

Freiheit im Atombereich?

Zur philosophischen Deutung des quantenphysikalischen Indeterminismus

Von WOLFGANG BÜCHEL S. J.

Die Diskussion um die Naturkausalität ist seit mehr als zwei Jahrzehnten, seit der Entwicklung der neueren Quantenphysik, nicht mehr zur Ruhe gekommen. Naturwissenschaft und Philosophie sind sich hier in einem für beide Teile gleich wichtigen Bereich nicht nur begegnet, sondern ihre Aussagen scheinen sich z. T. zu überschneiden. Dennoch dürfte es sich bei der Frage nach der Naturkausalität um ein im Kern philosophisches Problem handeln, dessen grundsätzliche Lösung in philosophischen Überlegungen gewonnen werden muß, wie in einer vorausgegangenen Untersuchung herausgestellt wurde.¹ Hier soll versucht werden, den dort entwickelten prinzipiellen Ansatz auf den konkreten Fall des quantenphysikalischen Indeterminismus zu übertragen.

Der Indeterminismus der heutigen Physik hat seine letzte Begründung in der Tatsache, daß die moderne Atomphysik zur Beschreibung ihrer Elementarteilchen, der Protonen, Neutronen, Elektronen, Photonen usw., zwei grundverschiedene, ja gegensätzliche Bilder gebraucht: das der Welle und das der Korpuskel. Auf diese sog. „Komplementarität“ des Wellen- und Korpuskelbildes muß darum zunächst eingegangen werden.

Das entscheidende experimentelle Anzeichen für den wellenhaften Charakter einer physikalischen Erscheinung ist die sog. Interferenz. Als Interferenz bezeichnet man es, wenn zwei Wellenzüge, die zusammentreffen, sich in gewissen Fällen gegenseitig verstärken, in anderen dagegen wechselseitig auslöschen. Ein solches gegenseitiges Sich-Verstärken oder -Auslöschen ist leicht verständlich, wenn man bedenkt, daß jedes Zusammentreffen eines Wellenberges des einen Wellenzuges mit einem Wellenberg des anderen offenbar einen doppelt so hohen Berg ergibt und gleicherweise jedes Zusammentreffen eines Wellental mit einem andern Wellental ein doppelt so tiefes Tal, während Wellenberg + Wellental sich gegenseitig ausgleichen. An den Stellen also, wo immer ein Wellenberg des einen Wellenzuges mit einem Berg des anderen zusammentrifft und darum auch Tal mit Tal, werden sich diese Wellenzüge gegenseitig verstärken; wo dagegen Wellenberg auf Wellental trifft und Tal auf Berg, müssen die Wellenzüge einander auslöschen. Wenn darum bei einer physikalischen Erscheinung solche Interferenzen auftreten, wenn es sich etwa bei den Lichtstrahlen zeigt, daß Licht + Licht nicht immer größere Helligkeit, sondern in gewissen Fällen auch Dunkelheit ergibt, so gestattet das einen unmittelbaren Rückschluß auf

¹ J. de Vries, Naturgesetzlichkeit oder Freiheit? Im Septemberheft des Jahres (Bd. 144, S. 489-496).

die wellenhafte Natur der betreffenden Erscheinung. Dabei meint „wellenhafte Natur“, daß in dem betreffenden Vorgang wesentlich eine räumlich-zeitliche Periodizität enthalten ist, ein räumlich-zeitlich periodisches Schwingen, ein räumlich-zeitlich periodisches Pulsieren; nur dadurch ist ja das gegenseitige Sich-Auslöschen zweier Lichtstrahlen erklärlich. Damit ist zugleich ein weiteres gesagt: Es gehört zum Wesen jedes Wellenzuges, daß er sich über einen mehr oder weniger ausgedehnten räumlichen Bereich hin erstreckt, über eben den Raumbezirk, den die Wellenberge und Wellentäler in ihrer Gesamtheit erfüllen; ohne eine solche räumliche Ausdehnung wäre ja das periodische Nacheinander von Wellenberg und Wellental gar nicht möglich. Wenn wir darum bei den Elementarteilchen eine derartige räumliche Periodizität finden, müssen auch die Elementarteilchen irgendwie räumlich ausgedehnt sein, müssen sich über einen gewissen Raumbereich hin erstrecken. Ein Gleiches gilt von der Erstreckung über eine gewisse Zeitdauer, die mit dem Begriff der zeitlich periodischen Schwingung gegeben ist. Zusammenfassend verstehen wir also unter „wellenhafter Natur“ eine räumlich-zeitliche Periodik, die als solche wesentlich die Erstreckung über einen gewissen räumlichen Bereich und über eine bestimmte zeitliche Dauer beinhaltet. Und da Interferenzerscheinungen nicht nur bei den Licht- und Röntgenstrahlen, sondern seit 1927 auch bei den sog. materiellen Elementarteilchen, Elektronen, Protonen, Neutronen, ja sogar bei ganzen Molekülen bekannt sind, ist die wellenhafte Natur all dieser Elementarteilchen experimentell erwiesen. (Zur Vermeidung von Mißverständnissen sei angemerkt, daß im Vorliegenden der Ausdruck „Elementarteilchen“ oder „Teilchen“ nicht wie im Sprachgebrauch der Physik als gleichbedeutend mit „Korpuskel“ verwandt werden soll, sondern lediglich als Sammelbezeichnung für Elektronen, Protonen, Photonen usw. gleichgültig, ob diese unter dem Korpuskel- oder Wellenbild erscheinen.)

Wenn also auch die wellenhafte Natur dieser Elementarteilchen experimentell erwiesen ist, so lassen sie sich doch nicht als „Wellen“ einfachhin bezeichnen; denn in einem entscheidenden Punkt zeigen sie ein Verhalten, das dem einer „förmlichen“ Welle geradezu entgegengesetzt ist und nur unter dem Bild einer Korpuskel erfaßt werden kann. Es handelt sich vor allem um den Ausstrahlungs- und Absorptionsvorgang, wie wir ihn etwa beobachten bei einem Lichtkörperchen, einem Photon, das von einem leuchtenden Atom ausgestrahlt wird und dann auf einen Leuchtschirm trifft. Wäre das Photon eine „wirkliche“ Welle, so würde die Lichtenergie, d. h. die Schwingungsenergie der Welle, im Lauf einer wenn auch sehr kurzen Zeitspanne nacheinander ausgestrahlt; sie würde sich nach allen Seiten hin verteilen, und schließlich träfe auf jeden Punkt des Leuchtschirmes ein gleich großer, oder besser gesagt, gleich kleiner Anteil der ausgestrahlten Gesamtenergie. In Wirklichkeit vollzieht sich jedoch der Ausstrahlungsvorgang nicht in dieser Form, son-

dern die gesamte Lichtenergie des Photons wird geschlossen, gleichsam mit einem Ruck, aus dem Atom ausgeschieden und ebenso geschlossen und ungeteilt an einem einzigen Punkt des Leuchtschirms abgegeben — gerade als ob sie zusammengeballt wäre zu einem „Energieklümpchen“, zu einer kleinen Korpuskel, die von dem Atom zum Schirm fliegt. Das ist es denn auch im wesentlichen, was als „korpuskuläre Natur“ der Photonen und allgemein der Elementarteilchen anzusprechen ist: Diese Ganzheit, Geschlossenheit und Unzerteiltheit, diese „atomare Struktur“ in der Übertragung von Energie (im weitesten Sinne genommen) und gegebenenfalls elektrischer Ladung; alle anderen noch angeführten korpuskularen Eigenschaften lassen sich wohl auf diese Ganzheit zurückführen oder auch vom Wellenhaften her erfassen.

Es liegt auf der Hand, daß die begriffliche Verbindung der beschriebenen wellenhaften und korpuskularen Natur der Elementarteilchen auf große Schwierigkeiten stoßen muß. Für die physikalisch-mathematische Behandlung hat man sich nach anfänglichem Schwanken für die sog. statistische Deutung der Materie- und Lichtwellen entschieden: Die Elementarteilchen werden aufgefaßt als Korpuskeln, die als solche ihre Ladung und Energie ganz und ungeteilt zusammenhalten, aber diesen Korpuskeln kann keine bestimmte Bahn zugeschrieben werden, längs derer sie sich bewegen, sondern es besteht immer nur eine gewisse Wahrscheinlichkeit, sie an diesem oder jenem Raumpunkt zu finden, und diese Wahrscheinlichkeit ist es, die durch die Welle gemessen wird: Wo sich die Wellen durch Interferenz verstärken, ist die Wahrscheinlichkeit für das Antreffen einer Korpuskel groß; wo sich die Wellen durch Interferenz schwächen oder auslöschen, ist diese Wahrscheinlichkeit gering oder verschwindend.

So unbefriedigend diese statistische Deutung der Materie- und Lichtwellen anmutet, so stellt sie doch, im Augenblick wenigstens, die einzige Möglichkeit dar, die entscheidenden Elemente das Korpuskelbildes (Ganzheit der Energieübertragung) und des Wellenbildes (räumlich-zeitliche Periodizität mit ihren Voraussetzungen räumlicher Erstreckung und zeitlicher Dauer) physikalisch-mathematisch miteinander zu verbinden.

Um die gleiche Synthese, wie sie die Theorie der „Wahrscheinlichkeitswellen“ auf der Ebene des mathematischen Symbols bietet, muß sich die philosophische Durchdringung für den Bereich des begrifflichen Verständnisses bemühen. Dabei ist der neu zu gewinnende Begriff der Raum- und Zeitbezogenheit des materiellen Seins von vornherein nicht im Gebiet des Anschaulich-Vorstellbaren zu suchen; solange man an der Forderung anschaulicher Vorstellbarkeit festhält, dürfte die Behauptung, die moderne Physik habe die Unmöglichkeit einer determinierten räumlich-zeitlichen Beschreibung der Elementarvorgänge erwiesen, zu Recht bestehen.

Die Lösung ist daher wohl zu suchen in einer analogen Verwendung von Begriffen, wie sie die philosophische Forschung entwickelt hat für die Raumbezogenheit (auf diese sollen sich die folgenden Ausführungen beschränken) übermateriellen Seins — pflanzliches und tierisches Lebensprinzip, Geistseele des Menschen —, von Seinsstufen also, deren Raumbezogenheit dem sinnlichen Vorstellungsvermögen gleichfalls unzugänglich ist. So dürfte z.B. die Art, in der die Seele als im Körper des Menschen gegenwärtig gedacht werden muß, bei analoger Übertragung auf die Elementarteilchen eine begriffliche Verbindung des korpuskularen und wellenhaften Elementes gestatten.

Die Seele muß aufgefaßt werden als im ganzen Körper gegenwärtig; denn jede Zelle wird zur lebenden Zelle nur durch die unmittelbare seinsmäßige Verbindung mit dem Lebensgrund der Seele. Andererseits läßt sich nicht annehmen, daß in den einzelnen Gliedern jeweils nur Teile der Seele gegenwärtig seien; ein solches Auseinanderfallen in Teile ist durch die Geistnatur der Seele ausgeschlossen. Die Seele muß also gedacht werden als ganz und ungeteilt gegenwärtig sowohl im Körper als Ganzem wie in jedem einzelnen Glied. In diesem Begriff der „*praesentia definitiva*“, wie ihn schon die Philosophie der mittelalterlichen Scholastik entwickelt hat, erscheinen so die beiden Momente miteinander verbunden, deren Gegensätzlichkeit das Problem der Raumbezogenheit des materiellen Seins ausmacht; Ganzheit und Ungeteiltheit auf der einen und Erstreckung über einen gewissen Raumbereich auf der anderen Seite. Überträgt man darum die „*praesentia definitiva*“ analog auf die Elementarteilchen, so müßte man diese auffassen als innerhalb des ganzen Bereiches, über den sich, physikalisch gesprochen, der zugeordnete Wellenzug erstreckt, überall gleichzeitig gegenwärtig, gleichzeitig ganz und ungeteilt, mit ihrer ganzen Energie, Ladung usw., und sie trügen in sich selbst das räumlich-zeitliche periodische Schwingen, das die Ursache der Interferenz darstellt.

Die Bedenken, auf diese Weise vielleicht die Grenzen zwischen materiellem und geistigem Sein zu verwischen, sind unbegründet; denn schon von der Scholastik selbst wurde der Begriff der *praesentia definitiva* angewandt auch auf das tierische und oft sogar pflanzliche Lebensprinzip — ein Zeichen, daß diese Art der Raumbezogenheit nicht auf den Bereich des Geistigen beschränkt ist. Außerdem kann ihre Übertragung auf die Elementarteilchen nur in der Form der Analogie geschehen, die in der Ähnlichkeit notwendig Unähnlichkeit besagt; so besteht eine entscheidende Unähnlichkeit darin, daß das Elementarteilchen aus sich selbst heraus raumbezogen ist, während die Seele aus ihrem eigenen Wesen heraus von jeder Raumbezogenheit frei und nur durch den Körper „im Raum“ ist.

Auf die physikalische und philosophische Deutung der Komplementarität des Wellen- und Korpuskelbildes mußte näher eingegangen wer-

den, weil an diesem Punkt der Indeterminismus der modernen Physik ansetzt. In welcher Form, läßt sich leichter als in grundsätzlichen Erörterungen an einem kleinen Gedankenexperiment zeigen, das zugleich zum besseren Verständnis des wellenhaften und korpuskularen Charakters der Elementarteilchen dienen kann.

Gegeben sei ein Lichtstrahl, der durch eine enge runde Öffnung (Blende) von vielleicht $\frac{1}{10}$ mm Durchmesser hindurchgeht und in einer Entfernung von etwa einem halben Meter auf einen Leuchtschirm trifft. Wir können dann auf diesem Leuchtschirm eine seitliche Abbeugung des Lichtstrahls feststellen, und wie sich aus anderen, ähnlich gelagerten Experimenten schließen läßt, tritt eine solche Ablenkung nicht nur ein bei einem ganzen Strom von Photonen, wie ihn unser Lichtstrahl darstellt, sondern schon bei einem einzigen Photon, das durch die Blende hindurchtritt. Die Abbeugung beruht auf Interferenz, ist also eine Auswirkung der räumlich-zeitlichen Periodik, die dem Photon wie allen Elementarteilchen eigen ist; und wie eine genauere Untersuchung zeigt, setzt die Art der Ablenkung voraus, daß dieses „Schwingen“ und „Pulsieren“ in dem ganzen Raum der Öffnung stattfand, durch die das Photon hindurchging — wird z.B. irgendeine Stelle innerhalb der Öffnung zusätzlich abgedeckt, so verändert sich die Form oder Intensität der ganzen Beugungserscheinung. Daraus ist zu schließen, daß auch das Photon selbst an allen Punkten der Öffnung gleichzeitig gegenwärtig gewesen sein muß.

Diese gleichzeitige Gegenwart darf jedoch nicht aufgefaßt werden nach Art einer „wirklichen“ Welle, deren Energie sich über den ganzen Bereich der Welle verteilt, gleichsam auseinanderfließt, sondern sie muß verstanden werden nach Art der *praesentia definitiva*, so, daß die Energie des Photons immer ganz und ungeteilt zusammenbleibt, daß das Photon mit seiner ganzen und ungeteilten Energie an jedem Punkt der Öffnung gegenwärtig ist. Das ergibt sich, wenn man unmittelbar hinter der Öffnung eine photographische Platte anbringt in der Form, daß dadurch die Blendenöffnung abgeschlossen wird. Die lichtempfindliche Schicht dieser Platte besteht im wesentlichen aus Bromsilbermolekülen, die bei Lichteinwirkung zerfallen und dadurch bei nachfolgender Entwicklung die Platte schwärzen. Es sei das Verhalten derjenigen Bromsilbermoleküle untersucht, die sich unmittelbar hinter der Blende, also praktisch in ihrer Öffnung befinden, und es sei zur Bestrahlung eine ganz schwache Lichtquelle gewählt, so daß pro Sekunde nur verhältnismäßig wenig Photonen auf die Platte treffen. Ein jedes Bromsilbermolekül braucht zum Zerfall eine bestimmte Mindestmenge an Lichtenergie, soviel, wie gerade der Energie eines Photons entspricht. Würden nun die wenigen Photonen, die in der Sekunde noch eintreffen, ihre Energie über die ganze Fläche der Blendenöffnung hin verteilen, so entfiel auf das einzelne Bromsilbermolekül jeweils vielleicht ein Milliardstel der Photonenenergie; es müßte daher

tagelang dauern, bis ein Molekül die zum Zerfall nötige Energie angesammelt hätte. Wäre dieser Zeitpunkt erreicht, dann müßten die Moleküle ziemlich gleichzeitig zerfallen, da sie ja jeweils gleiche Anteile an der Gesamtenergie erhielten. In Wirklichkeit vollzieht sich aber der Zerfallsprozeß in der Form, daß schon nach kurzer Bestrahlungszeit einige Moleküle, regellos innerhalb der Blendenöffnung verstreut, vollständig zerfallen, während die übrigen unverändert bleiben: Ein Zeichen, daß die wenigen eingefallenen Photonen ihre Energie nicht über die ganze Fläche der Öffnung hin verteilt, sondern sie ganz und geschlossen zusammengehalten und an die zerfallenen Moleküle abgegeben haben.

Warum aber gerade an diese Moleküle und nicht an die anderen? Mit dieser Frage ist das Problem des quantenphysikalischen Indeterminismus aufgeworfen. Denn für die scheinbar regellose Auswahl gerade dieser Moleküle kann die moderne Physik nicht nur keinen Grund angeben, sondern es hat sogar den Anschein, als ob ein Grund überhaupt nicht vorhanden sein könne, so daß irgendeine freie Wahlentscheidung des Photons heranzuziehen wäre. Verständlich wird diese scheinbare Unmöglichkeit einer inneren Begründung aus folgendem Gedankengang: Die Art und Form der Interferenzerscheinungen hinter der Blende setzt voraus, daß, physikalisch gesprochen die Schwingungsweite der zugeordneten Welle innerhalb der Blendenöffnung überall gleich groß ist; daraus ergibt sich gemäß der statistischen Interpretation der Photonenwelle eine überall gleich große Wahrscheinlichkeit für das korpuskulare Auftreten des Photons. Wäre nun im Photon irgendein innerer Grund dafür vorhanden, gerade an dieser Stelle energetisch wirksam zu werden, so würde für den betreffenden Punkt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Korpuskel zur Gewißheit, während sie für die ganze übrige Fläche verschwände — und gerade das ist mit der überall gleich großen Schwingungsweite der Welle unvereinbar. Hinzu kommt, daß es nicht genügen würde, dem Photon ein einziges derartiges „verborgenes Merkmal“ zuzuschreiben, wodurch der Ort seines korpuskularen Auftretens im Voraus festgelegt wäre. Man kann nämlich das Photon in entsprechenden Versuchsanordnungen wiederholt vor ähnliche, aber stets ein wenig veränderte „Wahlsituationen“ stellen, in denen sich auch experimentell ein jeweils etwas verschiedenes Verhalten beobachten läßt; es müßte also für jeden einzelnen dieser Fälle dem Photon von Hause aus ein verborgenes Merkmal mitgegeben sein, das seine Entscheidung bestimmt. Da grundsätzlich unendlich viele derartige Wahlsituationen möglich sind, müßten folgerichtig in jedem einzelnen Photon unendlich viele verborgene Merkmale enthalten sein.

Scheinen diese Überlegungen eine Deutung des quantenphysikalischen Indeterminismus im Sinne einer seinsmäßigen Unbestimmtheit (nicht nur erkenntnismäßigen Unbestimmbarkeit) des physikalischen Geschehens nahe-

zulegen, so wird oft dagegen eingewandt, daß damit die Grundlage jeder Naturgesetzlichkeit aufgegeben werde; aus dem absoluten Zufall könne sich niemals eine Gesetzmäßigkeit, auch nicht eine statistische, entwickeln. Dieser Einwand ist berechtigt, wenn unter der Unbestimmtheit des Geschehens absolute Willkür verstanden wird; er verliert jedoch seine Bedeutung gegenüber der Deutung der Unbestimmtheit im Sinne einer Wahlentscheidung der Teilchen. Bei einer solchen Wahlentscheidung kann sich, unbeschadet der Freiheit des einzelnen Wahlaktes, der Einfluß der Motive in der Form einer statistischen Gesetzmäßigkeit der Wahlergebnisse äußern — niemand wird wegen der Gesetzmäßigkeiten der Eheschließungsstatistik an der Freiheit der einzelnen Hochzeitspaare zweifeln —; diese „Motive“ wären im Fall der Elementarteilchen dadurch gegeben, daß für gewöhnlich (unser Beispiel der Blende stellt unter dieser Rücksicht einen Grenzfall dar) die Schwingungsweite der zugeordneten Welle für verschiedene Punkte auch verschiedene Werte hat, was man als eine „Bevorzugung“ gewisser Bereiche durch die Elementarteilchen deuten könnte; diese Verschiedenheit der Schwingungsweite und dementsprechend der Häufigkeit energetischer Reaktionen bildet ja tatsächlich die Grundlage der quantenphysikalischen Naturgesetzlichkeit.

Die Annahme einer Wahlentscheidung der Elementarteilchen läßt sich also, wie es scheint, nur widerlegen, wenn auf Grund anderweitiger Überlegungen feststeht, daß wirkliche Freiheit nur im Bereich geistigen Lebens möglich ist²; von Leben und erst recht von geistigem Leben zeigen sich bei den Elementarteilchen keine Anzeichen, und der Versuch Jordans, den quantenphysikalischen Indeterminismus mit dem Lebensproblem zu verknüpfen, hat von zuständiger biologischer Seite entschiedene Ablehnung gefunden.³ Aber auch dann ist es aus den oben angegebenen Gründen wohl nicht gut möglich, den Grund für das korpuskulare Auftreten des Photons gerade an dieser Stelle im Photon allein zu suchen. Man wird vielmehr daran anknüpfen müssen, daß sein „korpuskulares Auftreten“ ja immer eine energetische Reaktion mit irgendwelchen anderen Teilchen, in unserem Fall mit den Bromsilbermolekülen, bedeutet; für das Zustandekommen einer derartigen energetischen Reaktion ist aber nicht nur der Zustand des Photons selbst, sondern auch der der Moleküle, zwischen denen es „die Wahl hat“, entscheidend. Man könnte also hypothetisch annehmen, daß der Energieaustausch gerade mit dem Molekül zustande käme, dessen augenblickliche „energetische Disposition“ am günstigsten wäre. Da diese „energetische Disposition“ der einzelnen Moleküle von Fall zu Fall verschieden sein wird und für große Zahlen der Wahrscheinlichkeitsrechnung unterliegt, ergeben sich zwanglos die beobachteten statistischen Gesetzmäßigkeiten im korpuskularen Auftreten der

² De Vries a. a. O. S. 494 f.

³ Vgl. Max Hartmann, Quantenphysik und Biologie, Universitas 3 (Stuttgart 1948) 319.

Elementarteilchen. Wenn, wie es gewöhnlich der Fall ist, die Schwingungsweite der Welle von Punkt zu Punkt verschieden ist, so würde dem eine verschieden große konstante energetische Disposition auch im Photon selbst entsprechen, die zu der entsprechenden „Wahrscheinlichkeitsverteilung“ des korpuskularen Auftretens führt.

Indem so das Zustandekommen einer energetischen Reaktion nicht nur von dem Photon selbst, sondern auch von den beteiligten Molekülen abhängig gemacht wird, entfällt zugleich die Schwierigkeit der unendlich vielen verborgenen Merkmale, die die Entscheidung des Photons in den unendlich vielen möglichen Wahlsituationen bestimmen sollten. Denn jede neue Wahlsituation bedeutet ein Zusammentreffen mit jeweils neuen möglichen „Partnern“ einer energetischen Reaktion, zwischen denen die Auswahl zu treffen ist; außerdem ist gewöhnlich dann auch die energetische Disposition des Photons selbst, die sich in der Schwingungsweite der Welle ausdrückt, etwas verändert; das Zusammenspiel dieser Faktoren muß von selbst zu den jeweils verschiedenen beobachteten „Wahlentscheidungen“ führen.

Man könnte gegen die Hypothese solcher energetischer Dispositionen einwenden, daß dafür im Rahmen der heutigen Quantenphysik kein Raum sei. In der Tat beschreibt die Quantenphysik das Zusammenwirken eines Photons und eines Moleküls mathematisch-physikalisch richtig, ohne derartige energetische Dispositionen zu berücksichtigen, soweit sie nicht im Wellenbild zum Ausdruck kommen. Doch dürfte das nichts gegen die grundsätzliche Möglichkeit einer solchen Hypothese besagen. Der quantenphysikalische Formalismus beschreibt nämlich das Zusammenwirken eines Photons entweder mit einem einzigen Molekül oder mit einer Vielheit von Molekülen. Im ersten Fall wird die entscheidende Frage, warum Reaktion gerade mit diesem Molekül, schon als beantwortet vorausgesetzt; es ist darum leicht verständlich, daß die Faktoren, die zur Beantwortung eben dieser Frage angesetzt wurden, in der weiteren Beschreibung keine Verwendung mehr finden. Im zweiten Fall ergibt die Rechnung für jedes Molekül eine gewisse Zerfallswahrscheinlichkeit, wobei der Zerfall im einzelnen näher beschrieben wird; da aber tatsächlich nur ein Molekül zerfällt, erweist sich die Rechnung als unzulänglich gerade in dem Punkt, zu dessen Klärung die energetischen Dispositionen eingeführt wurden. — Man kann allerdings zugeben, daß es vielleicht infolge der eigentümlichen Struktur der Mikrophysik niemals, möglicherweise grundsätzlich nicht möglich sein wird, diese energetischen Dispositionen physikalisch zu erfassen, daß also die Frage danach physikalisch sinnlos und das Geschehen der Mikrophysik grundsätzlich indeterminierbar sei; aber es wäre Positivismus, eine physikalisch sinnlose Frage für überhaupt sinnlos zu erklären und aus der erkenntnismäßigen Undeterminierbarkeit auf eine seinsmäßige Undeterminiertheit des Geschehens zu schließen.

Schließlich sei noch kurz die Deutung der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelationen im Sinn der dargelegten Auffassung gegeben. Diese besagen bezüglich der räumlichen Lokalisation (auf die wir uns hier beschränken) der Elementarteilchen, daß bei gleichzeitiger Bestimmung von Ort und Geschwindigkeit die Geschwindigkeitsmessung um so ungenauer werden muß, je genauer die Ortsbestimmung wird, und umgekehrt. In dem oben gebrachten Beispiel des Lichtstrahls, der durch eine Blende geht, geschieht die „Ortsbestimmung“ mittels der Blende: Im Augenblick des Durchgangs muß jedes Photon irgendwo innerhalb der Blendenöffnung seinen „Ort“ gehabt haben. Die „Geschwindigkeit“ der Photonen, von der in diesem Fall nur die Richtung, nicht die Größe bestimmt wird, ergibt sich aus der seitlichen Ablenkung des Lichtstrahls, die auf dem Leuchtschirm zu beobachten ist. Dabei zeigt sich dann, daß sich der Lichtstrahl um so weiter seitlich auseinanderfächert, daß also die Geschwindigkeitsbestimmung um so ungenauer wird, je kleiner der Durchmesser der Blendenöffnung, je genauer also die Ortsbestimmung wird, und umgekehrt. Es handelt sich um eine wellenkinematische Erscheinung, die sich ohne weiteres aus der Untersuchung der Interferenzwirkungen ergibt und nur dadurch ihre Bedeutung erhält, daß es sich hier nicht um „wirkliche“ Wellen, sondern um die wellenhafte Seite der Elementarteilchen handelt. Aus diesem wellenhaften Charakter der Elementarteilchen wurde schon oben abgeleitet, daß ihnen eine Art *praesentia definitiva* zugeschrieben werden muß, daß man bei ihnen von „Ort“ und „Geschwindigkeit“ im strengen Sinn also gar nicht sprechen kann; die Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelationen sind der mathematische Ausdruck der Unzulänglichkeit dieser anschaulich-vorstellbaren Beschreibungsweise.

Zusammenfassend kann darum das eigentliche Problem des quantenphysikalischen Indeterminismus gesehen werden in der Schwierigkeit der Bildung und mathematisch-physikalischen Auswertung adäquater Begriffe für die unserer Anschauung so fernliegende Wirklichkeit der Mikrowelt; daß eine solche Schwierigkeit, in der Erkenntnistheorie höherer Seinsstufen altbekannt, auch für die Erkenntnis des materiellen Seins besteht, das lange als das unmittelbarste Gegebene galt: das ist die grundlegend neue Einsicht, die wir der Quantenphysik verdanken.