

Wandlungen der Grundlagen der exakten Naturwissenschaft in jüngster Zeit¹⁾.

Von Prof. Dr. W. HEISENBERG.

Institut für theoretische Physik der Universität Leipzig.

(Eingeg. 4. Oktober 1934.)

Die Entwicklung der modernen Physik, an deren Anfang Plancks Entdeckung des Wirkungsquantums steht und deren geistiger Inhalt in Relativitätstheorie und Quantentheorie niedergelegt ist, hat in den letzten Jahren einen vorläufigen Abschluß gefunden. Die Anwendung der neuentdeckten Prinzipien auf weitere Erfahrungsgebiete wird erst durchgeführt werden können, wenn diese Erfahrungsgebiete ausführlicher als bisher experimentell durchforscht sind. Daher kann vielleicht schon jetzt versucht werden, ein Bild dieser Entwicklung zu zeichnen, das von den im Streit der Tagesmeinungen entstandenen Verzerrungen frei ist und das so objektiv, wie es mir möglich ist, den Sinn dieser Entwicklung deutlich macht.

Die klassische Physik, die vor etwa dreißig Jahren ihren Abschluß fand, war auf einigen grundlegenden Voraussetzungen aufgebaut, die als der scheinbar selbstverständliche Ausgangspunkt aller exakten Naturwissenschaft in ihr keines Beweises und keiner Diskussion bedurften: Die Physik handelt vom Verhalten der Dinge im Raume und von ihrer Veränderung in der Zeit. Obwohl damit zunächst nur der Charakter der Erfahrungen bezeichnet war, die der Physik zugrunde liegen, so schienen doch zugleich auch schon einige Eigenschaften der Dinge, auf die man aus jenen Erfahrungen schließt, dadurch festgelegt zu sein. Man wurde zu der stillschweigenden Annahme geführt, daß es einen objektiven, von jeder Beobachtung unabhängigen Ablauf von Ereignissen in Raum und Zeit gebe, ferner, daß Raum und Zeit feste, voneinander völlig unabhängige Ordnungsschemata allen Geschehens bilden und insofern eine objektive, allen Menschen gemeinsame Realität darstellen.

Diese grundlegenden Voraussetzungen der klassischen Physik, deren natürliche Konsequenz das naturwissenschaftliche Weltbild des 19. Jahrhunderts war, sind zum ersten Male angegriffen worden in der Einsteinschen speziellen Relativitätstheorie. Von ihren Grundgedanken will ich hier nur soviel andeuten, wie zum Verständnis ihrer methodischen Situation notwendig ist. Diese Theorie war aus einer Notlage heraus entstanden. Die klassische Physik geriet bei dem Versuch der konsequenten Deutung gewisser subtiler Experimente — insbesondere des berühmten Experiments von Michelson — in Widersprüche. Die Forschung wurde dadurch genötigt, sich klarzumachen, daß eine Voraussetzung dieser klassischen Deutung, die unserer täglichen Erfahrung mit der Unschärfe, die dieser stets anhaftet, entspricht, in diesen der direkten Wahrnehmung unzugänglichen Gebieten auf keine unmittelbare Erfahrung gestützt war und daher fallen gelassen werden konnte. Es handelt sich um die Annahme, es habe einen ohne weiteres bestimmten Sinn, zwei Ereignisse gleichzeitig zu nennen, auch wenn sie nicht am gleichen Ort stattfinden. Ereignisse, von denen wir — prinzipiell wenigstens — durch irgendeine Wahrnehmung etwas erfahren können, nennen wir „vergangen“; solche, in deren Ablauf wir

— prinzipiell wenigstens — noch eingreifen können, nennen wir „zukünftig“. Unserer täglichen Erfahrung entspricht es, zu glauben, daß die Ereignisse, von denen wir etwas erfahren können, von denen, die wir noch ändern können, nur durch einen unendlich kurzen Augenblick, den wir „Gegenwart“ nennen, getrennt seien. Diese stillschweigende Annahme der klassischen Physik erwies sich — durch die experimentellen Forschungen, die uns zur Anerkennung der speziellen Relativitätstheorie gezwungen haben — als unrichtig. Vielmehr liegt zwischen dem, was wir eben „Vergangenheit“, und dem, was wir eben „Zukunft“ nannten, noch ein schmaler, aber endlicher Zeitabschnitt, dessen Dauer bestimmt ist durch den Abstand des Beobachters, der die Feststellung „vergangen“ oder „zukünftig“ trifft, von dem Ort der Ereignisse, um deren zeitlichen Ablauf es sich handelt. Die Theorie, die zu dieser Erkenntnis geführt hat, ist inzwischen durch eine große Reihe experimenteller Bestätigungen zu einer selbstverständlichen Grundlage aller modernen Physik geworden und gilt ebenso, wie etwa die klassische Mechanik oder die Wärmelehre als festes, für immer gesichertes Gut der exakten Naturwissenschaft. Ihre außerordentliche Bedeutung liegt in erster Linie in der ganz unerwarteten Erkenntnis, daß die konsequente Verfolgung des von der klassischen Physik vorgezeichneten Weges die Abänderung der Grundlagen dieser Physik erzwingt. Dieser Sachverhalt wird uns im folgenden noch mehrfach begegnen. Die modernen Theorien sind nicht aus revolutionären Ideen entstanden, die sozusagen von außen her in die exakten Naturwissenschaften hereingebracht wurden; sie sind der Forschung vielmehr bei dem Versuch, das Programm der klassischen Physik konsequent zu Ende zu führen, durch die Natur aufgezwungen worden. Deshalb kann man die Anfänge der modernen Physik auch an dieser Stelle nicht vergleichen mit den großen Umwälzungen früherer Zeiten, etwa mit der Leistung des Kopernikus; der Gedanke des Kopernikus war in viel höherem Maße von außen her in die Ideenwelt der damaligen Naturwissenschaft hereingetragen und verursachte deshalb noch einschneidendere Veränderungen der Wissenschaft, als es die Grundgedanken der modernen Physik in der heutigen Zeit tun.

Zu der Revision des Zeitbegriffs fügte die allgemeine Relativitätstheorie eine Revision der geometrischen Eigenschaften des Raumes. Wenn diese Theorie die geringe Anzahl astronomischer Beobachtungen, die über ihren Fragenkomplex bisher vorliegen, schon richtig deutet, so besteht bekanntlich eine Beziehung zwischen Geometrie und Materieverteilung im Weltraum. Die euklidische Geometrie behält dann ihr Recht nur in kleinen Raumgebieten, während im großen der Raum eine ganz andere Struktur besitzen kann, als es der unmittelbaren Anschauung entspricht. Die allgemeine Relativitätstheorie ist noch nicht im gleichen Maße experimentell gesichert wie die spezielle — wenn ihr auch bisher kein Experiment definitiv widerspricht. Ihre Überzeugungskraft liegt nicht in der Deutung vieler, bisher nicht deutbarer Beobachtungsergebnisse, sondern darin, daß sie eine neue Denkmöglichkeit geschaffen hat, die früher dem Blick der Naturforscher verborgen war.

¹⁾ Vorgetragen in der ersten allgemeinen Sitzung anläßlich der Hauptversammlung der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte, Hannover, am 17. September 1934.

Wie groß die Kraft einer solchen neuen Denkmöglichkeit ist, kann in der Geschichte deutlich das Beispiel der Kopernikanischen Lehre zeigen: Man macht sich heute im allgemeinen nicht mehr klar, daß die Idee des Kopernikus zu Anfang in der korrekten Darstellung der Erfahrungen der Ptolemäischen Anschauung kaum überlegen war. Noch die experimentellen Beweise, die Galilei für die These des Kopernikus anzuführen hatte, waren viel weniger zwingend als die, die wir etwa heute für die allgemeine Relativitätstheorie anführen können. Trotzdem war die Tatsache, daß man nicht in Unsinn geriet, wenn man behauptete, die Erde bewege sich um die Sonne, Grund genug für Galilei, um mit der ganzen Kraft seines Geistes für Kopernikus einzutreten. In ähnlicher Weise wird die Tatsache, daß man nicht in Unsinn gerät, wenn man behauptet: die Geometrie in der Welt hängt von der Materieverteilung ab, unabhängig von jeder experimentellen Bestätigung einen solchen Einfluß auf die zukünftige Forschung ausüben, daß eine Theorie der Gravitation künftig nie an der allgemeinen Relativitätstheorie vorbei, sondern nur durch sie hindurchgehen kann.

Kaum ein Jahrzehnt, nachdem die Relativitätstheorie gezeigt hatte, daß die als selbstverständlich angesehenen Grundlagen der exakten Naturwissenschaft durch neue Erfahrungen verändert werden konnten, wurde der eigentliche Kern der klassischen Physik, der Glaube an den objektiven, von jeder Beobachtung unabhängigen Ablauf von Ereignissen in Raum und Zeit durch die experimentellen Entdeckungen angegriffen, die in ihren Konsequenzen zur Bohrschen Theorie des Atombaus geführt haben. Auch in der Quantentheorie geschah die Abkehr von den Grundsätzen der klassischen Naturbeschreibung nicht durch das Eindringen neuer, der bisherigen Physik fremder Ideen in unsere Wissenschaft; vielmehr wurde hier die Forschung durch eine Kette der denkwürdigsten experimentellen Entdeckungen Schritt für Schritt zum Verlassen des Bodens der klassischen Physik gezwungen. Nach der Entdeckung des Wirkungsquantums durch Planck war hier der wichtigste erste Schritt die durch die Untersuchungen von Lenard und ihre Deutung durch Einstein gewonnene Einsicht, daß das Licht, das wir auf Grund zahlloser Interferenzversuche als Wellenvorgang auffassen müssen, gleichwohl in gewissen Experimenten korpuskulare Eigenschaften zeigt. Wir finden also wieder am Anfang der neuen Theorie den inneren Widerspruch, in den die klassische Physik sich durch eine auf ihrem Boden völlig konsequente Deutung gewisser Experimente verwickelt. In der auf den Rutherford'schen Experimenten fußenden Bohrschen Atomtheorie trat dann der Dualismus klassischer und der früheren Physik völlig fremder Gesetzmäßigkeiten noch deutlicher zutage. In den folgenden Jahren erhielt diese Theorie eine feste Grundlage durch eine Reihe von experimentellen und theoretischen Untersuchungen, von denen als Beispiele nur die von Franck und Hertz, Stark, Stern und Gerlach einerseits, Sommerfeld, Kramers, Born, Pauli andererseits genannt werden sollen. Dann entdeckte de Broglie den Dualismus von Wellenvorstellung und korpuskularer Vorstellung auch im Verhalten der Materie. Schließlich gelang es der gleichzeitigen Arbeit des Göttinger Kreises und Diracs und Schrödingers, die verschiedenartigen experimentellen Ergebnisse in einem mathematischen Schema zusammenzufassen, durch das eine klare neue Situation gegenüber den Grundlagen physikalischer Untersuchungen geschaffen war. Die Analyse dieser Situation, die ich hier wieder nur andeuten kann, verdanken wir in erster Linie Bohr. Es zeigte sich, daß in unserer Erforschung ato-

marer Vorgänge ein eigentümlicher Zwiespalt unvermeidbar ist: Einerseits sind die experimentellen Fragen, die wir an die Natur richten, stets mit Hilfe der anschaulichen Begriffe der klassischen Physik formuliert und bedienen sich insbesondere der Begriffe von Raum und Zeit der Anschauung; denn wir besitzen ja gar keine andere als diese den Gegenständen unserer alltäglichen Umgebung angepaßte Sprache, mit der wir z. B. den Aufbau der Meßapparate beschreiben könnten, und wir können Erfahrungen nicht anders als in Raum und Zeit machen. Andererseits sind die mathematischen Gebilde, die sich zur Darstellung der experimentellen Sachverhalte eignen, Wellenfunktionen in mehrdimensionalen Konfigurationsräumen, die keine einfache anschauliche Deutung zulassen. Aus diesem Zwiespalt ergibt sich die Notwendigkeit, bei der Beschreibung atomarer Vorgänge einen Schnitt zu ziehen zwischen den Meßapparaten des Beobachters, die mit den klassischen Begriffen beschrieben werden, und dem Beobachtungsobjekt, dessen Verhalten durch eine Wellenfunktion dargestellt wird. Während nun sowohl auf der einen Seite des Schnittes, die zum Beobachter führt, wie auf der anderen, die den Gegenstand der Beobachtung enthält, alle Zusammenhänge scharf determiniert sind — hier durch die Gesetze der klassischen Physik, dort durch die Differentialgleichungen der Quantenmechanik —, äußert sich die Existenz des Schnittes doch im Auftreten statistischer Zusammenhänge. An der Stelle des Schnittes muß nämlich die Wirkung des Beobachtungsmittels auf den zu beobachtenden Gegenstand als eine teilweise unkontrollierbare Störung aufgefaßt werden. Dieser prinzipiell unkontrollierbare Teil der Störung, die ja mit jeder Beobachtung notwendig verknüpft ist, wird in mehrfacher Weise wichtig. Einmal ist er der Grund für das Auftreten statistischer Naturgesetze in der Quantenmechanik. Dann führt er zu einer Schranke für die Anwendbarkeit der klassischen Begriffe. Es stellt sich heraus, daß die Genauigkeit, bis zu der klassische Begriffe sinnvoll zur Beschreibung der Natur verwendet werden können, durch die sogenannten Unbestimmtheitsrelationen beschränkt ist. Diese Genauigkeitsschranke gibt eben den Grad von Freiheit gegenüber den klassischen Begriffen, der nötig ist, um die verschiedenen anschaulichen Bilder, unter denen ein bestimmtes physikalisches Geschehen erscheinen kann — z. B. Partikel- und Wellenbild —, vernünftig zu verknüpfen. Schließlich sorgt dieser prinzipiell unkontrollierbare Teil der Störung in einer bis ins einzelne verfolgbaren wunderbaren Weise dafür, daß die klassischen und die quantentheoretischen Gesetzbereiche an der Stelle des Schnittes widerspruchsfrei aneinandergesetzt werden können, so daß ein geschlossenes System von Gesetzen entsteht. Entscheidend ist hierbei insbesondere, daß die Lage des Schnittes — d. h. die Frage, welche Gegenstände mit zum Beobachtungsmittel und welche mit zum Beobachtungsobjekt gerechnet werden — für die Formulierung der Naturgesetze gleichgültig ist. Von dieser Einsicht aus kann auch einem Einwand begegnet werden, der gegen die Endgültigkeit der Quantenmechanik mehrfach vorgebracht wurde: es könnte hinter dem von ihr formulierten statistischen Zusammenhang noch ein System deterministischer Naturgesetze für andere uns bisher unbekannte Bestimmungsstücke der Natur verborgen sein, ähnlich wie hinter der Wärmelehre die Boltzmannsche Mechanik der Atome steckt. Eine genaue Untersuchung dieser Hypothese zeigt bald, daß diese neuen Naturgesetze zu den Konsequenzen der Quantenmechanik, die streng determiniert sind, in Widerspruch geraten müßten; die Quantenmechanik läßt nirgends Raum für eine Ergänzung ihrer

Aussagen, denn die einzige Stelle, an der sie Unbestimmtheiten enthält, ist der besprochene „Schnitt“. Würde man an irgendeiner durch bestimmte Naturvorgänge definierten Stelle die Unbestimmtheit der Quantentheorie durch Ergänzungen beseitigen wollen, so würden dadurch, daß man den Schnitt von der genannten Stelle wegverlegt, die Widersprüche zwischen der Quantenmechanik und der versuchten Ergänzung deutlich werden.

Damit erhebt sich sogleich die allgemeinere Frage, inwieweit die durch die moderne Physik erzwungene Wandlung der Grundlagen der exakten Naturwissenschaft endgültig ist. Wir haben zu diskutieren, ob die Naturforscher auf den Gedanken an eine allen Beobachtern gemeinsame objektive Zeitskala, an objektive, von jeder Beobachtung unabhängige Geschehnisse in Raum und Zeit für immer verzichten müssen, oder ob die jüngste Entwicklung nur als eine vorübergehende Krisis zu betrachten ist. Es scheint mir, als ob die stärksten Gründe dafür sprächen, zu glauben, daß dieser Verzicht endgültig ist. Um diese Gründe auseinanderzusetzen, möchte ich mit einem Vergleich beginnen. Vor dem Entstehen der antiken Naturwissenschaft stellten sich die Menschen die Welt als eine flache Scheibe vor, und erst durch die Entdeckung Amerikas und die erste Weltumseglung wurde dieser Glaube für alle Zeiten zerstört. Zwar hatte auch vorher niemand den Rand der Erdscheibe je gesehen. Aber dieses „Ende der Welt“ gewann gleichwohl Gestalt und Leben durch die Sagen, in denen von ihm gesprochen wurde, und durch die Phantasie der Menschen, die sich mit ihm beschäftigten. Wir kennen das alte Motiv von dem Mann, der alles erforschen und bis ans Ende der Welt reisen will. Die Frage nach dem Ende der Welt hatte damals einen bestimmten, klaren Sinn. Mit den Entdeckungsfahrten von Columbus und Magellan wurde trotzdem diese Frage für immer als sinnlos erwiesen und die ganze Gedankenwelt, die sich an sie knüpfte, in eine Märchenwelt verwandelt. Die Menschheit verzichtete nicht deswegen auf die Frage nach dem Ende der Welt, weil sie die ganze Erdoberfläche durchforscht hatte — denn selbst heute kennen wir einzelne Teile der Erdoberfläche noch nicht —, sondern die Fahrten von Columbus und Magellan waren so deutliche Beweise für die Notwendigkeit, sich der neuen Denkmöglichkeit: der Annahme der Kugelgestalt der Erde zu bedienen, daß man den Verzicht auf jene Frage gar nicht mehr als Verzicht empfand. Ganz ähnlich scheint es mir mit den Fragen nach der absoluten Zeitskala und nach dem objektiven Geschehen in Raum und Zeit zu stehen, auf die uns die moderne Physik zu verzichten lehrt. Auch den Sinn dieser Begriffe hatte in der Allgemeinheit, in der an sie geglaubt wurde, nie jemand durch direkte Erfahrung bestätigt; auch sie bildeten ein hypothetisches „Ende der Welt“. Dabei ist die Gedankenwelt, die zugleich mit diesen Fragen der klassischen Physik zerstört werden soll, viel weniger lebendig als jene, die Columbus oder Kopernikus vernichtete. Daher ist die Wandlung unseres Weltbildes, zu der die moderne Physik zwingt, weniger einschneidend als jene im 15. und 16. Jahrhundert. Auch die Überzeugungskraft der Quantentheorie liegt keineswegs darin, daß wir etwa sämtliche Methoden, um Ort und Geschwindigkeit eines Elektrons zu messen, durchprobiert hätten und es nirgends gelungen wäre, die Unbestimmtheitsrelationen zu umgehen. Sondern die experimentellen Ergebnisse etwa von *Compton* und *Geiger* und *Bothe* sind so einleuchtende Beweise für die Notwendigkeit, sich der in der Quantentheorie geschaffenen neuen Denkmöglichkeit zu bedienen, daß der Verzicht

auf die Fragen der klassischen Physik gar nicht mehr als Verzicht erscheint. In den neuen Denkmöglichkeiten, zu denen uns die Natur verholfen hat, liegt also die eigentliche Kraft der modernen Physik. Die Hoffnung, man werde durch neue Experimente doch noch dem objektiven Geschehen in Raum und Zeit oder der absoluten Zeit auf die Spur kommen, dürfte daher nicht besser begründet sein als die Hoffnung, irgendwo in den unerforschten Teilen der Antarktis werde schließlich doch das Ende der Welt gefunden werden. Noch in einem anderen Punkt läßt sich der Vergleich durchführen: Für die Geographie der Mittelmeerländer waren die Entdeckungen des Columbus unwesentlich, und es wäre ganz falsch, zu behaupten, die Entdeckungsfahrten des berühmten Genuesen hätten die positiven geographischen Kenntnisse der damaligen Welt umgestürzt. Ebenso falsch ist es, heute von einem Umsturz der Physik zu sprechen; an den großen klassischen Disziplinen der Physik, z. B. Mechanik, Optik, Wärmelehre, hat sich durch die moderne Physik nichts geändert. Nur das Bild, das wir aus der Kenntnis eines beschränkten Teils der Welt voreilig von ihren noch unerforschten Gebieten entwarfen, hat eine entscheidende Wandlung durchgemacht. Freilich ist dieses Bild stets bestimmend für den Weg, den die Forschung einschlägt.

Nach dieser kurzen und oberflächlichen Übersicht über das, was in der theoretischen Physik in der jüngstvergangenen Zeit geschehen ist, soll weiter die Frage besprochen werden, ob und inwiefern dieses Geschehen wichtig werden und welche Wirkungen es auf die weitere Gestaltung des naturwissenschaftlichen Denkens vielleicht ausüben kann. Zwei Aufgaben sind ja der Naturwissenschaft gestellt: sie soll Kenntnisse der Natur vermitteln, die die Menschen in den Stand setzen, die Naturkräfte ihren eigenen Interessen dienstbar zu machen, und sie soll durch eine wirkliche Einsicht in die Zusammenhänge der Natur den Menschen die richtige Stellung in ihr zuweisen. Die erste Aufgabe hat die Entwicklung von Naturwissenschaft und Technik in den letzten hundert Jahren beherrscht und soll deshalb zuerst Gegenstand unserer Aufmerksamkeit sein. Die Ergebnisse der theoretischen Physik, also auch die in der Relativitätstheorie und Quantentheorie niedergelegten Erkenntnisse, können nicht unmittelbar dem technischen Fortschritt dienstbar gemacht werden. Die theoretische Physik übt vielmehr ihre Wirkungen auf die Technik indirekt und erst nach längeren Zeiträumen aus. Zwei verschiedene Wirkungen sind hier zu unterscheiden: Erstens setzt die Konstruktion von Apparaten, die die ihnen gestellten Aufgaben vollkommen lösen, im allgemeinen die exakte Kenntnis der Naturgesetze voraus, die in ihnen wirken. Zum Bau einer Dynamomaschine oder einer Hochfrequenzanlage z. B. ist die Kenntnis der Maxwell'schen Gleichungen — ob sie nun in der dem Techniker oder der dem Physiker geläufigen Gestalt erscheinen — notwendig. Ebenso muß in späterer Zeit für die Konstruktion von Apparaten, in denen atomare Erscheinungen ausgenützt werden, die Kenntnis der Gesetze der Atomphysik wesentlich werden; bis zu dieser Auswirkung der modernen Physik wird aber vielleicht noch längere Zeit vergehen. Zweitens aber dürfte der theoretische Fortschritt zu einem erheblichen Teil die Richtung bestimmen, in der die physikalische Forschung und damit schließlich auch die Technik sich entwickelt. An dieser Stelle muß kurz das Verhältnis von experimenteller und theoretischer Physik gestreift werden, das in der deutschen Öffentlichkeit in letzter Zeit manchmal schief dargestellt worden ist. Es ist selbstverständlich, daß die experimentelle Forschung überall die notwendige

Vorbedingung für theoretische Erkenntnisse bildet, und daß prinzipielle Fortschritte nur unter dem Druck experimenteller Resultate, nicht durch Spekulationen errungen werden. Andererseits dürfte doch oft die Richtung, in der die experimentelle Forschung fortschreitet, durch die Wege der Theorie bestimmt sein. Das berühmteste Beispiel für die ergänzende Zusammenarbeit, die seit dem Beginn der modernen Naturwissenschaft das Verhältnis von Theorie und Erfahrung bestimmt hat, ist wohl die gemeinsame Leistung Tycho Brahes und Keplers. Das ungeheure Beobachtungsmaterial Tychos über die Planetenbewegungen, das Kepler nie in dieser Genauigkeit hätte sammeln können, war die notwendige Voraussetzung für die Arbeit Keplers; die Richtung, in der sich die Astronomie der nächsten Jahrhunderte entwickelte, wurde durch die Entdeckungen Keplers bestimmt. Aber wir brauchen kaum soweit zurückzugehen, um dieses Wechselspiel von Erfahrung und theoretischer Kenntnis zu beobachten: Die Wandlung der Grundlagen der exakten Naturwissenschaft, die sich in der modernen Physik vollzogen hat, ist Schritt für Schritt durch experimentelle Untersuchungen erzwungen worden. Ein Vergleich der Arbeitsgebiete der physikalischen Laboratorien jetzt und vor zwanzig Jahren zeigt andererseits sofort, wie sehr durch die Änderung unserer Kenntnis der Naturgesetze auch die Richtung der experimentellen Forschung verändert wird; und jede Neuerung, die in der beobachtenden Physik ihren Einfluß ausübt, pflanzt sich von dort in die Entwicklung der Technik fort. Wenn also in der heutigen Zeit darüber beraten wird, ob das Interesse der Öffentlichkeit sich in erster Linie der Technik, der experimentellen oder der theoretischen Wissenschaft zuwenden solle, so sollte vor allem bedacht werden, daß diese drei Arbeitszweige sich gegenseitig bedingen und ergänzen. Es ist in jedem Zeitpunkt die Aufgabe der reinen Naturwissenschaft, den Boden urbar zu machen, auf dem die Technik wachsen soll; und da der bebaute Boden bald verbraucht wird, ist es wichtig, daß stets neuer hinzugewonnen werde. Diesem Zweck dient auch die theoretische Forschung. Letzten Endes beruht die Wechselwirkung zwischen Technik und Naturwissenschaft darauf, daß sie beide aus den gleichen geistigen Quellen gespeist werden; ein Vernachlässigen der reinen Wissenschaft wäre ein Sympton für das Versiegen der Kräfte, die das Leben von Technik und Wissenschaft gemeinsam bedingen.

Mit dem eben geschilderten Einfluß auf die Technik und die experimentelle Forschung ist aber wohl die Wirkung, die von der Wandlung der Grundlagen der exakten Naturwissenschaft ausgehen kann, noch nicht erschöpft. Ein Gebiet, in dem bereits manche Ansätze zu einer solchen Wirkung vorliegen, ist die philosophische Erkenntnistheorie. Hier ist die von Kant aufgeworfene und seitdem viel diskutierte Frage nach der Apriorität der Anschauungsformen und Kategorien durch die Kritik der absoluten Zeit und des euklidischen Raumes in der Relativitätstheorie, des Kausalgesetzes in der Quantentheorie in ein neues Licht gerückt worden. Einerseits hat sich herausgestellt, daß unsere raumzeitlichen Anschauungsformen und das Kausalgesetz nicht in dem Sinne unabhängig von aller Erfahrung sind, daß sie in alle Zukunft notwendig inhaltliche Bestandteile jeder physikalischen Theorie bleiben müßten. Andererseits ist, wie besonders *Bohr* betont hat, auch in der modernen Physik die Anwendbarkeit dieser Anschauungsformen und des Kausalgesetzes die Voraussetzung jeder objektiven wissenschaftlichen Erfahrung. Denn wir können Verlauf und Resultat einer Messung gar nicht anders

mitteilen, als indem wir die dazu nötigen Handgriffe und die Zeigerablesung als objektive, in Raum und Zeit unserer Anschauung sich abspielende Vorgänge beschreiben, und wir könnten aus einem Meßresultat nicht auf die Eigenschaften des beobachteten Objekts schließen, wenn das Kausalgesetz nicht einen eindeutigen Zusammenhang zwischen beiden garantierte. Der scheinbare Widerspruch zwischen diesen beiden Feststellungen löst sich, wenn man bedenkt, daß die physikalischen Theorien nur dort eine von der klassischen Physik verschiedene Struktur besitzen können, wo ihre Gegenstände nicht mehr Objekte einer unmittelbaren sinnlichen Erfahrung sind, d. h. wo sie den Bereich der täglichen Erfahrung, die von der klassischen Physik beherrscht wird, verlassen. In dieser Weise hat die moderne Physik die Grenzen, die der Idee des „a priori“ in den exakten Naturwissenschaften gesteckt sind, genauer bezeichnet, als dies zu Kants Zeiten möglich war. Die Frage, wieweit diese Idee in den weiteren philosophischen Bereichen, die für Kant das Wesentliche waren, noch fruchtbar bleibt, ist von dem neu gewonnenen Standpunkt aus noch nicht zu Ende diskutiert worden.

Diese erkenntnistheoretischen Spezialfragen hängen schon mit der zweiten großen Aufgabe zusammen, die der physikalischen Theorie gestellt ist: uns Aufschluß zu geben über die allgemeineren Zusammenhänge der Natur, in der wir stehen. Die Naturwissenschaft darf sich dieser Aufgabe nicht entziehen, wenn sie sich selber treu bleiben will. Es sei nur daran erinnert, daß in der Antike einige der ersten Vertreter der entstehenden Naturerforschung zugleich Träger einer religiösen Bewegung waren. Und wenn wir bedenken, daß die Wandlung des naturwissenschaftlichen Weltbildes am Ende der Renaissance das ganze geistige und kulturelle Leben der folgenden Zeit umgestaltet hat, so liegt es nahe, auch mit einem Einfluß der jetzt eingetretenen Wandlung auf weitere Bereiche des geistigen Lebens zu rechnen. Wenn auch die in jüngster Zeit erfolgte Wandlung an Bedeutung nicht zu vergleichen ist mit jener großen beim Beginn der Neuzeit, so wird sie doch vielleicht ausreichen, um die Anschauung, die wir etwa das naturwissenschaftliche Weltbild des 19. Jahrhunderts nennen, durch etwas anderes zu ersetzen. Ich möchte dies näher ausführen: Die naturwissenschaftlichen Anschauungen, die im letzten Jahrhundert als die selbstverständliche Grundlage aller Naturforschung galten, hatten seit dem Beginn der Neuzeit erst allmählich die festen Formen angenommen, die wir jetzt kennen. Die grundsätzlich neue Entdeckung, von der die ganze Kraft der naturwissenschaftlichen Entwicklung ausging, war die Erkenntnis, daß es außerhalb der Bewußtseinssphäre des Mittelalters, in deren Mittelpunkt der Gedanke an eine übernatürliche Offenbarung stand, noch einen großen Bereich der Wirklichkeit gab. Man stieß auf jene objektive, unbezweifelbare Realität, die man durch Beobachten der Natur und durch die Ausführung von Experimenten in Erfahrung bringen kann. Eine natürliche Konsequenz dieser Entdeckung war der Versuch, in diesem objektiv Realen, das der Gegenstand der menschlichen Forschung geworden war, das Allgemeine vom Speziellen zu sondern. Aus einer Fülle von Einzelfeststellungen schälte sich als eigentlicher Kern der neuen Naturwissenschaft eine Gruppe von Grundannahmen heraus, die allen naturwissenschaftlichen Untersuchungen scheinbar notwendig zugrunde lag. Der Einfluß der neuen Realität machte sich nun auch in der Philosophie geltend, und die Grundlagen der neuen Naturerkenntnis erschienen als Teile großer philosophischer Systeme. Ähnlich wie im Altertum die Geometrie das Vorbild für folgerichtiges

philosophisches Denken lieferte, so entstanden unter dem Einfluß der Naturwissenschaft die philosophischen Systeme, bei denen — ähnlich wie in ihr — eine oder mehrere als unbezweifelbar erkannte Wahrheiten an die Spitze gestellt und alles andere aus diesen deduziert werden sollte. Die Systeme von Cartesius und Spinoza sind Beispiele dafür. Auch die Philosophie Kants, die eine Kritik der voreiligen Dogmatisierungen naturwissenschaftlicher Begriffe beabsichtigte, konnte die Erstarrung des naturwissenschaftlichen Weltbildes nicht hindern; sie hat diese sogar in mancher Beziehung vielleicht gefördert. Denn nachdem die Grundzüge der klassischen Physik als die Vorbedingung a priori physikalischer Forschung erkannt waren, entstand durch eine naheliegende, aber unrichtige Extrapolation der Glaube, sie seien absolut, d. h. für immer gültig und könnten durch neue Erfahrungen nie verändert werden.

Damit bildete sich der feste Rahmen der klassischen Physik. Es entstand die Vorstellung einer objektiven, in Zeit und Raum sich abspielenden körperlichen Welt, die einer Maschine vergleichbar dem ersten Anstoß nach unabänderlichen Gesetzen folgt. Die Tatsache, daß diese Maschine ebenso wie die ganze Naturwissenschaft selbst wieder ein Produkt des menschlichen Geistes war, erschien als unwesentlich und für das Verständnis der Natur belanglos. Erst diese Ausdehnung naturwissenschaftlicher Denkformen weit über ihren legitimen Anwendungsbereich hinaus führte wohl zu der oft beklagten Spaltung des geistigen Lebens in die wissenschaftliche Region einerseits und die im engeren Sinn lebendigen Bereiche der Religion und der Kunst andererseits. Die exakte Wissenschaft griff auf andere Bezirke des geistigen Lebens über und bedrohte — überzeugt von der allgemeinen Gültigkeit und Anwendbarkeit der naturwissenschaftlichen Grundsätze — ihre selbständige Bedeutung; da aber ihre Kraft zu einer inhaltlichen Erfüllung dieser anderen Bereiche nicht genügte, bildeten sich aus der Gegenwehr schwer überschreitbare Grenzen zwischen den nunmehr feindlichen Gebieten. Das so entstandene naturwissenschaftliche Weltbild des 19. Jahrhunderts gilt als rationalistisch, weil sein Zentrum, die klassische Physik, aus einer geringen Anzahl rational analysierbarer Axiome aufgebaut werden kann und weil es daher von dem Glauben an die Möglichkeit der rationalen Analyse aller Realität in der Welt ausging. Es muß aber betont werden, daß die Hoffnung, aus der Kenntnis eines kleinen Teils der Welt das Verständnis ihrer unendlichen Mannigfaltigkeit zu gewinnen, niemals rational begründet werden kann. — Die Wandlung der naturwissenschaftlichen Grundlagen, zu der uns die Natur in den atomaren Erscheinungen in so wunderbarer Weise gezwungen hat, läßt zwar die klassische Physik unberührt; aber sie zeigt, daß naturwissenschaftliche Systeme — wie etwa die klassische Mechanik oder andere Teile der klassischen Physik —, stets in sich abgeschlossen sein müssen, um richtig sein zu können; daß also die Ausdehnung naturwissenschaftlicher Forschung auf neue Erfahrungsgebiete ganz anders erfolgt als durch Anwendung der früher bekannten Sätze auf neue Gegenstände. Ich möchte hier wieder an den vorhin besprochenen Vergleich erinnern zwischen der Entdeckung der Kugelgestalt der Erde und den Resultaten der modernen Physik. Solange die Erde als eine sehr große Scheibe galt, konnte man hoffen, daß der Mensch, der bis ans Ende der Welt gereist war, über alle Dinge, die es auf der Welt gibt, würde Aufschluß geben können. Mit der Entdeckung des Columbus, die doch nur die Ansichten über die bis dahin unbekannten Teile der Welt veränderte, wurde

diese Hoffnung für immer zerstört. Wir wissen jetzt, daß es viele Fragen gibt, auf die man durch noch so langes Reisen auf der Erde keine Antwort bekommen kann, weil gleichsam außerhalb dieses abgeschlossenen, in sich selbst zurückkehrenden Reiseweges erst die Unendlichkeit der Welt beginnt. In ganz ähnlicher Weise hat die moderne Physik gezeigt, daß das Gebäude der klassischen Physik — wie das der modernen Physik — in sich „abgeschlossen“ ist. Es reicht soweit, als die Begriffe, die seine Grundlage bilden, angewendet werden können; aber die Begriffe der klassischen Physik sind schon auf die Vorgänge der Atomphysik nicht allgemein anwendbar, also erst recht nicht auf alle Gebiete der Wissenschaft, die weiter von der klassischen Physik entfernt liegen. Die Hoffnung, alle Bereiche des geistigen Lebens von den Prinzipien der klassischen Physik her verstehen zu wollen, ist also wohl um nichts mehr gerechtfertigt, als die Hoffnung des Wanderers, der alle Rätsel lösen zu können glaubt, wenn er bis ans Ende der Welt reist.

Nun muß aber an dieser Stelle gleich dem Mißverständnis entgegengetreten werden, als habe die Wandlung in den exakten Naturwissenschaften bestimmte Grenzen für die Anwendung des rationalen Denkens überhaupt an den Tag gebracht. Nicht dem rationalen Denken, sondern nur gewissen Denkformen ist ein engerer Anwendungsbereich zugewiesen worden. Durch die Entdeckung, daß die Erde nicht die ganze Welt, sondern nur ein kleiner, in sich geschlossener Teil der Welt ist, wurde es möglich, die Unklarheiten des Begriffs „Ende der Welt“ zurückzuschieben und dafür eine genaue Karte der ganzen Erdoberfläche zu zeichnen. In ähnlicher Weise hat die moderne Physik eher die klassische Physik von manchen mit der Annahme ihrer unbegrenzten Anwendbarkeit verbundenen Unklarheiten gereinigt und gezeigt, daß die einzelnen Teile unserer Wissenschaft: z. B. Mechanik, Elektrizitätslehre, Quantentheorie in sich abgeschlossene, rational bis ins letzte durchdringbare wissenschaftliche Systeme sind, die die ihnen zugehörigen Naturgesetze wohl für immer richtig darstellen. Wesentlich ist hierbei die „Abgeschlossenheit“ der Systeme. Das wichtigste neue Ergebnis der Atomphysik war die Erkenntnis der Möglichkeit, daß ganz verschiedenartige Schemata von Naturgesetzen auf das gleiche physikalische Geschehen angewendet werden können, ohne sich zu widersprechen. Es liegt dies daran, daß in einem bestimmten System von Gesetzen wegen der Grundbegriffe, auf die es aufgebaut ist, nur ganz bestimmte Fragestellungen einen Sinn haben und daß es sich dadurch gegen andere Systeme, in denen andere Fragen gestellt werden, abschließt. Der Übergang der exakten Naturwissenschaft von den erforschten zu einem neuen Erfahrungsbereich wird sich also nie so vollziehen, daß etwa die bisher bekannten Gesetze einfach auf die neuen Erfahrungen anzuwenden wären. Vielmehr wird ein wirklich neuartiger Erfahrungsbereich stets dazu führen, daß sich ein neues System wissenschaftlicher Begriffe und Gesetze herausbildet, die zwar nicht weniger rational analysierbar, aber grundsätzlich anders als die früheren sind. Aus diesem Grunde nimmt die moderne Physik zu den Gebieten der Wissenschaft, die noch nicht zu ihrem Forschungsbereich gehören, eine andere Stellung ein als die klassische Physik. Wenn man z. B. an die Probleme denkt, die mit der Existenz lebendiger Organismen verbunden sind, so wird man nach Bohr vom Standpunkt der modernen Physik aus vermuten, daß sich die für die Organismen charakteristischen Gesetze in einer ähnlichen, rational genau durchschaubaren Weise von den rein physikalischen Gesetzen ab-

schließen, wie etwa die der Quantentheorie von denen der klassischen Mechanik. Ein ähnlicher Vorgang wird sich vielleicht, wenn auch in kleinerem Maßstab bei der Erforschung der Eigenschaften des Atomkerns abspielen, die im Mittelpunkt des Interesses der gegenwärtigen Physik steht: Das Gebäude der exakten Naturwissenschaft kann also kaum in dem früher erhofften, naiven Sinn eine zusammenhängende Einheit werden, so, daß man von einem Punkte in ihm einfach durch die Verfolgung des vorgeschriebenen Weges in alle anderen Räume des Gebäudes kommen kann. Vielmehr besteht es aus einzelnen Teilen, von denen jeder, obwohl er zu den anderen in den mannigfachsten Beziehungen steht und manche andere umschließt und von manchen umschlossen wird, doch eine in sich abgeschlossene Einheit darstellt. Der Schritt von seinen schon vollendeten Teilen zu einem neu entdeckten oder neu zu errichtenden erfordert stets einen geistigen Akt, der nicht durch das bloße Fortentwickeln des Bestehenden vollzogen werden kann.

So ist die heutige Naturwissenschaft mehr als die frühere durch die Natur selbst gezwungen worden, die alte Frage nach der Erfäßbarkeit der Wirklichkeit durch das Denken aufs neue zu stellen und in etwas veränderter Weise zu beantworten. Früher konnte das Vorbild der exakten Naturwissenschaft zu philosophischen Systemen führen, in denen eine bestimmte Wahrheit — etwa das „cogito, ergo sum“ des Cartesius — den Ausgangspunkt bildete, von dem aus alle weltanschaulichen Fragen angegriffen werden sollten. Die Natur hat uns jetzt aber in der modernen Physik aufs deutlichste daran erinnert, daß wir nie hoffen dürfen, von einer solchen festen Operationsbasis aus das ganze Land

des Erkennbaren zu erschließen. Vielmehr werden wir zu jeder wesentlich neuen Erkenntnis immer wieder von neuem in die Situation des Columbus kommen müssen, der den Mut besaß, alles bis dahin bekannte Land zu verlassen in der fast wahnsinnigen Hoffnung, jenseits der Meere doch wieder Land zu finden.

Diese Einsicht kann uns von dem früher nicht immer vermiedenen Fehler bewahren, neue Erfahrungsbereiche in ein altes, ihnen unangemessenes Begriffsgerüst einzwängen zu wollen. Daher wird es auch umgekehrt leichter sein, Denkweisen, die im Gegensatz zum Erkenntnisideal der klassischen Naturwissenschaft entstanden sind, in einen umfassenden und doch einheitlichen und logisch ausgearbeiteten Begriff von Wissenschaft einzufügen. Der Versuch, nun voreilig die verschiedenen Bereiche der menschlichen Erkenntnis zu verknüpfen mit dem Hinweis darauf, daß ihre Verschiedenheit vielleicht nicht mehr zu Schwierigkeiten führen werde, hätte allerdings ebensowenig die Kraft zu einer echten Vereinheitlichung des geistigen Lebens, wie seinerzeit die Verallgemeinerung der rationalen Naturwissenschaft zum rationalistischen Weltbild. Aber wie jene Verallgemeinerung gleichwohl fruchtbar wurde, indem sie dem Denken auf vielen Gebieten neue Wege zeigte, werden wir auch heute der Zukunft den besten Dienst erweisen, wenn wir den neugewonnenen Denkformen wenigstens die Wege ebnen und sie nicht um ihrer ungewohnten Schwierigkeiten willen bekämpfen. Vielleicht ist es nicht zu kühn, zu hoffen, daß uns dann neue geistige Kräfte der in den letzten Jahrzehnten so gefährdeten Einheit des wissenschaftlichen Weltbildes wieder näherbringen werden. [A. 116.]

VERSAMMLUNGSBERICHTE

10. Deutscher Physiker- und Mathematikertag.

Bad Pyrmont, 10. bis 15. September 1934.

Die Tagung wurde eröffnet von dem Vorsitzenden der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und der Deutschen Gesellschaft für technische Physik, Dr. K. Mey, Berlin, der die erschienenen Teilnehmer herzlich begrüßte und seiner Freude darüber Ausdruck gab, daß eine die Vorschätzung erheblich übertreffende Anzahl von Fachgenossen der Einladung zu dieser Tagung gefolgt sei. Er ging dann auf die Rolle der Physiker in den Aufgaben der Zeit ein und auf die Rolle der Theorie, die zu Unrecht zeitweise als weniger wichtig in den Hintergrund geschoben worden sei. Besser als Wortbekenntnisse beweise das 1. Hauptthema der Tagung: „Physik und Werkstoff“, daß die Physiker gewillt seien, ihre Arbeit in den Dienst der Volkswirtschaft und damit des Volkswohles zu stellen. — Für die Stadt Pyrmont sprach Kurdirektor Gallion, für die Mathematiker Prof. Perron, München, der auf die enge Verbindung zwischen Physik und Mathematik hinwies.

In der geschäftlichen Sitzung wurde — wie schon vor zwei Jahren vergeblich — als Ort für die Jahrestagung 1935 Salzburg in Aussicht genommen.

I. Hauptthema: Physik und Werkstoff.

(Leiter: G. Masing und A. Smekal.)

Zusammenfassende Vorträge.

A. Esau, Jena: „Technologische und physikalische Behandlung des Werkstoffproblems.“

Vortr. ging in kurzen Ausführungen auf die große Bedeutung der Werkstoffprobleme und — damit verbunden — der Zusammenarbeit von Physik und Technik ein. Wie Physik und Technik sich gegenseitig befruchten und welche wirtschaftlichen Erfolge die physikalische Forschung haben kann, wurde an einer Reihe von Beispielen dargelegt.

A. Smekal, Halle a. d. S.: „Das Werkstoffproblem vom Standpunkte des Physikers.“

In längeren Ausführungen gab Vortr. eine physikalische Schilderung des Werkstoffproblems — physikalisch im Sinne des Weges von der Empirie zur Werkstoffforschung —, dessen praktisch allein wichtiges Gebiet das des kristallinen Zustandes ist. Vortr. stellte als grundlegend für die weitere Erörterung die durch zahlreiche Veröffentlichungen bekannte Einteilung der Stoffeigenschaften in strukturempfindliche und strukturunempfindliche hin. Die Eigenschaften eines Werkstoffes sind durch drei Faktoren bedingt: die Eigenschaften der Einkristalle, die Eigenschaften der Korngrenzen und die Kornverteilung. Da die technisch wichtigen Eigenschaften die strukturempfindlichen sind, so sind letztlich die technischen Eigenschaften auf Einkristalleigenschaften zurückgeführt. Ein Vergleich von Theorie und Wirklichkeit bei Kristallisationsvorgängen zeigt den Einfluß des statistischen Charakters der Molekularvorgänge, der notwendig zur Entstehung von Kristallbaufehlern führt. Die Kristallbaufehler sind also eine ebenso grundlegende Erscheinung wie etwa die Brownsche Bewegung. Außer diesen primären Baufehlern gibt es sekundäre, die z. B. durch mechanische Beanspruchung entstehen. Beide Arten von Fehlstellen sind in statistischen Anordnungen vorwiegend in den Hauptwachstumsebenen zu finden. Ein ausgezeichnetes Material für Untersuchungen über solche Kristallbaufehler sind die Alkalihalogenide, von denen Kristalle mit bekannter Verteilung der Fehler gewonnen werden können. Als charakteristisches Beispiel besprach Vortr. Untersuchungen über die Elastizitätsgrenzen. —

G. Angenheister, Göttingen: „Physikalische Erforschung der Rohstoffquellen (Öle, Kohle, Erze).“

Nach einer Verordnung der Reichsregierung soll zur Sicherung der Rohstoffquellen und Erschließung von neuen eine geophysikalische Vermessung Deutschlands vorgenommen werden. Vortr. gab einen Bericht über die Wege zu diesem jetzt in Angriff genommenen Ziel und ging auf die geologische, auf die physikalische Fragestellung und auf die Methoden ein. Der

¹⁾ Vgl. diese Ztschr. 47, 587 [1934].