellen¹⁴. Die Quantenphysik verwendet also das Wellenbild, um auszudrücken, daß ein Mikroobjekt einen ausgedehnten Raumbereich „beherrscht“; sie verwendet das Bild einer punktförmigen Korpuskel, um auszudrücken, daß diese Raumbeherrschung *nicht* zu jener Teilbarkeit und Zerlegbarkeit führt, wie es bei einem echt-räumlichen Seienden der Fall wäre; und das bedeutet eben, daß das Mikroobjekt eine Raumbeziehung von höherer Einheitlichkeit besitzt, als sie einem echt-räumlichen Seienden zukäme.

Entsprechendes gilt für den zeitlichen Geschehensablauf: Hier verwendet die Quantenphysik das Bild eines stetig-zeitlichen Geschehensablaufes zusammen mit dem Bild eines zeitlich streng punktuellen „Quantensprungs“, und der „Quantensprung“ stellt wieder die Leugnung jenes zeitlichen „Zerfließens“ dar, welches für ein echt-zeitliches Geschehen mit der „Beherrschung“ eines ausgedehnten Zeitintervalls verbunden wäre¹⁵.

Aus all dem ergibt sich wohl, daß wir in der Mikrowelt nicht nur von Unräumlichkeit und Unzeitlichkeit, sondern von Überräumlichkeit und Überzeitlichkeit sprechen müssen. Bei dem Makrokörper als Kollektiv von Mikroobjekten wird, wie am Ende von Abschnitt III dargelegt, die Überräumlichkeit und Überzeitlichkeit verwischt, d. h.,

¹⁴ Vgl. Büchel, a. a. O. 298 f.

¹⁵ Ebd. 327 ff.

ihre Auswirkungen sind im Rahmen der Meßgenauigkeit nicht mehr zu erfassen, und das entspricht der allgemeinen Tatsache, daß das „Niveau“ einer kollektiven Vermassung unter dem Niveau des einzelnen Individuums liegt. Aber grundsätzlich kommt auch noch dem Makrokörper eine Doppelnatur, also Überräumlichkeit und Überzeitlichkeit, zu, und damit steht er grundsätzlich ontologisch höher als ein echt räumliches und zeitliches Gebilde.

Dieser Sachverhalt spitzt sich zu einer Art Antinomie zu, wenn wir nach der Zeitlichkeit etwa jener psychischen Akte fragen, welche die psychische Komponente in einer Sinnesempfindung darstellen. Diese Akte werden erlebt als *echt*-zeitlich; sie stellen ja jene Erfahrungsgegebenheiten dar, aus denen der Begriff des echten und eigentlichen zeitlichen Nacheinanders abstrahiert wird. Wenn die psychischen Akte darüber hinaus echt-zeitlich *sind*, dann besitzen sie eine zeitliche Existenzweise, deren Einheitsgrad nach dem Obigen geringer ist als der des mikrophysikalischen und sogar noch des makrophysikalischen Geschehens. Es ergäbe sich dann, daß die materielle Komponente in der Sinnesempfindung, der physiologische Prozeßablauf, eine zeitliche Existenzweise von grundsätzlich höherem Einheitsgrad aufwiese als die psychische Komponente, während doch andererseits die psychische Komponente gerade jenes einheitstiftende Prinzip sein soll, welches die Sinnesempfindung überhaupt erst zu einer Erkenntnis, also zu einem *exercitium identitatis*, macht. Einen direkten Widerspruch brauchte etwas Derartiges vielleicht nicht zu bedeuten, aber in die übliche Metaphysik des Bewußtseins würde sich eine solche Annahme doch nicht ganz zwanglos einfügen.

Eine ganz ähnliche Problematik ergibt sich, wenn man die Tatsache eines natürlichen Vorauswissens zukünftiger Ereignisse anerkennt und zur Erklärung eine Überzeitlichkeit des Psychischen annimmt. Diese Überzeitlichkeit muß dem *Unbewußt*-Psychischen zugeschrieben werden; denn alle bewußten Akte, welche mit dem Vorauswissen verbunden sind, erscheinen als ganz ebenso zeitlich wie irgendeine Sinnesempfindung. Die bewußte Komponente im Vorauswissen erscheint also als zeitlich, während die unbewußte Komponente als überzeitlich angenommen werden muß, und das bedeutet, daß die unbewußte Komponente eine größere Einheitlichkeit der zeitlichen Existenzweise aufweist als die bewußte Komponente. Nach der traditionellen Metaphysik des Bewußtseins möchte man aber eher das Umgekehrte erwarten, da doch das Bewußte eine größere Selbstidentität besitzt als das Unbewußte.

Um die Schwierigkeiten aus der Quantenphysik zu vermeiden, könnte man zu der Annahme neigen, daß die psychischen Akte zwar als echt-zeitlich erschienen, d. h. erlebt würden, daß sie aber in Wirklichkeit ganz ebenso wie die parallellaufenden physiologischen Prozesse „verwischt überzeitlich“ seien. Damit hätte man aber im Bewußtsein selbst eine Diskrepanz von Erscheinungen und Wirklichkeit, während doch fast jede realistische Erkenntnistheorie davon ausgeht,

daß die im Bewußtsein gegebenen psychischen Akte jene Objekte seien, bei denen Erscheinung und Wirklichkeit nicht auseinanderfallen können. Auch das brauchte vielleicht keine unüberwindliche Schwierigkeit zu bedeuten; aber man erkennt doch, daß die Überzeitlichkeit des Mikrogesehens der Metaphysik des Bewußtseins eben darum ein Problem aufgibt, weil sie der Materie eine höhere Seinsidentität verleiht, als in der traditionellen Metaphysik vorgesehen ist.

Um diese Problematik etwas zu entschärfen, könnte man fragen, ob nicht der Rückgriff auf die *Überräumlichkeit* der Mikrowelt dasselbe wie die Heranziehung der Überzeitlichkeit leisten könne. Man könnte etwa auf die Überlegungen oben (Abschnitt IV, 2: verborgene Wechselwirkung zwischen den Quanten) zurückgehen und darauf verweisen, daß die Quanten wegen ihrer Unräumlichkeit gar nicht so räumlich voneinander getrennt seien, wie wir dort vorausgesetzt haben. Dazu ist zu sagen:

Die Unräumlichkeit der Mikroobjekte drückt sich physikalisch vor allem in folgendem aus: Um darzustellen, daß etwa ein Elektron eine unteilbare und unzerlegbare Einheit bildet, muß es durch das Bild eines punktförmigen und insofern räumlich-unteilbaren Korpuskels beschrieben werden. Dasselbe unteilbare Etwas kann aber in einem räumlich ausgedehnten Bereich unmittelbar, d. h. ohne Zwischenschaltung anderer Agentien, Wirkungen ausüben und aufnehmen; um dies darzustellen, wird das Elektron durch einen Wellenzug beschrieben, der den ganzen fraglichen Raumbereich erfüllt. Innerhalb dieses Raumbereiches kann man sich also das Elektron als „unteilbar allgegenwärtig“ denken. Außerhalb des von dem Wellenzug erfüllten Raumbereiches kann das Elektron jedoch nur durch Zwischenschaltung anderer Agentien Wirkungen ausüben und aufnehmen. Entsprechendes gilt von den auseinanderfliegenden Lichtquanten: Die Wellenzüge, innerhalb deren ein Quant „unteilbar allgegenwärtig“ ist, haben eine Ausdehnung von höchstens einigen Metern und entfernen sich mit Lichtgeschwindigkeit voneinander. Wenn die Quanten einen Einfluß aufeinander ausüben sollten, müßte folglich der Abstand zwischen den Wellenzügen durch ein dazwischengeschaltetes Agens überbrückt werden, und damit ergäbe sich im wesentlichen die gleiche Situation, wie wir sie in Abschnitt IV, 2 behandelt haben.

Wie man sich also auch gegenüber der Antinomie von Einstein-Bell verhalten mag, ob man sich für die Ontologie der Kopenhagener Interpretation entscheidet oder für eine „zeitliche Rückwirkung“: In jedem Fall ist ein Umdenken von Kategorien erfordert, dessen Auswirkungen sich zwangsläufig über die Quantenphysik hinaus erstrecken.

Anhang:

Der Unmöglichkeitsbeweis von J. S. Bell

Die Positronium-Atome befinden sich im 1S -Zustand, in dem die Spins von Elektron und Positron antiparallel eingestellt sind und der Bahndrehimpuls gleich Null ist. Wir wollen es als „Koinzidenz“ bezeichnen, wenn *beide* Lichtquanten durch die Analysatoren hindurchgehen oder *beide* gesperrt werden, als „Antikoinzidenz“, wenn ein

Quant hindurchgeht, das andere gesperrt wird. Dann ist die relative Häufigkeit der Koinzidenzen gegeben durch $\sin^2(\varphi - \psi)$, die relative Häufigkeit der Antikoinzidenzen durch $\cos^2(\varphi - \psi)$. (Das ist eine Folge der Erhaltung des Drehimpulses beim Zerfall des Positronium-Atoms.) Bezeichnen wir die Differenz zwischen der relativen Häufigkeit der Koinzidenzen und der der Antikoinzidenzen mit $D(\varphi, \psi)$, so gilt folglich

$$(1) \quad D(\varphi, \psi) = \sin^2(\varphi - \psi) - \cos^2(\varphi - \psi) = -\cos 2(\varphi - \psi)$$

Es sei nun im Sinn Einsteins angenommen, daß in dem Quant 1 eine verborgene Festlegung enthalten ist, welche für jeden möglichen Wert des Winkels φ jeweils festlegt, ob das Quant durchgeht oder nicht, und entsprechendes gelte für Quant 2 in bezug auf den Winkel ψ . Beide Festlegungen zusammen wollen wir als eine „Einstellung“ bezeichnen. Selbstverständlich sind verschiedene Einstellungen möglich. Wir wollen sie durchnummerieren, wobei aber jeder einzelnen Einstellung nicht nur eine einzige Nummer zugewiesen werden soll, sondern so viele Nummern, wie der statistischen Häufigkeit des Auftretens dieser Einstellung entspricht. Wenn beispielsweise die erste Einstellung doppelt so oft auftritt wie die zweite, dann werden der ersten Einstellung etwa die Nummern 1 bis 8, der zweiten die Nummern 9 bis 12 zugeteilt usw. Die Gesamtzahl der so erhaltenen Nummern sei N . (Wenn die verschiedenen Einstellungen eine kontinuierliche Mannigfaltigkeit bilden, werden entsprechend Integrale mit Dichtefunktionen angesetzt.)

Wir definieren ferner eine Funktion $A(\alpha, n)$ in folgender Weise: Es sei $A(\alpha, n) = +1$, wenn die Einstellung Nummer n bestimmt, daß Quant 1 durch den auf $\varphi = \alpha$ gedrehten ersten Analysator hindurchgeht; es sei $A(\alpha, n) = -1$, wenn die Einstellung n bestimmt, daß Quant 1 bei $\varphi = \alpha$ nicht durchgeht. Auf diese Weise ist also für jeden Winkel α und jede Nummer n ein $A(\alpha, n)$ festgelegt. In derselben Weise definieren wir für Quant 2 eine Funktion $B(\beta, n)$, welche gleich $+1$ oder -1 ist, je nachdem, ob bei der Einstellung n das Quant 2 durch den auf $\psi = \beta$ gedrehten zweiten Analysator hindurchgeht oder nicht.

Aus diesen Definitionen ergibt sich: Wenn bei der Einstellung n das Produkt $A(\alpha, n) \cdot B(\beta, n) = +1$ ist, dann ergibt diese Einstellung für $\varphi = \alpha$ und $\psi = \beta$ Koinzidenz in dem oben definierten Sinn; ist das Produkt $A(\alpha, n) \cdot B(\beta, n) = -1$, so ergibt die Einstellung n Antikoinzidenz. Wir können also die früher definierte Differenz $D(\varphi, \psi)$ ausdrücken durch

$$(2) \quad D(\varphi, \psi) = (1/N) \sum A(\varphi, n) \cdot B(\psi, n)$$

Nun gilt gemäß (1) und (2) für jeden beliebigen Winkel α :

$$D(\alpha, \alpha) = -1 = (1/N) \sum A(\alpha, n) \cdot B(\alpha, n).$$

Das ist aber nur möglich, wenn für jedes n gilt: $A(\alpha, n) = -B(\alpha, n)$.
Wir können also schreiben:

$$(3) \quad D(\alpha, \beta) = -(1/N) \sum A(\alpha, n) \cdot A(\beta, n).$$

Daraus folgt:

$$(4) \quad \begin{aligned} D(\alpha, \beta) - D(\alpha, \gamma) &= -(1/N) \sum [A(\alpha, n) \cdot A(\beta, n) - A(\alpha, n) \cdot A(\gamma, n)] \\ &= (1/N) \sum A(\alpha, n) \cdot A(\beta, n) \cdot [A(\beta, n) \cdot A(\gamma, n) - 1]. \end{aligned}$$

Die letzte Umformung ist darum gestattet, weil immer $[A(\beta, n)]^2 = 1$ ist.

Wir bilden nun den Absolutbetrag der beiden Seiten von (4).
Dabei beachten wir die allgemeine Regel

$$|\sum a_n \cdot b_n| \leq \sum |a_n| \cdot |b_n|.$$

In unserem Fall ist $|a_n| = |A(\alpha, n) \cdot A(\beta, n)| = 1$

$$|b_n| = |[A(\beta, n) \cdot A(\gamma, n) - 1]| = 1 - A(\beta, n) \cdot A(\gamma, n).$$

Unter Berücksichtigung von (3) ergibt sich folglich

$$(5) \quad |D(\alpha, \beta) - D(\alpha, \gamma)| \leq (1/N) \sum [1 - A(\beta, n) \cdot A(\gamma, n)] = 1 + D(\beta, \gamma).$$

Diese Ungleichung muß für jedes α , β und γ gelten, also auch für $\alpha = 0$, $\beta = 45^\circ$, $\gamma = 22,5^\circ$. Für diese Werte ergibt sich aus (1) und (5)

$$|0 + \cos(-45^\circ)| = 0,707 \leq 1 - \cos 45^\circ = 1 - 0,707 = 0,293,$$

und das ist ganz offensichtlich falsch.