

# Weltanschauliche Konsequenzen der Physik

Von Walther Gerlach, München

Festvortrag zum VII. Fortbildungskursus für Ärzte des Regensburger Kollegium für ärztliche Fortbildung, gehalten am Donnerstag, dem 11. Oktober 1951, im Reichssaal in Regensburg.

Meine Damen und Herren!

*Hermann Helmholtz* fordert von dem Akademiker: „Vor allem soll jeder immer wieder Umschau halten, wie es mit der Arbeit für die ewigen Ziele der Menschheit in seinem Bereich bestellt ist.“

In diesem Sinne glaube ich den Auftrag deuten zu dürfen, über „Weltanschauliche Konsequenzen der Physik“ zu sprechen; er enthält zugleich die Voraussetzung, daß die Physik einen bestimmenden Einfluß auf die Weltanschauung ausgeübt hat und die Folgerung, daß diese in dauernder Entwicklung befindliche Wissenschaft auch die Weltanschauung weiter umgestalten wird. Doch wird das Wort Weltanschauung in so verschiedenem Sinn gebraucht, daß ein Mißverständnis allzu leicht möglich ist. Wer den Vortrag mit einer vorgefaßten Meinung hört, könnte das, was ich darlegen möchte, ganz falsch auffassen; er würde schon der Grundtendenz meiner Stellungnahme, die auf dem Boden der exakten Naturwissenschaft fußt, nicht folgen — und eine vorgefaßte Meinung gilt hier als eine der schweren Sünden! Wer aber die vielfältigen Inhalte des Wortes Weltanschauung kennt, mag sich schneller zurechtfinden, wenn er weiß, welcher Inhalt ihm hier gegeben werden soll.

Die Aufgabe der Physik ist es nun keineswegs, eine Weltanschauung zu begründen. Das was jede Wissenschaft zunächst anstrebt, ist die Gewinnung eines Weltbildes; ein solches Bild soll keineswegs einer Photographie entsprechen, welche alle Dinge nach Lage und Maß getreu darstellt. Das Weltbild enthält auch die ursächlichen Verbindungen der Vorgänge, es enthält die Auffassung, zu welcher die Wissenschaft über die Grundphänomene, das Reale und das Transzendente, gekommen ist, Hieraus folgt sofort, daß das Weltbild etwas sich leicht wandelndes sein kann — wenn nämlich die Erkenntnisse nach Breite und Tiefe zunehmen. Das Weltbild wird in bestimmter Weise auch einseitig sein: so wie eine Landkarte der physischen Geographie ganz anders aussieht, als eine nach politischen oder wirtschaftlichen Gesichtspunkten gezeichnete Karte, so ist das Weltbild eines Physikers ein anderes als das Weltbild des Historikers, ja auch als das Weltbild eines Biologen oder eines Mediziners oder eines Industriellen. Auch darin ist dieses Beispiel richtig: wie gewisse Beziehungen bestehen zwischen Gebirgen, Flüssen und Meeren und der politischen und wirtschaftlichen Gliederung, so sind wichtige Verbindungen zwischen den verschiedenen Wissenschaftsgebieten und damit auch ihren Weltbildern vorhanden.

Aber selbst wenn man all diese Weltbilder der Einzelwissenschaften zu einem einzigen vereinigen könnte, so hätte man noch lange nicht alles, was zur Weltanschauung gehört. Denn zu dieser gehören die Werte der Ethik und der Moral, die Werte des Schönen und des Häßlichen, des Guten und Schlechten, es gehört dazu alles was

im Seelischen liegt, das Sehnen, das Fürchten, das Hoffen, Liebe und Haß und nicht zuletzt der Glaube, jene eigenartige Verbindung, welche der Mensch zwischen dem Irdischen und dem jenseits des Irdischen liegenden, dem Transzendenten sich schafft.

All das steht außerhalb der Wissenschaft, sicher außerhalb der Naturwissenschaft und doch ist es für den einzelnen Menschen und für die Menschheit genau so wirklich wie die nachprüfbaren Ergebnisse der Arbeit des Verstandes. Aber die Grenze des Transzendenten wird durch den jeweiligen Entwicklungszustand des wissenschaftlichen Geistes bestimmt. Eine Grundfrage scheint mir daher die zu sein, ob wir die geistige Entwicklung des Menschen für sinnvoll halten, jene Entwicklung, welche so weite Bereiche, die früher zum Glauben, zur Religion gehörten, der rationalen, verstandesmäßigen Behandlung, dem Verstehen zugeführt hat. Es ist eine weltanschauliche Entscheidung größter Tragweite, wenn wir diese Frage bejahen. Denn wir sprechen damit die Überzeugung aus, daß es einen Fortschritt der Menschheit gibt und wir begründen sie allein mit dem Hinweis auf die Entwicklung der Kultur, der Humanität. Man läßt kranke Menschen nicht mehr in Schmerzen und Elend verkommen, man behandelt Menschen nicht mehr wie Arbeitstiere und achtet auch das Leben der Tiere, man verbrennt nicht mehr wissenschaftliche Entdecker auf dem Scheiterhaufen — erst mit der Entwicklung der Naturwissenschaften und der mit ihr einhergehenden Entwicklung eines neuen menschlichen Denkvermögens ist alles das verschwunden. Und wie tief diese weltanschauliche Umstellung in unser Inneres eingedrungen ist, erkennen wir an dem Entsetzen, das uns erfaßt, wenn wir einmal einen Rückfall in die Zeiten erleben, in denen solches selbstverständlich war.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse sind die Grundpfeiler unserer Kultur; sie tragen das Gebäude; und je höher es wachsen soll, desto mehr müssen neue Erkenntnisse als Träger eingebaut werden. Die Kultur aber ist der Ausdruck der Weltanschauung; deshalb kann und darf diese niemals im Widerspruch zu den Erkenntnissen der Wissenschaft stehen. Dieses ist die weltanschauliche Forderung, welche wir neben die weltanschauliche Überzeugung vom Fortschritt des Menschen setzen.

\*

Dieser Fortschritt beginnt für uns, als der Mensch die Vorgänge in der Natur nicht mehr auf ein den Körpern innewohnendes Streben, gleichsam das Wirken einer Seele zurückführte, sondern sie als totes Ding nahm und nach den Ursachen der Vorgänge außerhalb der Körper fragte. Der sichtliche Erkenntnisgewinn führte, wenn auch unter schweren Kämpfen, zu einer völligen Umgestaltung der Weltanschauung. *Aristoteles* sah im Fallen eines Steines die Auswirkung eines diesem innewohnenden Triebes, welcher verwandte Körper — Stein und Erde — zu einander hinzog. Das Aufsteigen der Flamme zeigte ihr Streben zum Himmel, in die ihr zukommende Region der Luft und des Lichtes. Aus der Beobachtung, daß ein Gas einen leeren, ihm dargebotenen Raum erfüllt, folgerte man die Angst der Materie vor einem leeren Raum, den horror vacui.

Demgegenüber setzte *Galileo Galilei* die Frage, wie die Vorgänge ablaufen und wurde damit zum Begründer der die Neuzeit entscheidend gestaltenden Forschungsrichtung, der exakten Naturwissenschaften — und er leitete diese mit einem sogar sehr entschiedenen Wort ein: „ich schätze das Auffinden einer einzigen, wenn auch unbedeutenden Wahrheit höher, als das Herumdisputieren über die höchsten Fragen.“ Wenn wir ihm heute in dieser Wertordnung auch nicht mehr unbedingt recht geben, so ist doch das Primat der Tat-

sache vor der Meinung, die Verpflichtung, die Tatsachen vor der Meinungsbildung, die Physik vor der Metaphysik zu studieren, weltanschaulicher Grundsatz geworden.

Das erste Problem, welches *Galilei* mit der neuen Forschungsart anging, war der freie Fall, durch die Messung, wie der Vorgang abläuft. Ihm folgte unmittelbar der Versuch, die Verbindung der gemessenen Größen — z. B. Fallstrecke und Fallzeit — in eine Formel, in ein Gesetz zu fassen. Der dritte Schritt war der Versuch, andere ähnliche Erscheinungen, die Pendelschwingung, die schiefe Ebene mit dem Gesetz des freien Falles zu verbinden.

Diese Überzeugung, daß innere Zusammenhänge auch zwischen äußerlich sehr verschiedenen Vorgängen bestehen können, führte schließlich *Newton* zur Verbindung der Fallgesetze mit den *Keplerschen* Gesetzen der Planetenbewegung durch das allgemeine Gravitationsgesetz. Wie groß dieser geistige Schritt war, die Erfahrung der handgreiflichen Umgebung auf die weiten Bereiche des Sonnensystems zu übertragen, mag man an einem Brief des Tübinger Gelehrten *Mästlin* an seinen Schüler *Kepler* ersehen, in welchem er ihm nicht nur rät, Vorsicht und Rücksicht auf jene Leute zu nehmen, die allzusehr auf die Verteidigung herkömmlicher Lehren bedacht sind; er warnt ihn ausdrücklich, physikalische Ursachen und Hypothesen zur Behandlung von astronomischen Vorgängen zu verwenden. Von beiden Bedenken ist unsere Weltanschauung durch die Physik befreit worden. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts war das Gravitationsgesetz, das Gesetz der Massenanziehung für alle Materie, für alle Entfernungen unseres Sonnensystems sichergestellt.

Die in der universellen Gültigkeit des Gravitationsgesetzes zum Ausdruck kommende Einheitlichkeit unserer Welt — eine weltanschaulich wichtige Erkenntnis — wurde vor rund 100 Jahren auch bezüglich der materiellen Zusammensetzung erkannt. Die spektralanalytischen Methoden des Laboratoriums, auf das Licht der Sonne, nun aber auch der Fixsterne angewendet, zeigten nirgends chemische Elemente, welche nicht auch auf der Erde vorhanden waren. Der fortschreitenden Analyse der Leuchtvorgänge im Laboratorium gelang es, auch Druck, Temperatur und Bewegungszustand fernster Fixsterne zu bestimmen und schließlich Gesetze über ihr Werden und Vergehen zu entwickeln.

Die Entwicklung dieser Erkenntnisse erfolgte so zwanglos unter Benützung von Laboratoriumsuntersuchungen, daß die Frage, ob man sich diese Vorgänge, die im Abstand von Billionen von Kilometern und in Zeiten von Billionen von Jahren ablaufen, vorstellen könne, garnicht auftrat: das Vorstellungsvermögen wurde vermittelt der Erkenntnisse, der zahlenmäßigen Feststellungen und der quantitativ formulierten Gesetze entwickelt. Es trat auch trotz aller Extrapolationen niemals die Notwendigkeit auf, den Rahmen unserer Denkkategorien zu verlassen, weil sich kein Widerspruch zu ihnen ergab. Gesprengt wurden nur materielle weltanschauliche Schranken, die Begreifbarkeit der Welt mit den Methoden der Physik schien klar ersichtlich. Es war gewissermaßen die gute alte Zeit der Naturwissenschaft, in der alles schön geordnet ablief.

Das änderte sich mit Beginn dieses Jahrhunderts. Wie und warum das geschehen mußte, soll an einem Beispiel der Physik gezeigt werden.

\*

Man trifft oft auf die Ansicht, daß „klassisch“ mit „anschaulich und unbestritten richtig“, „modern“ mit „nicht-anschaulich und wahrscheinlich“ gleichzusetzen sei, daß also in der Forderung und Erfüllung der Anschaulichkeit eine Art Bruch

zwischen klassischer und moderner Physik besteht. Das Problem „anschaulich“ — „nicht-anschaulich“ war der klassischen Physik allerdings noch unbekannt. Aber schon in ihr vollzog sich eine Abwandlung des Sinnes des Wortes „anschaulich“, als die klassische Physik von der Behandlung makroskopischer, unseren Sinnesorganen zugänglicher Körper und Vorgänge übergang zu solchen, die nicht mehr auf diese Art wahrnehmbar waren. Die Fallgesetze, die *Newtonsche* Gravitation, die elektrodynamischen Vorgänge wurden in der *Galileischen* Bearbeitungsart durch die Untersuchung des „Wie“ messend erforscht und zur Beantwortung des „Warum“ in Gesetze gefaßt, deren absolute Gültigkeit durch immer erneute Prüfung — trotz grundsätzlicher Versuchsfehler — sichergestellt wurde.

Es gibt aber noch eine zweite Art von „Warum“, welche in krasser Formulierung in der Kritik der *Galileischen* Forschung durch *Descartes* ausgedrückt ist: *Galilei* habe die Fallgesetze „ohne Grundlage aufgebaut; er hätte zuvor bestimmen müssen, was die Schwere ist“. Wir erkennen Gravitationskraft oder magnetische Kraft an den durch sie bedingten Bewegungen, und führen sie auf einen Zustand des Raumes zurück, welchen wir das Gravitationsfeld oder das magnetische Feld nennen.

Und dennoch sind diese Felder in keiner Weise unserem materiellen Anschauungsvermögen zugänglich geworden; wichtig war für die klassische Physik nur die eindeutige mathematische Formulierung und ihre widerspruchsfreie Verbindung mit der Beobachtung, sei es in natürlichen Erscheinungen, sei es unter den Bedingungen eines Experimentes.

Man suchte nicht was die Schwere, was die magnetische Kraft ist, „um aus ihr selbst ihr Wesen zu bestimmen“; man erdachte die Vorstellung eines Feldes, das wegen der erwiesenen Konsequenzen nicht als etwas Transzendentes, sondern als eine Realität angesehen wurde, die nur wegen der Konstruktion unserer Sinnesorgane nicht unmittelbar wahrnehmbar ist.

Unter dem Eindruck der Entdeckung der elektrischen Wellen auf Grund von Voraussagen der *Maxwell'schen* elektromagnetischen Theorie, welche eine folgerichtige mathematische Erweiterung der Theorie der Induktionserscheinungen war, schrieb *Heinrich Hertz*, man müsse bisweilen die Empfindung haben, „als wohne den mathematischen Formeln selbständiges Leben und eigener Verstand inne, als seien sie klüger als ihre Erfinder.“

Die mathematisch formulierte Feldvorstellung in der klassischen Physik ist also in gewisser Weise mit einem Mikroskop zu vergleichen, welches das Wahrnehmungsvermögen unseres Auges erweitert, ohne daß sein Erfinder oder Verfertiger ahnt, auf welchen Gebieten und bis zu welchen Weiten — sagte man doch früher, daß das Werkzeug der Theoretiker die Mathematik, das des Experimentators die Apparate seien.

\*

In dem gleichen Anschauungskreise bewegte sich die Entwicklung der Atomvorstellung. Aus den Erfahrungen der Chemie entstanden, wurde vor 100 Jahren mit ihr zunächst die kinetische Theorie der Gase entwickelt. Mehr und mehr Erscheinungen konnten modellmäßig, anschauungsmäßig verstanden werden, wenn man alle Materie sich aus Atomen, sehr kleinen vollständig elastischen Kügelchen aufgebaut vorstellte, die im Gase frei beweglich, in festen Körpern durch irgendwelche, z. B. elek-

trische Kräfte an bestimmte Gleichgewichtslagen gebunden sind. Die *Brownsche* Molekularbewegung von Staubteilchen machte zwar nicht die Bewegung des einzelnen Moleküls unserem Auge wahrnehmbar; aber die dauernde Hin- und Herbewegung der kleinen Staubteilchen, im Mikroskop betrachtet, zeigte, daß dieses noch beobachtbare Objekt von nicht mehr beobachtbaren, sich unregelmäßig bewegenden Atomen oder Molekülen hin- und hergestoßen wurde. Daß diese Bewegungsenergie nur von der Temperatur abhing und daß ihre Zahl etwa in 1 Gramm mit verschiedenen Methoden übereinsimmend genau ermittelt werden konnte, galt als ein sicherer experimenteller Beweis für die Realität der Atome. Nur die Konstruktion unserer Sinnesorgane verhinderte die direkte Wahrnehmung der Atome.

Hieran änderte sich auch zunächst noch nichts, als es gelang, das Atom selbst noch zu analysieren, seinen Aufbau aus Atomkern und Elektronen zu erkennen. Auch für das Elektron war die modelmäßige Vorstellung eines elektrisch-geladenen Kügelchens so beobachtbar, daß kein Grund bestand, an der Übereinstimmung von Vorstellung und Wirklichkeit zu zweifeln, obwohl die Objekte wegen der Inkommensurabilität zwischen ihrer Größe und der Konstruktion unserer Sinnesorgane der direkten Wahrnehmung entzogen blieben.

Bei dem Versuch, aus den materiellen Korpuskeln, dem Atomkern und den Elektronen, ein Atommodell zu entwickeln, ergaben sich aber die ersten Schwierigkeiten der mechanischen Vorstellung. Das noch heute gelegentlich benutzte Modell des Planetensystems — Elektronen auf Ellipsenbahnen den Kern umlaufend — war zwar mechanisch möglich, nicht aber elektrodynamisch. Es lieferte auch die Emission der Spektrallinien nur durch eine neue Annahme: daß nämlich ein Elektron plötzlich von einer Bahn auf eine andere springt, sodaß seine potentielle Energie um so viel kleiner wird, als der Energie des ausgestrahlten Lichtes entspricht. Es wurde sogar bewiesen, daß ein Atom nur in ganz bestimmte „Energiezustände“ gebracht werden kann. Während in der Mechanik jeder Körper auf jede beliebige potentielle Energie gehoben werden kann, durfte es für ein Elektron im Atom nur ganz bestimmte Aufenthaltsmöglichkeiten oder Energieniveaus geben. Welche Energieniveaus möglich sind, wird durch die Größe gegeben, welche *Planck* 1900 in die Strahlungstheorie eingeführt hatte, die *Planck'sche* Wirkungskonstante oder das elementare Wirkungsquantum.

Es gelang, die Hunderte von Spektrallinien, welche manche Atome aussenden, durch das Planetenbahnenmodell nach einem relativ einfachen Formelsystem für diese Bahnen und die Übergänge des Elektrons von einer auf eine andere Bahn zu berechnen; aber dieses formale System mußte auch solche Bahnen enthalten, welche durch den Atomkern hindurchgingen, was den modelmäßigen Kugelvorstellungen von Kern und Elektron widersprach. Der Formalismus deutete die Spektrallinien richtig, aber er ging über die Leistungsfähigkeit des anschaulichen Modells hinaus: der Inhalt des Formalismus erschien „unanschaulich“. Dieser Widerspruch wurde zur Quelle einer wesentlichen Erkenntnis für die weitere Entwicklung. Daß der Formalismus mehr leistete als das Modell, beruht nämlich darauf, daß man gar nicht mit den geometrischen Elementen der Bahn, sondern mit Größen gerechnet hatte, die offensichtlich einen tieferen Wahrheitsgehalt haben, nämlich mit Energie und Impuls.

Aber es kam noch anderes dazu. Während die klassische Physik ein geschlossenes Bild über das Licht als einen elektromagnetischen Schwingungsvorgang geliefert hatte, wurden zahlreiche Erscheinungen gefunden, welche nicht nur mit dieser Vorstellung

nicht gedeutet werden konnten, sondern ihr direkt widersprachen: bei jedem Energieaustausch zwischen Licht und Materie — ich nenne als Beispiel die Photozelle oder die Photochemie — erschien die Strahlungsenergie lokalisiert, so als ob das Licht eine Korpuskel wäre; und schließlich fand *Compton*, daß bei der Streuung von Röntgenlicht sich der „Röntgenstrahl“ wie eine Folge von fliegenden Korpuskeln, Photonen benimmt, die wie jedes Atom (oder wie jeder Stein) kinetische Energie, Impuls und Masse haben.

Fast zur gleichen Zeit wurden Erscheinungen entdeckt, in welchen bewegte Elektronen und Atome, die Korpuskel der klassischen Vorstellungswelt, die gleichen Eigenschaften zeigten, welche bis dahin als eindeutiges Erkennungszeichen von Wellen gegolten hatten: sie werden an Materie genau wie Wellen gebeugt und geben Interferenzerscheinungen.

Zwei in der klassischen Physik grundsätzlich verschiedene Vorstellungen, Korpuskeln und Wellen, sind also beide auf Materie und auf Licht anwendbar. Licht „erscheint“ einmal als eine unbegrenzte Welle, einmal als ein Strom von lokalisierten Photonen; bewegte Elektronen (oder Atome) „manifestieren“ sich einmal als fliegende Massen, einmal als Wellen; der Zusammenhang zwischen den Bestimmungsstücken der Korpuskel und der Welle im klassischen Sinn ist durch die *Plancksche* Konstante gegeben.

Dies ist also der Dualismus: Strahlung und Korpuskel, die sich frei, d. h. ohne Energieaustausch durch Vakuum oder durch Materie fortpflanzt, haben Wellencharakter. — Sobald aber ein Energieaustausch mit Materie eintritt, haben Strahlung und Korpuskel Teilchencharakter. Beobachtbar ist weder die Fortpflanzung noch der Austauschvorgang; nur die Energieumsetzung ist der Messung zugänglich.

Mit diesem Dualismus Korpuskel-Welle hört die Möglichkeit auf, ein einheitliches anschauliches Modell zu schaffen. Man hat ihn oft — nicht so ganz unzutreffend — das Leib-Seele-Problem der Physik genannt. Es entsteht die Frage, was nun eigentlich die Wirklichkeit, die physikalische Realität ist.

In besonderer Weise — aber letzten Endes in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Dualismus stehend — ergibt sich die Unmöglichkeit von Modellvorstellungen im Mikrokosmos auch aus der Unmöglichkeit von Messungen, wie sie der Makrophysik eigen sind. Diesmal handelt es sich nicht um eine nur durch unsere beschränkten Fähigkeiten bedingte Einschränkung der Meßmöglichkeit oder -genauigkeit, sondern um das Prinzip: die Unerlaubtheit, die makroskopische Denkweise auf die Welt der Elementarteilchen zu übertragen. Umgekehrt — und das sei besonders bemerkt! — führen die Denkelemente für die Ordnung der Vorgänge im Mikrokosmos zu keinem Widerspruch, wenn man sie im Bereich des Makrokosmos berücksichtigt. Somit ist die „moderne Physik“ bei dem jetzigen Stand unseres Wissens nicht als eine Abänderung der alten Denkweise, sondern als eine Praecisierung derselben zu werten.

Wir betrachten eine im klassischen Sinne exakt formulierte und lösbare Aufgabe, den Ort und die Geschwindigkeit eines Elementarteilchens — etwa eines Elektrons — zu messen. Wir denken uns, daß man ein Mikroskop bauen könnte, mit welchem dasselbe betrachtet werden kann. Da dasselbe sehr klein ist, kann man gewöhnliche Lichtwellen nicht benutzen; man weiß ja schon aus der normalen Lichtmikroskopie, daß man nur Körper erkennen kann, welche ungefähr die Größenordnung der Lichtwelle haben; auch ist bekannt, daß feine Strukturen mit dem kürzere

Wellenlängen benutzenden Ultraviolettmikroskop besser aufgelöst werden, als mit dem normalen Lichtmikroskop.

Zur Beobachtung einer sehr kleinen Korpuskel müßten also sehr kurzwellige Gammastrahlen benutzt werden. Wenn solche aber auf diese fallen, so benehmen sie sich auf Grund der experimentellen Erfahrung mit dem *Compton*effekt als Photonen, als mit Lichtgeschwindigkeit fliegende Korpuskel; für den Stoß von Photon auf Korpuskel gelten laut Versuchsergebnis die Erhaltungssätze von Energie und Impuls. Es wird also auf diese ein Impuls übertragen, ihr Bewegungszustand umso mehr geändert, je kurzwelliger der Gammastrahl ist. Je schärfer man die Lage der Korpuskel durch Verwendung kurzwelliger Strahlung bestimmen will, desto stärker ändert man ihren Bewegungszustand. Der Impuls wächst im gleichen Maße, in dem die Wellenlänge abnimmt. Der direkte Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und dem Impuls des Gammastrahls ist wiederum durch die *Plancksche* Konstante gegeben.

Will man andererseits die Bewegung eines Teilchens genau messen, so braucht man scharfe Marken, z. B. zwei in einigem Abstand hintereinander gesetzte sehr enge Spalte, durch welche das Teilchen, z. B. ein Elektron, hindurchgeschickt wird, sodaß durch Breite und Abstand der Spalte Anfangs- und Endpunkt des Weges genau fixiert sind. Die Versuchsanordnung ist wieder nach der Fragestellung der klassischen Physik entworfen. Der obengenannte Versuch liefert aber die Tatsache, daß ein Elektron beim Durchgang durch einen engen Spalt eine Abbeugung aus seiner Flugrichtung erfahren wird, also eine seitliche Geschwindigkeitskomponente erhält, die im Mittel umso größer ist, je enger der Spalt ist. Macht man den Spalt weit, daß die Beugung kleiner und auch noch die abgelenkten Elektronen durch den zweiten Spalt hindurchgehen können, so weiß man nicht, an welcher Stelle es durch den Spalt läuft: seine örtliche Lage ist unbestimmt. Die als Beugung bezeichnete seitliche Geschwindigkeitskomponente ist auf Grund der Messung wiederum durch die *Plancksche* Konstante gegeben.

Man kann diese Tatsachen so formulieren, daß die Forschungsmethoden der klassischen Physik versagen, weil in atomaren Bereichen die Rückwirkung des Beobachtungsmittels auf das Beobachtungsobjekt nicht vernachlässigt werden darf. Diese Beeinflussung des Meßvorganges führt zu einer vielleicht sehr prinzipiellen Folgerung, welche als die „*Heisenbergsche* Unbestimmtheitsrelation“ bekannt ist: Lage und Geschwindigkeit (Impuls) eines Teilchens lassen sich nicht gleichzeitig mit hoher Genauigkeit messen; je genauer die Ortsbestimmung werden soll, desto größer wird die Störung des Bewegungszustandes — oder umgekehrt. Das Produkt beider Unbestimmtheiten ist wieder durch die *Plancksche* Konstante gegeben.

Dieser Erkenntnis wird eine besondere philosophische Bedeutung zugemessen: es ist im atomaren Geschehen — und dieses ist letzten Endes für alles in der Welt ausschlaggebend — unmöglich, eine bestimmte Aussage über den Ablauf eines Ereignisses zu machen. Der Glaube der klassischen Physik war, daß der Weltablauf berechenbar ist; *Laplace* sagte, wenn alle Zustandsgrößen der Welt in einem Augenblick und die Kraftgesetze der Materie bekannt sind, so sei der gesamte Weltablauf durch Rechnung vorherzusagen. Mit den Mitteln der heutigen Erkenntnis ist das schon allein deshalb nicht möglich, weil nicht einmal für ein Teilchen die gleichzeitige Bestimmung der notwendigen Zustandsgrößen durchführbar ist — und zwar wie gezeigt wurde — nicht aus menschlichem Unvermögen. Es ist eine weltanschauliche Konsequenz der gegenwärtigen Entwicklung der Physik.

Der Widerspruch Korpuskel — Welle liegt nicht etwa in einer fehlerhaften Deutung der einzelnen Experimente. Er zeigt uns, daß das Elektron und das Photon für unser heutiges Weltbild transzendente Gegenstände sind, von welchen wir in der Wellen- und in der Teilcheneigenschaft zwei Äußerungen wahrnehmen: Weil Photon und Korpuskel sowohl in der Wellenvorstellung als auch in der Korpuskelvorstellung modellisiert werden können, die sich in unserem Weltbild widersprechen, kann das reale Sein von Photon und Elektron durch beide Vorstellungen nicht erfaßt werden.

Wir kennen nur eine mathematische Verknüpfung der beiden und dürfen hieraus schließen, daß darüber ein noch unbekanntes Sein stehen muß. Daß wir auf dessen Formulierung mit den heutigen Denkelementen verzichten müssen, können wir exakt beweisen.

Die Gesamtheit der Erfahrungen der modernen Physik, soweit wir sie hier behandelten, steht miteinander im Zusammenhang durch die *Plancksche Konstante*  $h$ , die Konstante der elementaren Wirkung. Unter Wirkung versteht man das Produkt von einer Energie und der Zeit. In der Tat ist die Grundlage für die auf der Größe  $h$  beruhende Quantenphysik stets eine Energiemessung; die Energie ist das Leitelement der physikalischen Entwicklung, das Wirkungsquantum, die nicht unterschreitbare Grenze dieser Denkungsweise. Das reale Element ist entsprechend der Denkweise der gesamten modernen Physik ein Element der Quantität.

\*

Energie und Materie sind aber noch in einer anderen Weise miteinander verbunden. Wir sagten eingangs, daß alle unserer Erfahrung zugänglichen Bereiche der Welt aus den gleichen Atomarten aufgebaut sind; nur die Verteilung der Elemente und ihr Zustand ist auf den verschiedenen Himmelskörpern verschieden. Schon früh hat man sich die Frage vorgelegt, ob diese elementaren Bausteine unveränderlich sind; die Untersuchungen im Laboratorium hatten die Unverwandelbarkeit der Elemente und die Konstanz der Masse bei allen chemischen und physikalischen Reaktionen ergeben. Die Entdeckung der Radioaktivität zeigte, daß die Unverwandelbarkeit bei einigen chemischen Elementen nicht gegeben ist: die heute als radioaktive Elemente bezeichneten Atome wandeln sich spontan in andere um. Es ist allgemein bekannt, daß es in den letzten zwanzig Jahren gelungen ist, fast alle Elemente künstlich in andere dadurch zu verwandeln, daß man ihre Kerne durch Einführung von Elementarteilchen, insbesondere von Neutronen instabil macht. Das Wie und Was dieser Versuche interessiert uns hier gar nicht — bis auf einen Punkt. Sowohl bei der natürlichen wie bei der künstlichen Umwandlung der Atome entsteht Energie. Nach dem Gesetz der Erhaltung der Energie sollte also irgend eine äquivalente Energie im Umwandlungsakt verloren gegangen sein, eine Energie, die im Atomkern in einer anderen Form vorhanden war. Es muß sogar ein Energiebetrag enormer Größe sein, von ganz anderer Größenordnung als die uns sonst zugänglichen Energien, etwa in den chemischen Reaktionen der Sprengstoffe.

Ein Energiereservoir unvorstellbarer Größe müßte aber z. B. auch die Sonne enthalten. Sie liefert ja die Strahlungsenergie, von der wir hauptsächlich leben. Abgabe von Strahlung bedeutet aber gleichzeitige Abkühlung: jedoch wird die Sonne nicht kälter. Wäre es ein chemischer Vorgang, etwa wie die Verbrennung von Kohle im Ofen, so wäre die Sonne in einigen 1000 Jahren vollständig verbrannt. Die Sonne



war gewissermaßen ein leuchtendes Zeichen der Unvollkommenheit der klassischen Physik! Aber schon unsere Erde zeigt das gleiche Rätsel: sie ist im Innern warm; sie müßte längst völlig erkaltet sein, wenn nicht auch in ihr ein Ofen brennen würde. Das Heizmaterial der Erde ist der Gehalt an radioaktiven Substanzen; das wissen wir heute, daß ihre Zerfallsenergie die Erde heizt. Das Problem der Erdwärme ist also das Problem des Energiegehaltes der radioaktiven Atome. Für die Sonne ist diese Annahme nicht möglich.

Die Aufklärung brachte die quantitative Messung der Atomumwandlungen. Die — wenn ich so sagen darf — Reaktionsprodukte hatten eine kleinere Masse als die Ausgangsstoffe; es tritt im Umwandlungsvorgang ein Materieverlust ein, der proportional der Energie ist, welche bei der Umwandlung entwickelt wird. Diese hier gemessene Äquivalenz von Masse und Energie entspricht quantitativ der von *Einstains* Relativitätstheorie aus prinzipiellen Überlegungen geforderten Beziehung: 1 Gramm Materie (gleichgültig welcher Art) ist 25 Millionen Kilowattstunden äquivalent. Nimmt man ein Alter der Sonne von 2000 Millionen Jahren an — so alt ist unsere Erde — so hätte sie in dieser Zeit erst  $\frac{1}{1000}$  ihrer Masse in Strahlungsenergie umgesetzt; das entspricht immerhin einer Massenabnahme von 4 Millionen Tonnen in jeder Sekunde als Äquivalent für die Strahlung, welche sie in den Weltenraum hinausendet.

Solche Zahlen mögen phantastisch klingen; sie beruhen auf sicheren Laboratoriumsversuchen und geben auf das Universum übertragen ein widerspruchloses Weltbild. Die Äquivalenz von Strahlung und Materie durch Umwandlung in beiden Richtungen — die Verwandlung von Materie in Strahlung, speziell von Elementarteilchen der elektrischen Ladung in Gamma- (oder Röntgen-) Strahlen und die Entstehung von elektrischen Elementarteilchen aus Röntgenstrahlen — zeigt uns zunächst das Gesetz der Erhaltung der Energie in einer viel allgemeineren Form: Auch das Gesetz der Konstanz der Materie gilt nicht; die Materie ist nur eine Erscheinungsform der Energie.

Sie enthält aber auch einen neuen Aspekt für den Dualismus Welle — Korpuskel. Wenn wir vorher erkannten, daß bewegte Materie Korpuskel- und Welleneigenschaften, daß die mit Lichtgeschwindigkeit sich fortbewegende Strahlung Wellen- und Korpuskeleigenschaften zeigen, so erkennen wir jetzt, daß sich eine ruhende Masse in Strahlung mit Lichtgeschwindigkeit und umgekehrt die mit Lichtgeschwindigkeit sich fortpflanzende Strahlung in Ruhemasse verwandeln kann. Hier treffen sich Quantenphysik und Relativitätstheorie.

Eine letzte Frage: wie hat man sich den Massenverlust der Sonne vorzustellen? Es darf als sichergestellt betrachtet werden, daß die Energie der Sonne bei der Bildung von Helium aus 4 Elementarteilchen, 2 Wasserstoff (Protonen) und 2 Neutronen, frei wird. Hierbei tritt ein bedeutender Massenverlust, also eine Energieabgabe ein: Atomenergie heizt die Sonne und ermöglicht unser Leben.

Die Elemente unserer Welt — Materie und Energie — sind also in einer dauernden Umwandlung begriffen, eine für Weltbild und Weltanschauung gleich bedeutungsvolle Erkenntnis. Die Energie ist konstant. Wieder werden wir von einer ganz anderen Seite aus auf diese als das *Urphänomen* unserer heutigen Physik geführt — und damit vielleicht an eines der Geheimnisse der Welt, vor denen For-schen und Denken in Ehrfurcht übergehen.

\*

Die Naturwissenschaft kennt keine Begrenzung der Forschung, der Naturwissenschaftler philosophiert nicht über die Grenzen der Erkenntnis. —

Wir stellen den menschlichen Wert des Erreichten über den in menschlicher Unvollkommenheit begründeten Mißbrauch der Erkenntnisse. Wer die Entwicklung von Quantenmechanik und Atomenergie ablehnt, muß folgerichtig auch Penicillin und Vitamin, Volkshygiene und Automobil ablehnen; denn alles ist entstanden aus dem gleichen Geiste, der nur wahrheitsgebundenen Freiheit des Denkens. —

Die Lage der Grenzen der Erkenntnis ist zeitgebunden. Wir wissen nicht, was sich unserem Geist noch offenbaren wird. *Goethes* Wort „das Erforschliche zu erforschen und das Unerforschliche ruhig zu verehren“ enthält auch die bindende Verpflichtung zur stets erneuten Prüfung, was erforschlich ist. Je härter die Arbeit des Vordringens in den Bereich des Unbekannten wird, desto tiefer wird die Demut vor dem letzten Geheimnis der Welt.

Lassen Sie mich mit Worten schließen, in welche *Goethe* diese Weltanschauung faßt: „Wenn ich mich beim Urphänomen zuletzt beruhige, so ist es doch nur Resignation. Aber es ist ein großer Unterschied, ob ich mich an die Grenzen der Menschheit resigniere oder innerhalb einer hypothetischen Beschränkung meines bornierten Individuums.“

Physikalisches Institut der Universität München