

Die Frage nach der atomistischen Struktur der Energie.

Von
P. DEBYE.

Akademische Antrittsrede, gehalten in der Aula der Universität Zürich
am 8. Juli 1911.

Verehrte Anwesende!

Ich habe mir vorgenommen, heute vor Ihnen einige Erfahrungsergebnisse zu beleuchten im Lichte einer neuen, merkwürdigen Hypothese, welche in den letzten Jahren aufgetaucht ist. Unverkennbare Zeichen ihrer grossen Tragweite sind jetzt in so grosser Zahl vorhanden, dass diese Hypothese auch ausserhalb des engeren Fachkreises ein reges Interesse beanspruchen darf. Ich will sprechen über die Tatsachen, welche uns dazu führen, eine atomistische Struktur der Energie zu postulieren.

Längst haben wir uns ja alle daran gewöhnt, eine untere Teilbarkeitsgrenze der Materie anzunehmen, wäre doch ohne den Begriff des Atoms die ganze Chemie ohne klaren Ausgangspunkt. Neuer schon ist die Übertragung derselben Gedankenreihe in das Gebiet der Elektrizität, aber auch hier dürfen wir behaupten, dass das Elektron, das Atom der Elektrizität, seine reale Existenz bewiesen hat. Ganz neuerdings hat Weiss ein Atom des magnetischen Moments postuliert und alle Tatsachen, die er bis jetzt zusammengebracht hat, sprechen unbedingt für die Richtigkeit seiner Auffassung. Dennoch dürfte schliesslich die Annahme eines Energieatoms etwas fremdartig anmuten und um zunächst das unangenehme Gefühl, mit dem wir diesem Begriff begegnen werden, überwinden zu helfen, will ich vor allem einige Tatsachen hervorheben, welche uns vermuten lassen, dass der Unterschied zwischen Energie und Materie kein so tiefgreifender ist wie man gewöhnlich denkt. Zu diesem Zwecke will ich zeigen, dass zwei Begriffe, denen man sonst nur in der Mechanik zu begegnen gewöhnt ist, die Begriffe Impuls und Masse beide sich ohne weiteres auf die Energie übertragen lassen. Zunächst zu dem Begriff Impuls.

Denken Sie sich einen Massenpunkt, welcher sich mit einer gewissen Geschwindigkeit bewegt. Das Grundgesetz der Mechanik besagt dann, dass eine Änderung dieser Geschwindigkeit nur zustande kommen kann durch Einwirkung einer Kraft. Man kann das präziser so ausdrücken, dass man sagt: Bilde ich das Produkt Masse mal Geschwindigkeit und nenne dieses Produkt den „Impuls“ des Massenpunktes, so lautet das Grundgesetz der Mechanik: „Die Impulsänderung ist proportional der Kraftwirkung“ und im speziellen wenn keine Kraft vorhanden ist: „Der Impuls bleibt zeitlich konstant.“ Die Frage tritt nun auf, ob die Konstanz des Impulses auch für solche von äusseren Kräften freie Systeme behauptet werden kann, welche nicht rein materiell sind. Wir befinden uns in der glücklichen Lage neben einer klaren schon von Maxwell begründeten Theorie auch Experimente zu besitzen, welche über diese Frage Aufschluss erteilen können. Es sind das Experimente, ausgeführt von Lebedew, sowie von Nichols und Hull, welche unzweideutig zeigen, dass auf einen Körper auffallende Strahlung auf denselben eine mechanische Kraft ausübt. Zwar werden wir für unsren unmittelbaren Zweck ein Gedankenexperiment bevorzugen, aber dessen Resultat ist nach jenen Versuchen nicht im mindesten zweifelhaft. Denken wir uns eine Hohlkugel, welche nach allen Richtungen gegen Wärmeabgabe nach aussen geschützt ist mit Ausnahme einer kleinen Öffnung. Sie sei wärmer wie die Umgebung, strahlt also fortwährend Energie in eine Richtung nach aussen. Hängen wir die Kugel nun so auf, dass sie jedem kleinsten Druck nachgeben kann, so werden wir beobachten, dass sie langsam eine Bewegung annimmt in einer Richtung, entgegengesetzt derjenigen, nach welcher die Energie fortschreitet. Es scheint also auf den ersten Blick, als ob hier das Grundgesetz der Mechanik seine Gültigkeit verloren hätte, denn Kräfte äusseren Ursprungs sind ja nicht vorhanden, während andererseits dennoch eine Bewegung, d. h. also eine Impulsänderung der Kugel auftritt. Die einzige Möglichkeit, unsern Impulssatz beizubehalten, besteht nun darin, dass wir nicht allein der materiellen Kugel einen Impuls zuschreiben, sondern diesen Begriff geradezu auf die ausgestrahlte Energie übertragen und demnach behaupten: strahlende Energie, oder wie wir auch sagen können, das elektromagnetische Feld ist Träger eines rein mechanisch messbaren Impulses. Man könnte sich nun nach der älteren Anschauungsweise schliesslich noch denken, dass dieser Impuls seinen Sitz im Äther hätte, welchen man ja lange Zeit hindurch als Träger aller Lichtwirkungen, überhaupt aller elektromagnetischen Wirkungen anzusehen geneigt war. Aber seitdem die Relativitätstheorie Einstein's gezeigt hat, dass jener Äther eine unhaltbare Fiktion ist;

ist dieser Ausweg für uns verschlossen und wir können also tatsächlich nicht anders, wie das Feld an sich als Träger seines eigenen Impulses zu betrachten.

Aber damit ist die Analogie zwischen Energie und Materie nicht erschöpft. Verfolgt man nämlich näher die Bewegungsgesetze eines Körpers, der ausser seiner materiellen Masse eine (immaterielle) Energie trägt, nach den Prinzipien der Relativtheorie, so wird man mit Einstein notgedrungen dazu geführt, jeder Energie, in welcher Form sie auch auftritt, eine Masse zuzuschreiben, und zwar findet man für die Grösse dieser Masse einen ganz bestimmten Ausdruck, nämlich den Wert, Energie dividiert durch Quadrat der Lichtgeschwindigkeit. Sie werden mir natürlich nun sofort entgegen halten wollen, es sei von einer solchen Eigenschaft der Energie noch nie etwas beobachtet worden. Ich müsste dem beistimmen, aber ein Widerspruch ist das nicht. Wegen der kolossalen Grösse der Lichtgeschwindigkeit (300 000 km/Sek.) wird nämlich die Masse, welche zu einer für unsere Begriffe schon sehr grossen Energie gehört, eine ungeheuer kleine.¹⁾ Wenn man z. B. zwei Gramm Wasserstoff und 16 Gramm Sauerstoff sich mit einander zu Wasser verbinden lässt, so tritt eine verhältnismässig sehr grosse Wärmeentwicklung auf; sie beträgt 68400 Cal. und entspricht, durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit dividiert, dennoch nur einer Masse von $3,2 \cdot 10^{-9}$ Gramm. Man sieht also, dass man an einen direkt experimentellen Nachweis dieser Folgerung der Relativtheorie nicht denken kann, aber andererseits wäre ein Zweifel an diesem Resultat annähernd ebenso unberechtigt, wie ein Zweifel an der Relativtheorie selbst. So werden wir also gezwungen, die Aussage, die Energie trägt wie die Materie Impuls und Masse, als wahr anzuerkennen.

Damit dürfte nun zunächst die Sonderstellung der Energie aufgehoben und die Möglichkeit eines Zusammenhangs zwischen Energie und Materie erkannt sein. Von diesem Standpunkte aus wird es uns nun vielleicht weniger Wunder nehmen, wenn wir dazu geführt werden, ebenso wie bei der Materie auch bei der Energie eine untere Grenze der Teilbarkeit anzunehmen. Wenden wir uns jetzt zu Versuchen, welche erst dann eine einfache Deutung finden, wenn man die Annahme einer unendlich fein verteilbaren Energie fallen lässt.

Das erste Gebiet, welches hier in Betracht kommt, ist das der Wärmestrahlung. Hier fand man auch historisch den ersten Anlass zu den fraglichen Betrachtungen und zwar wurde die Hypothese zuerst formuliert vom Berliner Physiker Planck. Grundlage

¹⁾ Das Beispiel entnehme ich dem neulich erschienenen Buche: „Das Relativitätsprinzip“ von M. Laue.

der ganzen Strahlungstheorie bildet ein berühmter Satz, welcher nach Kirchhoff benannt wird. Er vergleicht die Strahlung in Hohlräumen, deren Berandung gebildet wird von Körpern verschiedener Beschaffenheit, aber gleicher Temperatur. Nach aussen hin mögen wir uns dieselben als vollständig gegen Wärmeabgabe geschützt vorstellen. Der Satz behauptet dann, dass die Strahlung vollständig unabhängig ist von der Beschaffenheit und dem Material der Wände. Präziser fassen wir die Aussage noch so: Denkt man sich aus der ganzen, in einem solchen Hohlraum vorhandenen Strahlung einen gewissen Teil ausgeschieden, dessen Wellenlänge nur zwischen engen Grenzen schwankt, und führt man diese Operation aus für die verschiedenen zu vergleichenden Hohlräume, so findet man, dass die zu dieser Wellenlänge gehörige Energiedichte überall denselben Wert aufweist. Nachdem man nun das universelle Moment in der Strahlung erkannt hat, ist die nächste Frage natürlich nach der Art und Weise, wie die zu einer Wellenlänge gehörige Energie von der Temperatur der Berandungen des Hohlraums abhängt. Um diese Abhängigkeit zu berechnen, hat man folgenden Weg eingeschlagen: Man geht davon aus, dass die Strahlung ein elektromagnetischer Vorgang ist und bildet nun einen möglichst einfachen Apparat, einen Gedankenapparat, welcher imstande ist, die Energiedichte der Strahlung, so weit sie zu einer bestimmten Wellenlänge gehört, zu messen. Ein solcher Apparat besteht z. B. aus einem elektrisch geladenen Teilchen, das wegen einer Art elastischer Bindung um seine Ruhelage Schwingungen von ganz bestimmter Periode ausführen kann, ähnlich wie ein gewöhnliches Pendel. Wenn man einen solchen Resonator in ein Strahlungsfeld hineinbringt, so wird er aus demselben Energie aufnehmen, und zwar nur solche, deren Schwingungszahl annähernd mit seiner Eigenfrequenz übereinstimmt. Ist er genügend lange im Hohlraum, so wird er einem Gleichgewichtszustand zustreben, indem er pro Zeiteinheit ebensoviel Energie verliert als er aufnimmt. Die Energie, welche er im Mittel enthält, wird der zu messenden Energiedichte der Strahlung proportional sein. Der Resonator ist demnach als Messinstrument ohne weiteres geeignet.

Wir sehen uns nun um nach einem Weg, diese Energie zu der Temperatur der Berandung in Beziehung zu setzen. Aus der Erfahrung wissen wir, dass ein aus solchen Resonatoren bestehender Körper, welcher längere Zeit im Innern unseres Hohlraumes verbracht hat, schliesslich dieselbe Temperatur, wie die umgebende Hülle annimmt, so dass dann kein einseitiger Wärmeübergang mehr zwischen Versuchskörper und Hülle stattfindet. Aber weiter wissen wir, dass wir dasselbe erreichen können, wenn wir den aus Resonatoren be-

stehenden Körper nicht durch Strahlung, sondern durch direkte Berührung verbinden mit irgend einem Körper, welcher dieselbe Temperatur wie der Hohlraum hat. Die Wahl jenes zweiten Körpers ist an sich gleichgültig, aber wenn wir die Anordnung theoretisch verwerten wollen, so wird es gut sein, als Übertragungskörper einen solchen zu wählen, dessen innere Beschaffenheit wir kennen. Als erster kommt hier irgend ein Gas in Betracht. Nach der sogenannten kinetischen Theorie besteht ja ein Gas aus kleinsten Teilchen, Moleküle, welche sich nach allen Richtungen im Raum bewegen mit Geschwindigkeiten, die je nach der Temperatur verschieden sind und welche z. B. beim leichtesten Gas, beim Wasserstoff, eine Grösse von 1800 m/Sek bei 0° C. erreichen. Die Teilchen stossen zusammen, tauschen dabei ihre Geschwindigkeiten gegenseitig aus, sie stossen auf die Wandungen des umgebenden Gefässes und erzeugen so den Druck. Wenn ich nun den aus Resonatoren bestehenden Körper mit einem solchen Gas in Berührung bringe, so werden die Resonatoren durch die Stösse, welche sie von den einzelnen Gasmolekülen erfahren, in Schwingung versetzt werden, und werden ebenfalls wieder einem Gleichgewichtszustande zustreben, dessen mittlere Energie abhängen wird von der mittleren Energie, welche einem Gasmoleküle zukommt. Letztere ist uns bekannt, denn einerseits überlegt man leicht, dass der durch die Stösse der Moleküle verursachte Druck des Gases der mittleren Energie eines Moleküls proportional ist. Andererseits wissen wir aus der Erfahrung, dass nach dem Gay-Lussac'schen Gesetz der Druck eines Gases proportional ist der absoluten Temperatur, (deren Nullpunkt bekanntlich bei -273° C. anzunehmen ist). Man muss also schliessen, dass die mittlere Energie eines Gasmoleküls der absoluten Temperatur proportional ist. Es handelt sich jetzt nur noch darum, aus der Energie eines Gasmoleküls auf die Energie des Resonators zu schliessen. Ich will das Resultat vorweg nehmen, um nachträglich einiges zu der hier angewandten Überlegung zu sagen. Es lautet: Die Energie des Resonators ist zwei Drittel der Energie des Gasatoms und damit ebenfalls der absoluten Temperatur proportional.

Die Überlegungen, welche zu diesem Resultat führen, gehören zur sogenannten statistischen Mechanik, welche vor einigen Jahrzehnten von Boltzmann begründet wurde. Man sagt „statistische Mechanik“, weil die Grundgesetze der Mechanik durchweg auch für die Moleküle anerkannt werden und man fügt die nähere Umschreibung „statistische“ hinzu, um anzudeuten, dass man ausserdem einen ausgiebigen Gebrauch von den Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung macht. Der allgemeine Gedankengang möge aus den folgenden Bemerkungen erhellen. Man denke sich den aus Resona-

toren bestehenden Versuchskörper, beobachtet von einem mit so feinen Mitteln ausgestatteten Beobachter, dass er die Resonatoren alle einzeln in ihrem Bewegungszustand verfolgen kann. Derselbe wird dann bemerken, dass die Energie eines Resonators fortwährende Schwankungen durchmacht. Auch die Gesamtenergie des Systems wird ebenfalls solche Schwankungen ausführen. Diese werden nun zwar für den ideellen Beobachter bemerklich sein, dagegen werden sie für unsere Mittel in der weitaus überwiegenden Mehrzahl der Fälle durchaus unmerklich bleiben. Nimmt man an, dass die Energieübertragung zwischen den Gasatomen und den Resonatoren nach den Gesetzen der klassischen Mechanik verläuft, so kann man, ohne näher auf den Mechanismus einzugehen, dennoch jedem Bewegungszustand des Systems eine Zahl zuordnen, welche die Häufigkeit seines Vorkommens misst im Laufe der Zeit. Letzteres natürlich, indem man die Regeln der Statistik benutzt. Nun kann man auch den häufigsten oder wahrscheinlichsten Zustand bestimmen und erhält dann den Anschluss an die Wirklichkeit durch das Postulat, dass jener wahrscheinlichste Zustand mit dem wirklich beobachteten identisch ist. So findet man dann das allgemeine Gesetz der gleichmässigen Energieverteilung, wonach im Temperaturngleichgewicht jeder Freiheitsgrad an sich eine Energie bekommt, welche nur von der Temperatur abhängt. Von diesem Satze ist das vorhergeschickte Resultat ein Spezialfall. Es könnten allein darüber noch Zweifel bestehen, ob es wohl gestattet ist, den mittleren Zustand mit dem wirklich beobachtbaren zu identifizieren. Um die Berechtigung zu dieser Annahme zu begründen, will ich folgendes Beispiel betrachten im Sinne Boltzmann's.

Denken sie sich einen Liter Wasserstoff, indem nach der kinetischen Theorie eine grosse Zahl, sagen wir, n Moleküle enthalten sind. Im Mittel werden nun in jedem Kubikzentimeter, wo auch aus dem Gefässe herausgenommen, immer die gleiche Zahl Moleküle vorhanden sein. Das ist der praktische Befund. Ebenso wie bei unsern Resonatoren wird man nun schliessen müssen, dass auch von diesem mittleren Zustand im Laufe der Zeit Abweichungen auftreten müssen, aber es bleibt noch immer die Frage übrig, ob diese Abweichungen auch in genügender Grösse vorhanden sind, um beobachtbar zu werden. Fragen wir deshalb z. B. nach der Wahrscheinlichkeit, dass 999 Kubikzentimeter unseres Gases Materie enthalten und dass ein Kubikzentimeter vollständig leer ist. Die Wahrscheinlichkeit, welche wir hier meinen, sei z. B. folgendermassen definiert. Wir denken uns das Gas mit einem photographischen Apparat jede Zehntelssekunde aufgenommen und denken uns nun diese Photographien alle neben-

einander gelegt. Die Wahrscheinlichkeit für den obigen Zustand können wir dann direkt messen durch die Anzahl Male, dass er photographiert worden ist im Vergleich zu der Anzahl Photographien, welche eine gleichmässige Verteilung der Gasmoleküle aufweisen. Berechnet man diese Wahrscheinlichkeit, so findet man dafür den Wert $e^{-\frac{u}{1000}}$. Bedenkt man nun, dass in unserem Liter Gas $2,8 \cdot 10^{22}$ Moleküle vorhanden sind, so wird die Wahrscheinlichkeit gemessen, durch die ungeheuer kleine Zahl $e^{-2,8 \cdot 10^{19}}$, d. h. 1 dividiert durch eine Zahl mit mehr als 10^{19} Ziffern vor dem Komma.

Halten wir uns nun vorläufig überzeugt von der Richtigkeit der obigen Überlegungen und wiederholen die Hauptresultate. Einmal fanden wir, dass die Energie eines Resonators in einem Strahlungsfelde proportional der Strahlungsenergie ist; andererseits fanden wir, dass die mittlere Energie des Resonators in Berührung mit einem Gas, welches dieselbe Temperatur besitzt wie der Hohlraum, in dem die Strahlung eingeschlossen ist, eine Energie bekommt, welche proportional der absoluten Temperatur ist. Daraus schliessen wir, dass auch die Strahlungsenergie proportional der absoluten Temperatur sein muss.

Vergleichen wir dieses Resultat mit der Erfahrung: Ich zeichnete Ihnen eine Figur, längst derer horizontalen Axe die Temperatur aufgetragen ist. In senkrechter Richtung dazu messen wir die zu einer bestimmten Wellenlänge gehörigen Strahlungsenergie. Der vorher theoretisch erschlossene Zusammenhang zwischen diesen beiden Grössen würde dann dargestellt werden durch eine gerade Linie, welche durch den Nullpunkt hindurch geht. Dem gegenüber ergibt nun die Erfahrung ein teilweise stark abweichendes Resultat. Für hohe Temperatur rechts in der Figur ist der Unterschied zwischen den beobachteten und den berechneten Ordinaten gleich einer konstanten endlichen Grösse, d. h. die beobachtete Kurve verläuft parallel der berechneten. Je höher die Temperatur wird, um so mehr verschwindet also die Differenz beider Energiewerte gegenüber dem Betrag eines derselben. Bei einer Annäherung an den absoluten Nullpunkt nähern sich die beiden Kurven derart, dass sie schliesslich für die Temperatur Null, durch den Nullpunkt des Koordinatensystems hindurchgehen. Besser noch treten die charakteristischen Unterschiede hervor, wenn man das Verhältnis beobachteter zu berechneter Energie bildet. Dasselbe ist Null im absoluten Nullpunkt und strebt dann bei steigender Temperatur immer mehr dem Werte 1 zu. Die Differenzen zwischen Erfahrung und Theorie treten also besonders dort klar hervor, wo die Energiewerte, welche zur Verfügung stehen,

verhältnismässig klein werden. Das ist nun ein direkter Hinweis auf die Existenz eines Elementarquantums der Energie. Gehen wir nämlich unsern früheren Überlegungen nach, so sehen wir, dass sie ihr charakteristisches Gepräge erhalten durch die Grundannahme, der Resonator sei imstande, die Energie so aufzunehmen, wie sie sich ihm bietet, ganz unabhängig davon, wie gross oder wie klein die auftreffende Menge ist. Suponieren wir nun einmal, dass der Resonator kleine, auffallende Energiemengen nicht beachten würde, sie nicht in sich aufnehme und dass er erst in Tätigkeit rückt, wenn dieselbe einen ganz bestimmten Betrag oder ein ganzes Vielfaches davon ausmacht. Dann wird, so lange die verfügbare Energie klein ist, der Resonator geraume Zeit hindurch überhaupt nichts aufnehmen und nur sozusagen in einem Glücksfall sich ein Energiequantum erhaschen können. Im Mittel genommen, wird also sein Energieinhalt kleiner sein wie der aus den frühern Betrachtungen gefolgerte. Ist dagegen die zur Verfügung stehende Energie gross gegenüber dem Energiequantum, so wird es keine Rolle mehr spielen und als unendlich klein angesehen werden können. Durch Einführung der Quantenstruktur der Energie kommen wir also, wie Sie sehen, wenigstens qualitativ wieder in Übereinstimmung mit der Erfahrung. Allerdings ist mit diesen qualitativen Überlegungen allein natürlich die Sache noch nicht erledigt, aber auch die genauen quantitativen Überlegungen geben uns Recht, denn die Kurve über die Abhängigkeit der zu einer Wellenlänge gehörigen Strahlungsenergie von der Temperatur, die Planck auf Grund der Quantenhypothese berechnet hat, fällt vollständig mit der experimentell gefundenen zusammen.

Bis jetzt sprachen wir von einem Resonator mit einer ganz bestimmten Eigenfrequenz. Die nächste Frage, die wir uns vorlegen müssen, ist nun die, ob das Energiequantum von den Eigenschaften des Resonators unabhängig ist. Das ist indessen nicht der Fall, aber es gilt ein ganz einfaches Gesetz, welches die Eigenschaften des Resonators mit der Grösse des Energiequantums verbindet. Man findet nämlich, dass ein Resonator ein umso grösseres Energiequantum beansprucht, je grösser seine Schwingungszahl ist und zwar sind Energiequantum und Schwingungszahl einander direkt proportional. Gerade die Proportionalität unserer Quanten mit der Schwingungszahl bedingte es, dass wir in der Strahlung zuerst ihren Einfluss erkannten; beobachtet man nur bei genügend kleiner Wellenlänge, so treten die Quanteneigenschaften in ausgesprochenster Form hervor. Als universelles Gebilde erscheint also nicht gerade das Energiequantum, sondern eine andere Grösse mit der Dimension

einer Wirkung, d. h. einer Energie, multipliziert mit einer Zeit¹⁾, aus der sich dann erst nachträglich ein Elementarquantum der Energie ableitet. Aber die Hauptsache für uns bleibt erhalten, die Energie verhält sich so, als wäre sie nicht bis ins Unendliche teilbar, sondern als bestehe sie aus Quanten von endlichem Betrag, wenn auch dieser Betrag nicht von den äussern Umständen unabhängig ist. Es liegt die Sache ungefähr so, wie in der Chemie, wo wir auch mit den Elementen als selbständige Gebilde rechnen, obwohl wir wissen, dass sie sich in das bekannte periodische System einordnen lassen und sogar ein Fall einer direkten Umwandlung eines Elementes in ein anderes experimentell sichergestellt wurde. Allerdings möchte ich nicht den Anschein erwecken, als ob wir über das universelle im Energiequantum ebensowenig orientiert wären, wie über ein eventuell mögliches Uratom der Chemie. Die erstere Frage dürfte ihrer Beantwortung sehr viel näher stehen. Auch dürfte für manche Anwendungen ein Aufsteigen bis zum universellen Wirkungsquantum unter Übergelung der Zwischenstufe des Energiequantums durchaus notwendig sein, wie insbesondere Untersuchungen von Sommerfeld über die Rolle des Elementarquantums in der Theorie der Röntgen- und γ -Strahlen gezeigt haben.

Nachdem wir auf Grund der Strahlung nun den Begriff des Energiequantums erkannt hatten, war es nötig, zu untersuchen, ob es auch noch andere Gebiete der Physik gebe, wo die endliche Teilbarkeit der Energie eine Rolle spielen könnte. Die ersten Tatsachen, die man da in Betracht zu ziehen hat, betreffen naturgemäss Messungen, welche uns Aufschluss geben können über die innere Energie der Moleküle. Zwar können wir dieselbe an sich nicht ohne weiteres messen, aber die Zunahme, welche sie bei einer Erhöhung der Temperatur des Körpers um 1° erfährt, ist ja leicht der Messung zugänglich. Es ist das, was man die spezifische Wärme eines Körpers nennt. Nun lag gerade schon seit langer Zeit ein weit umfassendes Gesetz vor über die Grösse der spezifischen Wärmen der einzelnen chemischen Elemente im festen Zustande. Ich meine das Dulong-Petit'sche Gesetz, welches aussagt, dass Mengen verschiedener Körper, welche sich wie die Atomgewichte derselben verhalten, zur Erhöhung ihrer Temperatur alle den gleichen Betrag an Energie benötigen, aber auch wissen wir schon seit langer Zeit, dass dieses Gesetz nur angenäherte Gültigkeit beanspruchen kann, und dass z. B. Kohlenstoff, Bor und Silicium ausgeprägte Abweichungen von dieser Regel zeigen, so weit man bei gewöhnlicher

¹⁾ Das universelle Wirkungsquantum hat nach Planck den Wert $6,548 \cdot 10^{-27}$ erg sec.

Temperatur beobachtet. Bei höherer Temperatur dagegen nähern die spezifischen Wärmen der verschiedenen Elemente sich alle einer bestimmten, für alle Elemente gültigen Grenze. Wenn wir voraussetzen würden, dass jedes einzelne Atom Energie auch in den kleinsten Quanten aufnehmen kann, so sind die Abweichungen vom Dulong-Petit'schen Gesetz vollständig unverständlich. Die Atome unterscheiden sich dann nicht von einander in denjenigen Eigenschaften, welche für ihre Energieaufnahme in Betracht kommen, und so müsste man schliessen, auf Grund der statistischen Mechanik, dass das Dulong-Petit'sche Gesetz in seiner strengsten Fassung vollständige Gültigkeit haben müsse. Nimmt man dagegen einmal die Existenz von Energiequanten an, deren Grösse erst bedingt wird durch die Eigenschaften des Atoms, speziell durch die Festigkeit, mit der es in seiner Lage festgehalten wird, welche ja die Schwingungszahl bestimmt, mit der es um seine Ruhelage schwingen kann, so sind wie in der Strahlung die Energiequanten verschiedener Elemente verschieden. Von diesem Standpunkte aus haben die Abweichungen vom Dulong-Petit'schen Gesetz dann nichts befremdendes mehr an sich. Am besten geht das aus der vorher gezeichneten Kurve hervor. Ebenso wie sie früher die Energie der Strahlung mass, kann ich ihre Ordinaten jetzt betrachten als Mass für die Energie eines Atoms. Die spezifische Wärme, welche definiert ist durch die Änderung dieser Energie, dividiert durch die zugehörige Änderung der Temperatur, erscheint dann in derselben als Tangente der gezeichneten Kurve. Während also nach der ältern Anschauung, der die gerade Linie entspricht, die spezifische Wärme konstant sein müsste für alle Temperaturen, wird sie hingegen nach der auf Grund der Quantenhypothese gezeichneten Kurve nur für hohe Temperaturen konstant, um für niedrige Temperaturen immer kleiner und kleiner zu werden, und schliesslich im Nullpunkt der absoluten Temperatur den Wert Null zu erreichen. Einstein war der erste, welcher auf diese Konsequenz hinwies und alle ältern und neuern Beobachtungen geben ihm Recht. Der Verlauf der spezifischen Wärme als Funktion der Temperatur kann tatsächlich im wesentlichen durch die aus der Quantenhypothese folgenden Kurve dargestellt werden.

Wir haben also zwei feste Erfahrungstatsachen erkannt, welche man sich ohne Annahme der Quantenhypothese nicht erklären kann. Aber damit sind wir noch nicht zu Ende. Einstein wies schon frühzeitig darauf hin, dass die Quantenhypothese auch beim lichtelektrischen Effekt den Schlüssel zur Erklärung liefern dürfte. Lenard beobachtete, dass die Geschwindigkeit der Elektronen, welche durch Bestrahlung mit violettem Licht aus Metallen austreten, vollständig

unabhängig ist von der Intensität des auffallenden Lichtes und dass nur dessen Farbe eine Rolle spielt. Nimmt man an, dass ein Elektron zu seiner Befreiung stets ein Energiequantum beansprucht, so ist die Unabhängigkeit von der Intensität klar. Überdies kann man schliessen, dass die kinetische Energie eines Elektrons ebenso wie die Energie des Energiequantums proportional der Schwingungszahl des Lichtes sein muss, ein Gesetz, was ebenfalls der Hauptsache nach richtig scheint.

Auch damit dürfte nun das Anwendungsgebiet dieser Hypothese nicht abgeschlossen sein. Ich denke vor allen Dingen an das sogenannte dritte Wärmetheorem vom Nerst, welches besagt, wenigstens in der weiteren Fassung, welche ihm von Planck gegeben wurde, dass für alle Körper, ganz unabhängig von ihrer Beschaffenheit, die Entropie im absoluten Nullpunkt einen bestimmten Wert, sagen wir den Wert Null, erhält. Das bedeutet etwa dasselbe, wie die Aussage, die verschiedenen Körper haben Eigenschaften, welche umso weniger von einander verschieden ausfallen, je mehr wir uns dem absoluten Nullpunkt nähern und gerade das ist auf Grund der Elementarquantenhypothese leicht verständlich, denn dort, wo die Energie nur in ganz kleinen Mengen zur Verfügung steht, in der Nähe des absoluten Nullpunktes, da machen die individuellen Unterschiede in der Grösse der Energiequanten keinen Unterschied mehr. Sie werden in der Grenze für die Temperatur gleich Null geradezu unendlich gross gegenüber derjenigen Menge, welche einem Molekül nach der älteren Anschauung zukommen würde.

Noch andere Gebiete, wo das Elementarquantum höchst wahrscheinlich eine führende Rolle zu übernehmen hat, sind z. B. die kinetische Theorie der Magnetisierung, der elektrischen Leitfähigkeit, der Flüssigkeiten. Bei der Magnetisierung beobachtet neuerdings Perrier im Kamerlingh-Onnes'schen Laboratorium bei tieferen Temperaturen Abweichungen von den Formeln, welche Langevin auf Grund der Boltzmann'schen kinetischen Theorien abgeleitet hat. Es scheint mir, dass der einzige Ausweg zur Erklärung von der Elementarquantenhypothese ausgehen muss. Die elektrische Leitfähigkeit, welche wir durch Bewegungen der im Metall befindlichen Elektronen erklären, zeigt in der Nähe des absoluten Nullpunktes, wie ebenfalls neuerdings von Kamerlingh-Onnes gefunden wurde, grosse Anomalien, welches man wieder erklären kann durch die Annahme, dass die mittlere kinetische Energie der Elektronen, also auch ihre mittlere Geschwindigkeit bei tiefen Temperaturen eine viel kleinere ist wie die, welche man nach der älteren Theorie erwarten würde. Sie sehen, genau das entsprechende zu dem experimentellen Faktum bei den spezifischen Wärmen. Um schliess-

lich noch die Flüssigkeitstheorie in den Kreis unserer Betrachtungen zu ziehen, bemerke ich, dass man dort findet, dass der Übergang eines Moleküls aus dem flüssigen in den gasförmigen Zustand eine grössere Energie beansprucht, als man nach der älteren kinetischen Theorie erwarten würde, was z. B. neuerdings von Dieterici diskutiert wurde. Vielleicht liefern auch hier die Quanten den Schlüssel zum Verständnis dieser und anderer damit zusammenhängenden, bis jetzt nicht erklärten Beobachtungsergebnisse.

Übersehen wir nun die Tatsachen, welche ich Ihnen vorführte, so können wir nicht umhin, die Quantenhypothese für eine äusserst zweckentsprechende, ja durchaus notwendige zu halten. Zwar ist sie in den Einzelheiten noch gar nicht klar, ja kann vielleicht im Laufe der Zeit z. B. durch eine stärkere Betonung der Rolle des Wirkungsquantums eine ganz andere Gestalt annehmen, aber jedenfalls ist das sicher, dass sie einen Schritt in der guten Richtung bedeutet und wir berechtigt sind, von der experimentellen und theoretischen Erforschung der Quanten die weitgehendsten Aufschlüsse zu erwarten.