

Wege und Ziele der Theorie in der Physik.

Freiburger Universitätsvortrag gehalten am 14. Juli 1941

von

R. Mecke,

o. Prof. f. theoretische Physik a. d. Universität Freiburg i. Br.

Wenn ich heute die Reihe unserer Universitätsvorträge beschließe, so muß ich mit einer Rechtfertigung anfangen. Ich muß Ihnen zunächst sagen, was mich dazu veranlaßt hat, gerade dieses Thema zu wählen.

Stürmisch war die Entwicklung der Physik in den letzten Jahrzehnten, groß ihre Leistungen auf allen Gebieten und umwälzend ihr Einfluß auf unser tägliches Leben. Denken Sie daran — um nur ein Beispiel zu nennen —, daß es im verflorbenen Kriege vor 25 Jahren noch nicht den Rundfunk gab, dieses Machtmittel der Nachrichtenübermittlung, welches heute die Siegesmeldungen unserer Truppen sofort in jeden Haushalt, in alle Weltteile überträgt. Erinnern Sie sich, daß die Luftwaffe in ihrer Entwicklung, an der gerade die reine Physik ihren nicht unwesentlichen Anteil gehabt hat, damals noch nicht derartig fortgeschritten war, um wie diesmal entscheidend in einen Kriegsverlauf eingreifen zu können.

Als Physiker wäre es mir daher ein Leichtes gewesen, von diesen Leistungen deutscher Forschung zu sprechen, etwa in der Form eines Vergleichs der Physik zur Zeit des letzten Krieges und des heutigen. Ein dankbarer und noch größerer Zuhörerkreis wäre mir sicher gewesen. Wenn ich nun heute aber mit einem etwas spröderen und an die Aufmerksamkeit meiner Hörer wesentlich höhere Anforderungen stellenden Thema vor Sie trete, so waren zwei Gründe dazu Veranlassung:

Zweck unserer Vortragsreihe ist es, Ihnen auf den verschiedenen Fachgebieten unserer Universitas litterarum einen Einblick zu gewähren in die Arbeitsweise, in die Gedankenwelt des Hochschullehrers und Forschers. Er setzt sich nur zu leicht dem Vorwurf

der Weltfremdheit aus, lediglich weil er nicht gern von seiner Arbeit redet, wie er in stiller, mühseliger Kleinarbeit die Voraussetzungen erst schaffen muß für die Weiterentwicklung unseres Wissens. Denn Grundlagenforschung ist es, die wir an der Universität neben der Lehre in erster Linie zu treiben haben. Sie schafft neue Erkenntnisse und neue Hilfsmittel für andere Wissenschaften, und doch kann sie nur in seltenen Fällen mit Erfolgen aufwarten, die die breite Öffentlichkeit interessieren und von denen sie spricht.

Von diesen Grundlagen der Physik und auch der Mathematik als ihrer treuen Helferin, von den Voraussetzungen, die zu ihren Erfolgen geführt haben, d. h. von der Theorie oder, nach KANT, vom Weg der menschlichen Erkenntnis aus der Anschauung über die Begriffe zu den Ideen, will ich heute reden.

Noch ein weiterer Grund veranlaßt mich dazu. — Als nach dem Weltkrieg die Völker — kriegsmüde geworden — auch geistig ein fast unbezähmbares Hungergefühl zeigten, wurden durch eine geschickt geführte jüdische Reklame noch nicht ausgereifte Ideen der physikalischen Erkenntnis sehr zu Unrecht in den Mittelpunkt des öffentlichen Interesses gebracht. Insbesondere wurden rein mathematische, der Kritik der Allgemeinheit schwer zugängliche und auch tatsächlich nicht widerspruchsfreie Gedankengänge als die alleinige und das Weltbild umwälzende Geistestat eines Mannes hingestellt. Eine Überbewertung der Theorie in der Physik war die Folge. Die Reaktion hierauf konnte und durfte nicht ausbleiben. Sie kann aber heute als abgeschlossen gelten. Doch mancher verhängnisvolle Irrtum über das Wesen physikalischer Theorien entwickelte sich hieraus. Es ist z. B. falsch, wenn Einzelne, sei es aus Unkenntnis oder aus Abneigung gegen alles Mathematische, vielleicht auf Grund unangenehmer Schulerinnerungen oder wegen anderer Gründe, behaupten, daß die heutige Physik durch die Theorie einem gewissen Dogmatismus und Formalismus verfallen und darin vollständig erstarrt sei. Sie mißbrauchen damit nur die Tatsache, daß sich nun einmal nicht alle Menschen zur Mathematik eignen und degradieren die Theorie zu einer müßigen Gedanken-spielerei, statt ihre Erfolge zu würdigen.

Wenn aber heute, mitten im Kriege und 8 Jahre nach der nationalsozialistischen Erhebung, noch darüber diskutiert wird, ob in Deutschland auf den Hochschulen die experimentell ausgerichtete, d. h. deutsche Physik oder eine mathematisch beeinflusste und daher jüdische Physik vertreten ist, so muß ich hiergegen schärfsten Ein-

spruch erheben, denn damit werden manchem verdienstvollen deutschen Physiker, der redlich bestrebt ist, zum Wohle seines Vaterlandes zu arbeiten, Motive unterstellt, die er sich niemals — bewußt oder unbewußt — zu eigen gemacht hat. Ich möchte hier einen Vergleich aus der Medizin wählen:

Es wäre wohl verfehlt, würde man in der Behandlung der verschiedenen Krankheitsformen die Leistungen des mehr handgreiflich arbeitenden Chirurgen höher bewerten als die auf diagnostischen Erfahrungen aufgebauten Behandlungsmethoden des Internisten. Wohl wird es Zeiten geben wie in jeder Wissenschaft, wo die eine oder andere Methode mehr Erfolge und größere Fortschritte aufweist, auch Irrwege und Auswüchse werden sich feststellen lassen; sie dürften jedoch nur vereinzelt auftreten und von kurzer Lebensdauer sein. Aber wegen besonderer operativer Leistungen, etwa einer gut geglückten Hirnoperation, den Internisten, den Psychiater als überflüssig, seine Methoden als undeutsch zu bezeichnen, nur weil früher einmal diese Fächer vorwiegend durch Juden vertreten waren, dürfte einem vernünftig denkenden Menschen kaum einfallen.

Ebenso ist es in der Physik. Wenn ich z. Zt. das Fach der theoretischen Physik vertrete und mein Kollege STEINKE dasjenige der Experimentalphysik, so ist das nicht der Ausdruck zweier Weltanschauungen, sondern lediglich eine zweckmäßige Arbeitsteilung einer engen Arbeitsgemeinschaft.

Wie eng diese ist und wie schwierig die Wege sind, die zu einem Erkennen führen, wie innig dabei Mathematik und Physik miteinander verbunden sind und wie wenig Platz für ein rein spekulatives Denken vorhanden ist, das will ich versuchen, Ihnen im folgenden auseinanderzusetzen. Befürchten Sie dabei nicht, daß ich Sie mit mathematischen Formeln belästigen werde. Lassen Sie mich aber an Hand eines konkreten Beispiels den Werdegang einer Theorie, des Erkennens und Erfassens der Naturzusammenhänge kurz skizzieren, eines Beispiels allerdings, das z. Zt. die Krönung unserer physikalischen Naturerkenntnis darstellt: Der Erkenntnis von der Welleneigenschaft der Materie bzw. der Materialisation der Strahlung.

Mannigfaltig sind die Erscheinungen in der sich die Natur uns offenbart. Betrachten wir z. B. eine Schneeflocke unter dem Mikroskop, ein Stück Glas oder Zucker, einen Quarzkristall im polarisierten Licht, die violette Farbe des Joddampfes im Spektroskop, das fliegende Geschoß mit dem schnell erfassenden Auge der photo-

graphischen Kamera; oder gehen wir in den Weltenraum und staunen über die Form ferner Welten (Spiralnebel). Überall wohin wir blicken, erkennen wir Gesetzmäßigkeiten der Natur, die — sei es auf Grund ihrer Formgestaltung oder durch ein Gesetz der Zahlen — direkt dazu zwingen, die Beschreibung bzw. Zusammenfassung der Erscheinungen in das einfache Gewand mathematischer Formeln zu kleiden. Es sind dabei nicht immer Gründe der Zweckmäßigkeit oder der größeren Einfachheit (Ökonomieprinzip), die den Theoretiker dazu bewegen, auch künstlerische Motive (Schöpfungsprinzip) leiten ihn. Eine klar und durchsichtig aufgebaute Formel, ein harmonisch, symmetrisch gestaltetes Gesetz kann dem Mathematiker und Physiker den gleichen Genuß bereiten, wie dem Kunsthistoriker die Betrachtung eines Bildwerkes. Daß diese Gesichtspunkte nicht ausschlaggebend sein dürfen (ich erinnere hier an die Farbenlehre von GOETHE), braucht wohl nicht besonders betont zu werden.

Verständlich ist es aber, wenn der Physiker gewisse Vorstellungen der Erfahrung immer wieder verwendet, wie etwa die klassischen Gesetze der Himmelsmechanik, die ein KEPLER bei der Beschreibung der Planetenbewegung fand, beim Aufbau der Atome, eine Vorstellung, die lange vor unserer Zeit der deutsche Physiker FECHNER 1828 auch schon geäußert hat.

(Er schreibt: „Daß die Atome im Kleinen die Verhältnisse der Weltkörper im Großen, mit denen sie ohnehin durch gleiche Kräfte belebt werden, nachahmen, und jeder Körper sich gleichsam als ein System von unzähligen kleinen, in verhältnismäßig großen Entfernungen voneinander schwebenden Sonnen, die je einzeln oder mehrere gemeinschaftlich von planetaren Atomen umkreist werden, ansehen läßt.“)

Zwar erwies sich dieser Weg später trotz seiner Anschaulichkeit als ein Irrweg, trotzdem führte er, ich will sogar sagen gerade deswegen, zu wichtigen weiteren Erkenntnissen:

Man stellte zunächst auf Grund reichhaltigen Erfahrungsmaterials einen immer mehr sich verstärkenden Dualismus zwischen einer Wellen- und einer Korpuskelnatur des Lichtes fest, forschte weiter nach diesen Ursachen, benutzte hierbei einige, vielleicht formal erscheinende Analogieschlüsse gewisser mathematischer Gedankengänge¹⁾ und stellte dann überraschenderweise, und zwar rein „theoretisch“, fest, daß eine Geschoßgarbe hochgeschwinder Massenpartikelchen, ein sog. Kathodenstrahl, auf einen Kristall geschleudert,

¹⁾ Das FERMATsche Prinzip des kürzesten Lichtweges und das HAMILTONsche Prinzip der kleinsten Wirkung.

Erscheinungen hervorrufen müßte, die denen des Lichtes (Beugung) identisch sind. Erst dann gab das physikalische Experiment dieser Schlußfolgerung recht und eine gänzlich neue Erkenntnis vom Aufbau der Materie als einer Wellenerscheinung brach sich zwangsläufig Bahn. Wenige Jahre später schufen deutsche Forscher in sinn-gemäßer Anwendung dieser Erkenntnis das Übermikroskop — das Elektronenmikroskop —, das nun infolge seiner vor wenigen Jahren noch für unmöglich gehaltenen Leistungsfähigkeit weitere Einblicke in den Aufbau der Materie ermöglichte und somit weitere neue Erkenntnisse brachte.

Nur ein Beispiel von vielen über die Erfolge der Theorie in der Physik, aus der sich aber gleichzeitig die Grundeinstellung des Physikers zur Mathematik ergibt: Nicht ein bequemes Hilfsmittel der Ausdrucksweise ist sie ihm, kein abstraktes Geistesprodukt rein logischen Denkens oder gar ein leerer Formalismus mathematischer Zeichen, sondern er betrachtet sie stets als ein naturgebundenes, d. h. aus der Natur entstandenes und von ihr nicht trennbares Wissen seiner eigenen Wissenschaft.

In drei große Erscheinungsgebiete wird nun heute die Physik aufgeteilt: Die Lehre von der Mechanik bringt die Verknüpfung zwischen der trägen Substanz, dem erfaßbaren Raum und der erlebten Zeit. Die Wärmelehre schafft neben dem Substrat „Wärmemenge“ den neuen Begriff der Temperatur, und schließlich fassen wir in der Elektrizitätslehre verknüpft mit den optischen Erscheinungen all dasjenige zusammen, was wir seit MAXWELL unter einem elektromagnetischen Feldzustand verstehen.

Klassische Theorien nennen wir die mathematische Behandlung dieser Gebiete, nicht aber weil sie etwa veraltet sind oder gar um einen Gegensatz zur modernen Physik zu konstruieren, sondern weil diese Gebiete — jedes vom andern streng getrennt —, nach klassischer axiomatischer Methode behandelt werden: Ganz wenige Voraussetzungen (Axiome) werden an die Spitze dieser Theorien gestellt, Dogmen könnte man sie sogar nennen. Aus diesen Grundbegriffen wird dann deduktiv nach streng logischer Folgerung eine in sich widerspruchsfreie Theorie aufgebaut.

So finden wir in der klassischen NEWTON-GALILEI'schen Mechanik das Dogma vom unendlichen, euklidischen Raume und das von der beliebig teilbaren Masse. Zusammen mit dem zuerst aus dem Kraftbegriff heraus zu definierenden Begriff der trägen Masse und dem

Prinzip der Wirkung und Gegenwirkung (actio und reactio) entstehen hieraus dann die Ihnen bekannten Bewegungsgesetze.

In der Wärmelehre werden mit den sog. Hauptsätzen die Begriffe der Arbeitsfähigkeit der Wärme, der Entropie und der Temperatur definiert und alle Wärmeerscheinungen daraus abgeleitet.

Schließlich bauen wir in der Elektrizität und der Optik mit der Vorstellung eines Feldzustandes aus den MAXWELLSchen Gleichungen eine in ihren Ausmaßen kaum zu übertreffende Theorie auf.

Für alle diese Theorien gilt aber das, was ich bereits eingangs erwähnte, nämlich eine sinnvolle, d. h. ästhetische und künstlerische Abgeschlossenheit der Ansätze, ihrer Folgerungen und Anschauungen, vergleichbar mit einem Schachspiel, bei dem die Figuren, nach bestimmten Spielregeln bewegt, eine große Mannigfaltigkeit des Spielverlaufes ergeben. Und trotzdem würde die Forschung, wenn sie nur auf derartige Theorien aufgebaut wäre, im Erkennen der Natur bald zum Erliegen kommen; sie würde tatsächlich in dem uns so oft vorgeworfenen Dogmatismus erstarren. Ziel jeder Fortentwicklung ist es daher, die Grenzen der Begriffsbildungen zu erkennen, diese dann bewußt zu überschreiten, die Fesseln der Axiomatik zu sprengen.

Nahe lag es, dieses Ziel in der Physik zunächst dadurch zu erreichen, daß man versuchte, Zusammenhänge zwischen diesen drei Wissensgebieten zu finden, und nichts ist natürlicher für menschliches Denken, als wenn man hier der Mechanik, mit der man von Kindesbeinen an vertraut wurde, den Vorrang gab. Was man als Kind bei den ersten Geh- und Fallversuchen aus der Erfahrung heraus feststellte und erkannte, bleibt richtungsweisend für unser ganzes späteres physikalisches Denken, das wohl am besten in unserem Bestreben zum Ausdruck kommt, alle physikalischen Qualitäten auf drei Grundgrößen, die sog. physikalischen Dimensionen der Masse, der Zeit und der Länge zurückzuführen.

Bei der Wärmelehre gelang es tatsächlich — unter Zuhilfenahme eines besonderen Zweiges der Mathematik, der Wahrscheinlichkeitsrechnung — die Wärme auf eine mechanische, allerdings ungeordnete Bewegung zurückzuführen und damit dem zunächst rätselhaften Temperaturbegriff eine unserer mechanischen Denkweise entsprechende Deutung zu geben. Die Bemühungen scheiterten jedoch vollständig bei der Elektrizitätslehre und bei den Lichterscheinungen. Ja, Versuche einer derartigen stoffgläubigen materialistischen Denkweise führten sogar zu einer schweren Krise in der Physik, nämlich zu

dem bereits erwähnten Dualismus zwischen Wellen- und Materiestrahlung.

Worin liegen nun die Ursachen dieses Scheiterns begründet? Sicherlich wohl doch in unserer Tendenz, alles Geschehen mechanisch deuten zu wollen. Aber wie machen wir uns frei von diesen Anschauungen und wo ist die Lösung zu suchen?

Hier muß ich etwas weiter ausholen und auf den Uranfang alles physikalischen Forschens und mathematischen Denkens zurückgreifen. Wir wollen uns zurückversetzen in die Gedankengänge eines Kindes. Die erste Berührung, die es mit der Mathematik bekommt, geschieht zu dem Zeitpunkt, an welchem es an seinen Fingern zu zählen beginnt. Dieser Zahlenbegriff der positiven ganzen Zahl ist somit, aus dem Abzählen einer bestimmten Menge heraus entstanden, eine rein mechanische Operation. Es bedarf nur einiger weniger weiterer Erfahrungen, um auch zum Begriff der gebrochenen Zahl zu kommen, entstanden aus dem mechanischen Vorgange der Unterteilung der Substanz. Selbst die irrationale Zahl ist letzten Endes nur die Folgerung einer physikalischen Messung, etwa aus dem Versuch einer möglichst genauen Bestimmung des Verhältnisses vom Umfang eines Kreises zu seinem Durchmesser.

Rein mathematisches Denken erfordert es aber bereits, zur negativen Zahlenreihe vorzudringen. Es mag sein, daß die negative Zahl zunächst aus der Rechnungsart der Subtraktion beim Feststellen eines Defizits entstanden ist. Jedoch fordert dieser Begriff, physikalisch gesehen, doch etwas mehr Erkenntnis als nur die einer reinen Rechenoperation: Er verlangt, daß jede Menge durch eine andere, entsprechende ergänzt zum Nichts verschwinden soll. Wohl vermag uns der geschickte Zauberer ein derartiges Verschwinden von Gegenständen vorzutäuschen, doch auch er betont, daß alles mit rechten, d. h. mechanischen Dingen zugeht.

Und trotzdem finden wir diesen Dualismus zwischen positiv und negativ im physikalischen Geschehen vertreten, nämlich dasjenige, was wir eine elektrische Ladung nennen, besitzt als bisher einzige physikalische Größe in allen Punkten die Voraussetzungen einer negativen Zahl. Aber genau so wenig wie wir überhaupt erklären können, warum es einen positiven und einen negativen Zahlenbegriff — und nur diese beiden und nicht etwa noch einen dritten diesen gleichwertigen — gibt, so schwer wir auch Entstehen und Vergehen, d. h. Zukunft und Vergangenheit erfassen können, so wenig ist uns der Dualismus zwischen positiver und negativer

Ladung verständlich. Nur eines haben wir erkannt: Überall dort, wo durch eine Umwandlung der Strahlung eine Materialisation der Wellen stattfindet, trennt sie sich in einen positiven und einen negativen Bestandteil.

Aber einen ganz anders gearteten Zahlenbegriff kennt allerdings die Mathematik noch, entstanden aus einer zunächst wieder formal erscheinenden Erweiterung einer einfachen physikalisch-geometrischen Rechenaufgabe, nämlich des Bestimmens der Seitenlänge eines Quadrates, wenn der Flächeninhalt gegeben ist. Auch die Mathematik erkennt an, daß, wenn diese Rechenoperation auf die negative Zahlenreihe angewandt wird, sie zu einem irrationalen, d. h. mechanisch nicht mehr realisierbaren Ergebnis führt. Mit dem Buchstaben $i = \sqrt{-1}$ und dem Begriff „imaginär“ bezeichnet sie daher diese Operation. Trotzdem müssen wir feststellen, daß auch sie wieder zu wertvollen physikalischen Erkenntnissen führt. Ich möchte Ihnen diese an einem einfachen Beispiel erläutern:

Es ist Ihnen bekannt, daß beim Verbinden der beiden Pole einer Spannungsquelle durch einen Draht (etwa einer elektrischen Glühlampe) ein Strom entsteht, dessen Stärke sich aus dem Widerstand, den das Material des Drahtes dem Fließen der Elektrizitätsmenge entgegensetzt, berechnen läßt, und zwar nach einer ganz einfachen Beziehung, die wir wohl alle schon einmal als OHMSches Gesetz kennen gelernt haben. Wir wissen auch, daß dieser Widerstand sich durch eine Wärmeentwicklung, durch ein Aufglühen der Lampe bemerkbar macht, und wir sprechen dann von der Umwandlung der elektrischen Energie in Wärme- und Strahlungsenergie. Geben wir nun dem Draht durch Aufwickeln zu einer Spirale eine besondere Gestalt, so ändert sich zunächst nichts. Nehmen wir jedoch an Stelle eines nur in einer Richtung fließenden Stromes einen sog. Wechselstrom, der also seine Richtung periodisch ändert, so bemerken wir einen beträchtlichen zusätzlichen Widerstand, den wir als scheinbaren Widerstand bezeichnen, einmal weil er von der stofflichen Natur des Drahtes unabhängig ist, andererseits aber auch, weil er sich durch keine Energieumwandlung äußert.

Wir machen nun ferner das folgende Experiment: Wir zerschneiden den Draht und legen dann die beiden Drahtenden parallel nebeneinander. Es findet selbstverständlich — solange die Spannungsquelle konstant bleibt — kein Stromübergang statt, sobald sie aber wieder periodisch wechselt, messen wir einen Strom, verknüpft wiederum mit einem scheinbaren Widerstand, den wir als den kapa-

zitativen bezeichnen. Seine Größe hängt — ebenso wie der oben erwähnte induktive — nicht von der stofflichen Beschaffenheit des Drahtes, sondern lediglich von seiner Formgebung ab, daneben aber auch noch von der Wechselzahl (Frequenz) der Stromquelle. Es zeigt sich nun, daß — wenn wir diese scheinbaren, also imaginären Widerstände, unserem Zahlenbegriff $\sqrt{-1}$ geeignet zuordnen — wir die sonst recht verwickelten Vorgänge durch ein sehr einfaches erweitertes OHMSches Gesetz darstellen können. Wir stellen sogar noch fest, daß der induktive Widerstand dem Begriff der positiven imaginären Zahlenreihe, der kapazitive dem der negativen entspricht, d. h. fügen wir einem induktiven Widerstand einen kapazitiven Widerstand gleicher Größe hinzu, so beseitigen wir damit gleichzeitig beide scheinbaren Widerstände und nur der reale sog. OHMSche Widerstand verbleibt, ein Experiment, das wir täglich beim Einstellen unseres Radioapparates auf einen bestimmten Sender praktisch durchführen.

Und so macht denn auch die Technik von dieser imaginären Zahlenreihe, sowohl der positiven wie auch der negativen, einen recht realen Gebrauch. Es gibt heute wohl keinen Techniker, keinen Konstrukteur einer elektrischen Anlage, sei es der eines Radioapparates, eines Großkraftwerkes, einer Überlandzentrale, der nicht dieses Rechnen mit komplexen Zahlen völlig beherrscht und entsprechend anwendet. Wenn so die höchst real und praktisch eingestellte Technik dieses Verfahren verwendet, so fragen wir uns in der Theorie unwillkürlich, ob dies etwa nur Zufall, Formalismus, reine Rechenhilfe ist, oder ob hier ein tieferer physikalischer Sinn verborgen bleibt.

Betrachtet man nun die Fälle, bei denen sich eine derartige Behandlungsmethode als notwendig erweist, so stellt man mit Überraschung fest, daß es überall dort der Fall ist, wo es sich um die Zeitbestimmung mit einer Uhr, also um einen zeitlich periodischen Vorgang handelt. Geht man nun konsequenterweise noch einen Schritt weiter und behandelt die Rätselhaftigkeit des Zeitbewußtseins, des Ablaufs alles Geschehens überhaupt als Ausdruck einer solchen scheinbaren, also imaginären Größe, macht sie durch Multiplikation mit einem entsprechenden Faktor (nämlich mit dem der Lichtgeschwindigkeit) gleichwertig mit unserem Raumbegriff, so stellen sich sämtliche physikalischen Erscheinungen — in derartige mathematische Formeln gekleidet — als überaus einfach heraus. Mögen wir auch ruhig fernerhin den Standpunkt bewahren, daß hier

nur Formalismus zugrunde liegt, achtlos kann der denkende Physiker an dieser Tatsache trotzdem nicht vorübergehen.

Ich möchte jedenfalls gerade an dieser Stelle nicht mißverstanden werden, weil hier auch oft von einer jüdischen, d. h. spekulativen und als formal bezeichneten vierdimensionalen Naturauffassung gesprochen wird. Aber Raum wird für uns immer Raum und Zeit stets Zeit in unserem Denkvermögen verbleiben¹⁾, ja die Physik würde in der Mannigfaltigkeit ihrer Erscheinungsformen verarmen und fast trivial werden, wollte man nicht mehr zwischen Raum und Zeit unterscheiden und dadurch die Zahl der physikalischen Dimensionen von 3 auf 2 herabsetzen. Ich möchte nur feststellen, daß wir auf Grund unumstößlicher Tatsachen in der Lage sind, unseren aus der Erfahrung heraus geborenen Zahlenbegriffen ganz bestimmte physikalische Begriffe gegenüberzustellen, und zwar eindeutig und ausschließlich: der positiven Zahl den Begriff der Masse, der negativen Zahl den der elektrischen Ladung (Elektron) und der imaginären Zahl unseren Zeitbegriff. Die Folgerungen aus diesem Vergleich will ich nur in die Form eines Wunsches kleiden und alles andere Ihnen überlassen:

Gewisse experimentelle Erfahrungen der Physik lassen vermuten, daß vielleicht neue Erkenntnisse gewonnen würden, wenn ein gänzlich neuer, den bisherigen Begriffen aber koordinierbarer Zahlenbegriff entstünde. Mit Recht könnte daher der Physiker den Mathematiker auffordern, auf Grund seines rein geistigen Denkvermögens, losgelöst von jedem physikalischen Verständnis, einen derartigen neuen Begriff zu schaffen und der Physik zur Verfügung zu stellen. Sicher ist es, daß der Mathematiker nach einigen Versuchen — und dieselben sind gemacht worden²⁾ — dem Physiker den Auftrag zurückgeben wird, mit der vielleicht überraschenden Mitteilung, daß ihm vorläufig für die Schaffung dieses Begriffes die erforderlichen physikalischen Erkenntnisse fehlten und er vorerst um entsprechende Richtlinien bäte. Was hier vom Zahlenbegriff (Algebra) gesagt ist, gilt entsprechend auch für die Raumerfassung (Geometrie).

Hier hat aber umgekehrt der Mathematiker erkannt, daß die euklidische Geometrie nicht die einzige ihrer Art sein kann. Pflicht des Physikers ist es daher zu erforschen, inwieweit diesen anderen Geometrien bzw. welchen von ihnen ein physikalischer Inhalt ge-

¹⁾ Dies kommt auch in der Relativitätstheorie des vierdimensionalen Kontinuums deutlich zum Ausdruck.

²⁾ Z. B. bei der Matrizenrechnung der Quantenmechanik.

geben werden kann. Hier ist das letzte Wort noch nicht gesprochen, und nur das Lückenhafte unserer bisherigen Kenntnis kommt dadurch zum Ausdruck, nicht aber ein Spekulieren mit wesenlosen Theorien.

Wenn nun die Mathematik in der Prägung ihrer Grundbegriffe auch eng an das physikalische Geschehen gebunden bleibt, so macht sich der menschliche Geist doch in einem wesentlichen Punkt von der Naturerkenntnis bewußt frei. Stets wird er das Bestreben haben, einmal aus der Natur heraus gewonnene Begriffe zu verallgemeinern, um damit neue mathematische Theorien aufzustellen und so die Wissenschaft der Mathematik zu bereichern.

Mag das Kind wegen begrenzter Fingerzahl zunächst auch nur bis 10 zählen können, bald lernt es von 10 auf 100 und von 100 auf 1000 sein Zahlenvorstellungsvermögen zu ergänzen, um schließlich bei dem unendlich Großen, beim Unvorstellbaren zu endigen. Ebenso wird ein fortgesetzter Teilungsprozeß zum Begriff des unendlich Kleinen führen, als einer Größe, die immer noch kleiner als jede vorstellbare bleiben soll, ohne dabei die Null, das Nichts, zu erreichen. Aber bereits aus dieser Definition geht die Unmöglichkeit der physikalischen, zum mindesten der mechanischen Verwirklichung dieser menschlichen Denkweise hervor. Und erst recht stimmt uns die Betrachtung unserer Umwelt nachdenklich, z. B. die Tatsache, daß wir auf der ganzen Erde nur Menschen fast gleicher Größe antreffen (und die Größenunterschiede sind erstaunlich gering). Wohl ist es möglich, bei einem Kinde zunächst seine Phantasie anzuregen und ihm das Märchen von den Zwergen und den Riesen zu erzählen. Doch — kritischer eingestellt — erkennt es bald dieses Verallgemeinerungsbestreben als ein Phantasieprodukt menschlichen Geistes¹⁾, denn — so schließt es folgerichtig — „die Natur sorgt wohlweislich dafür, daß, wie das Sprichwort sagt, die Bäume nicht in den Himmel wachsen“. Ist es somit Zufall oder Konsequenz physikalischer Forschung, wenn wir auch aus dem Experiment heraus der Teilbarkeit der Materie und ihrer Gestalt eine untere Grenze setzen und so zum atomos, zum Unteilbaren, als einer der frühesten physikalischen Erkenntnisse kommen? Was aber für das Kleinste als Atom gilt, sollte eigentlich auch auf das unendlich Große anwendbar sein, denn die fernen Welten der Spiralnebel lassen im

¹⁾ Die Notwendigkeit und Nützlichkeit derartiger Betrachtungen für die Entwicklung wichtiger mathematischer Theorien (z. B. der Differentialrechnung) wird selbstverständlich dadurch nicht berührt.

Fernrohr ja erkennen, daß hier eine Endlichkeit besteht, auch wenn wir dieselbe heute noch nicht voll und folgerichtig erfassen und damit der allgemeinen Erkenntnis nicht zuführen können.

Wie steht es nun mit den beiden anderen Begriffen unseres mechanischen Denkens, dem Raume und der Zeit? Besteht auch hier entgegen dem Verallgemeinerungsprinzip der Mathematik ein Endlichkeitsbegriff alles physikalischen Geschehens?

Betrachten wir zunächst den Begriff der Bewegung (Geschwindigkeit), also derjenigen Größe, welche die drei Grundbegriffe der Mechanik (Masse, Raum, Zeit) auf das Engste miteinander verknüpft und greifen wir zurück auf die Wärmelehre als ein hierfür besonders geeignetes Untersuchungsobjekt. Denn wir haben ja bereits erkannt, daß der verschiedene Wärmezustand, die Temperatur des Körpers, in Wirklichkeit durch die verschiedene Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle charakterisiert wird: Je höher die Temperatur steigt, um so stärker wird die Durchschnittsgeschwindigkeit, sie ist um so niedriger, je mehr die Temperatur sinkt. Aber die Körper lassen sich nicht beliebig abkühlen, schließlich gibt es doch einen Punkt (er liegt bei -273°), bei dem jede weitere Abkühlung unmöglich wird, jede Bewegung der Moleküle also vollkommen aufhört. Ein wichtiges Axiom¹⁾ der klassischen Wärmelehre ist nun der Satz von der Unerreichbarkeit dieser Grenze. Tatsächlich hat es auch gewaltiger Anstrengungen menschlichen Denkens und eines sehr großen apparativen Aufwandes bedurft, bis man sich diesem Punkt auf weniger als $0,01^{\circ}$ genähert hatte. Dieses Prinzip von der Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunktes ist somit identisch mit der Ablehnung einer absoluten Bewegungslosigkeit, also einer unendlich kleinen mechanischen Geschwindigkeit.

Versuchen wir nun andererseits, die Geschwindigkeit eines Körpers beliebig zu steigern (und die Experimente über den radioaktiven Zerfall unserer Elemente geben die Möglichkeit hierzu), so stoßen wir auch hier auf unüberwindliche Schwierigkeiten, sobald die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes mechanisch, und sei es auch durch noch so kleine Teilchen, erreicht oder gar überschritten werden soll. Auch in dieser Erfahrungstatsache äußert sich eine weitere wichtige Erkenntnis, der durch den Satz von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit Ausdruck verliehen wird, oder besser gesagt durch den von der Nichtüberschreitbarkeit dieser Grenze durch mechanische Prozesse.

¹⁾ Eine Formulierung des 2. Hauptsatzes.

Sind diese Grenzen aber wirklich nicht erreichbar? Man wird mit Recht hier einwenden, daß doch die Untersuchung der Leuchterscheinungen, die Spektroskopie, eine derartig innige Wechselwirkung zwischen Materie und Licht festgestellt hat, der irgendwie Rechnung getragen werden muß. Wechselwirkungen pflegen wir nun in der Physik durch den Begriff der Energie zu erläutern. Unter Energie verstanden wir ursprünglich nur die Möglichkeit, mechanische Arbeit zu leisten. Sie ist aber mehr als das, sie ist eben Ausdrucksform dafür, daß sich die Natur uns in so mannigfaltiger Weise darzubieten vermag. Denn was bedeutet es sonst, wenn man von der Umwandlung der Energie, von ihren Formen als mechanische (kinetische), elektrische, magnetische, chemische Energie usw. spricht? Und wenn man nun bei derartigen Umwandlungsprozessen, z. B. bei den chemischen Reaktionen der Elementumwandlungen, also bei radioaktiven Zerfallvorgängen, immer wieder feststellt, daß auf der einen Seite Masse scheinbar verschwindet (man spricht hier auch von einem Massendefekt der Atomgewichte, der die sonst so schöne Hypothese von ihrer Ganzzahligkeit zerstört), auf der anderen Seite aber Energie in Form von Strahlung oder von schnell bewegten Teilchen erscheint, so ist es denn keine Vergewaltigung unserer bisherigen Begriffe mehr, Masse als (mechanische) Form der Energie aufzufassen bzw. der Energie Masse, d. h. Trägheit, zuzuschreiben.

Und hier beginnt sich nun der Kreis unserer Betrachtungen zu schließen: Das Quadrat unserer Grenzgeschwindigkeit mit der Masse multipliziert liefert uns den Maximalbetrag, den die Materie in Energieform herauszugeben vermag, übrigens keine leere Hypothese, denn genaue Durchrechnung zahlreicher Experimente hat die Richtigkeit dieser Beziehung einwandfrei bewiesen. Ungeheurere Energiebeträge sind es aber, die uns hier — scheinbar wertlos — zur Verfügung stehen: Jedes einzelne Gramm eines beliebigen Stoffes (nehmen wir z. B. Wasser) mit seinen 25 Millionen kWh Energieäquivalent in für uns brauchbare, z. B. elektrische Energie umgewandelt, würde ausreichen, um den gesamten technischen Energiebedarf des Reiches für mindestens einen Tag zu decken. Es ist daher schon der Mühe wert, wenn mancher Physiker sich heute unentwegt bemüht, durch geeignet geleitete Prozesse diese Energiequellen in irgendeiner Form zu erschließen und — was wesentlich schwieriger sein dürfte — sie zu beherrschen.

Wenn es also auf der einen Seite nicht möglich ist, ein Materienteilchen auf Lichtgeschwindigkeit zu bringen, auf der anderen Seite zahlreiche Umwandlungsprozesse von Materie in Strahlung und umgekehrt direkt beobachtet werden, so liegt ein Schluß nur zu nahe, nämlich der, daß die Materie selbst nur Wellennatur besitzen kann.

Es würde allerdings an dieser Stelle zu weit führen, würde ich Ihnen die Formgestaltung, den Werdegang und alle Folgerungen dieser Erkenntnis auch nur kurz erläutern. Lediglich auf einen einzigen Punkt möchte ich zum Schluß noch eingehen, weil er häufig mißverstanden wird, der aber das Bild unserer heutigen Naturerkenntnis abrundet. Zunächst muß ich aber einer grundlegenden Eigenschaft jeder Ausbreitung von Wellen Erwähnung tun: Von einer Strahlungsquelle — ob es sich hierbei um eine solche von Masseteilchen (Korpuskularstrahlung) oder um eine Wellenstrahlung handelt, sei zunächst gleichgültig — treffe ein feiner Strahl einen Auffangschirm. Um die Herkunft dieses Strahles, seine Richtung also, möglichst genau festlegen zu können, fertigen wir uns eine Zieleinrichtung an, und zwar in Form eines Diaphragmas mit einer möglichst feinen Öffnung, die wir nun in den Strahlengang bringen. Geht nun dieser Strahl durch die Öffnung hindurch, so legt die Verbindungslinie der Blendenöffnung mit dem Auftreffpunkt des Strahles am Schirm seine Richtung eindeutig fest, und zwar wird die Messung um so besser ausfallen, je enger wir die Öffnung wählen, wenn — und dieses ist wichtig — es sich um einen Strahl kleiner Massenteilchen handelt. Bei einer Wellenstrahlung hingegen tritt etwas Merkwürdiges auf, das wir mit Beugung bezeichnen: Je enger die Blendenöffnung gewählt wird, also je genauer wir versuchen, die Richtung des Strahles festzulegen, um so verwaschener erscheint uns der Auffangfleck am Schirm. Wollen wir diesen scharf erhalten, seinen Ort genau festlegen, so bleibt nichts anderes übrig, als die Blendenöffnung groß zu wählen, also auf eine genaue Richtungsbestimmung zu verzichten. Bei einer Wellenstrahlung lassen sich daher Lage und Richtung nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmen.

Wir könnten den Versuch noch etwas anders, wenn auch wesentlich schwieriger durchführbar anstellen, indem wir die Ergiebigkeit der Strahlungsquelle dadurch ermitteln, daß wir mittels eines Momentverschlusses den Strahl nur für einen kurzen Augenblick freigeben und am Auffangschirm die Energie bestimmen, die dieser kurze Lichtblitz hervorruft. Würden wir auch hier versuchen, die Ge-

nauigkeit der Energiemessung durch immer genauere Zeitbestimmung, also durch immer kürzere Belichtungszeiten zu steigern, so würde uns dieses bei einer Wellenbewegung ebenfalls nicht gelingen. Wir würden auch hier feststellen, daß je genauer wir die Zeit festlegen wollen, desto unsicherer unsere Energiemessung wird und umgekehrt. Wir haben hier somit ein Experiment, mit dem wir empirisch und eindeutig zwischen Korpuskular- und Wellenstrahlung unterscheiden können.

Wenn nun aber die Erfahrung zeigt, daß alle derartigen Versuche stets und immer — auch im Falle bewegter Massenpartikelchen — zugunsten der Wellenstrahlung ausfallen, so müssen wir in diesem Ergebnis das Walten eines umfassenden Naturgesetzes erblicken, dem in seiner allgemeinsten Formulierung HEISENBERG durch seine sog. Unschärferelation erstmalig Ausdruck verliehen hat.

Sie besagt, um auf die frühere Frage über den Endlichkeitsbegriff bei Raum und Zeit wieder zurückzukommen, daß weder eine Ortsangabe noch eine Zeitmessung mit beliebiger, unendlich großer Genauigkeit möglich ist, sondern daß auch hier dem Raum und der Zeit endliche Grenzen gesetzt sind, die allerdings nicht konstant bleiben, sondern durch die Ansprüche festgelegt werden, die wir an die Genauigkeit der notwendigerweise gleichzeitig durchzuführenden Richtungs-(Impuls-)Angabe bzw. Energiemessung stellen. Erst das Produkt aus den Genauigkeiten von Ort und Richtung (Impuls) bzw. von Zeit und Energie ist eindeutig festgelegt, und zwar durch die PLANCKSche Wirkungsgröße h .

Ich betone nochmals, daß es sich hier nicht um ein völlig neues Prinzip handelt, das auch nicht — wie häufig behauptet wird — eine Aufgabe des Kausalitätsprinzips bedeutet; es ist ein Prinzip, das wir zwar von der Optik her bereits als etwas Selbstverständliches kennen, dem aber durch die Entdeckung der Wellennatur unserer Materie eine Inhaltsform gegeben wurde, die grundlegend und richtungsweisend für unsere ganze heutige Naturerkenntnis ist und die vielleicht einmal die Erfüllung unseres alten Wunschtraumes, eines allgemeinen mechanischen, und zwar wellenmechanischen Weltbildes bringen kann, das dann auch die elektro-optischen Erscheinungen erfassen wird.

Ich bin am Ende meiner Betrachtungen angelangt und ich danke Ihnen für die Aufmerksamkeit, mit der Sie meinen nicht immer leichtverständlichen Ausführungen auf dem dornenvollen Weg zur Naturerkenntnis gefolgt sind. Das Ringen menschlichen Geistes um

diese Erkenntnis wird nie aufhören, die Natur wird immer noch Rätselhaftes genug in sich bergen. Wenn aber — um mit GOETHE zu sprechen — ein Wissen um dieses eines Tages reif wird zur Wissenschaft, so werden notwendigerweise neue Krisen entstehen, denn es wird dann stets die Differenz offenbar zwischen dem Alten und dem Neuen, dem Gewohnten und dem Revolutionären. Diese stets gleichbleibenden Wege und Ziele einer jeglichen Wissenschaft aufzudecken, Ihnen dabei gleichzeitig einige Anregungen zu eigenem Nachdenken zu geben, war Zweck meines Vortrages. Wenn ich mir auch versagen mußte, auf die empirischen Unterlagen mancher meiner Behauptungen einzugehen und ich mich andererseits bewußt ferngehalten habe von philosophischen Betrachtungen über die Grundvoraussetzungen physikalischen Denkens, so hoffe ich doch, daß Sie gespürt haben, wie unzertrennlich miteinander Geschehen und Idee, Experiment und Theorie, Physik und Mathematik verbunden sind. Mag sein, daß manche Betrachtung, manche Folgerung zunächst formal und wesenlos erschien, am Ende dieser langen Erkenntnisreihe stehen immerhin zwei wichtige Entdeckungen: die Umwandlungsfähigkeit der Masse in Energie und die Wellennatur unserer ganzen Materie. Und wenn gar die letztere eine so handgreifliche Form annimmt, wie sie die Konstruktion des Übermikroskops darstellt, von dem hoffentlich unsere Universität in absehbarer Zeit auch ein Exemplar besitzen wird, so werden Sie erkennen, wie unrecht jene ewigen Nörgler haben, die — ohne mit eigenen Leistungen aufwarten zu können — dauernd von einer Entartung unserer heutigen Physik durch die Theorie reden. Und wie deutsch unsere Forschung ist und wie ihr Weltgeltung verschafft wird, das zeigen wohl am besten unsere tapferen Truppen an der Front mit ihren unvergleichlichen Waffen, von deutschem Geist erdacht, geschmiedet von deutschen Händen.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau](#)

Jahr/Year: 1942

Band/Volume: [37](#)

Autor(en)/Author(s): Mecke R.

Artikel/Article: [Wege und Ziele der Theorie in der Physik 128-143](#)