

# Strahlung und Materie

Autor(en): **Kowalski, Joseph von**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali**

Band (Jahr): **95 (1912)**

PDF erstellt am: **06.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-90198>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Strahlung und Materie

von

Joseph VON KOWALSKI

---

Die letzten zwanzig Jahre haben die Wissenschaft um manche überraschende Entdeckung bereichert, welche unsere theoretischen Ansichten über das physikalische Geschehen in mancher Hinsicht geändert haben, aber auch das systematische, zweckbewusste, nicht auf Zufall beruhende Studium der physikalischen Erscheinungen, hat nicht minder zu ähnlichen Umwälzungen der Theorie beigetragen.

Kaum auf einem anderen Gebiete ist diese Umgestaltung so markant, als auf dem Gebiete der Strahlungserscheinungen. Hier haben die Untersuchungen über die Entstehung der Strahlung, über die Wechselwirkung derselben mit der Materie, über den Druck der Strahlung und noch viele andere uns bewogen die Ansichten, welche wir uns von der Natur der Strahlung gebildet haben, einer gründlichen Revision zu unterziehen. Im Folgenden will ich es versuchen, Einiges über diese Fragen zu berichten und einen wenigstens flüchtigen Blick zu werfen auf die heutige Theorie des Strahlung und ihre Wandlungen.

Ehe ich zu meinem Thema übergehe, will ich aber zunächst präzisieren, von welcher Art von Strahlung ich sprechen will. Wir sprechen ja heute von Licht- und Röntgenstrahlen, von Kathoden- und Kanalstrahlen, von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen. Wenn ich nun an dieser Stelle schlechtweg von Strahlung spreche, so

will ich nur von der dem Licht verwandten Strahlung sprechen. Präziser gesagt, sprechen wir von der Strahlung, welche:

1° im Vakuum eine mit der Lichtstrahlung gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeit besitzt;

2° interferenz- und polarisationsfähig ist.

Eine derartige Strahlung kann am einfachsten beschrieben werden unter Zuhilfenahme einer im Raume gerichteten Grösse, welche periodisch mit der Zeit ihren Wert ändert und sich wellenartig im Raume mit der Geschwindigkeit von  $3 \times 10^{10}$  cm. pro Sekunde fortpflanzt. Die Eigenschaften dieser gerichteten Grösse, des Strahlungsvektors, können, ohne besondere Hypothesen über die Natur der Strahlung zu machen, den meisten Strahlungserscheinungen befriedigend angepasst werden und so kann eine sehr vollkommene phänomenologische Theorie der Strahlung aufgebaut werden. In derselben ist bekanntlich die Intensität der Strahlung eine Funktion des Maximalwertes des schwingenden Vektors, die Richtung desselben im Raume stellt uns den Polarisationszustand dar; den verschiedenen Arten dieser Strahlung, so den verschiedenen Farben des Lichtes, entsprechen die verschiedenen Schwingungsperioden der Strahlungsvektoren.

Entsprechend der Gleichung

$$\lambda = c \times T$$

wo C die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Strahlung im Vakuum, T die Periode und  $\lambda$  die Wellenlänge einer Strahlenart ist haben wir in der Tabelle I. die heutzutage bekannten Strahlenarten zusammengestellt.

Die erwähnte phänomenologische Theorie der Strahlung giebt uns trotz ihrer Vollkommenheit und Sicherheit, trotz ihrer grosser Leistungen in Bezug auf die Oekonomie des Denkens im Sinne Machs, keine wahre Befriedigung. Unser Geist sieht zwar ein, dass den festen Boden einer rein phänomenologischen Theorie verlassend und spezielle Hypothesen über das Geschehen in der Natur machend, er keine endgültige Erklärung der Tatsachen gibt. Wir sind im Klaren, dass in einer auf auch noch so geistvollen Hypothesen aufgebauten Theorie

« Alles nur Bildnis » ist, aber trotzdem zieht uns das Schöne, das Kunstvolle eines gelungenen Erklärungsversuches stark an und wirkt oft gewaltig anregend auf unser Denken. Kaum ein Kapitel der Geschichte der Wissenschaft beweist dieses in so prägnanter Weise, wie die Geschichte der Entwicklung unserer Ansichten über die Strahlung. Der Newtonschen Emissions-

TABELLE I

Wellenlängen-Gebiet	Bezeichnung	Entdecker
$\infty$ bis $4000 \mu$	Elektrische Strahlen	Hertz (1887) Lebedew (1895) Lampa (1897)
$4000 \mu$ bis $313 \mu$	unbekannt	
$313 \mu$ bis $8,5 \mu$	Reststrahlen	Rubens & Nichols (1898) Rubens & Baeyer (1911)
$8,5 \mu$ bis ca. $0,8 \mu$	Ultrarote Strahlen	W. Herschel (1800)
ca. $0,8 \mu$ bis ca. $0,38 \mu$	Sichtbare Strahlen	
ca. $0,38 \mu$ bis ca. $0,18 \mu$	Ultraviolette Strahlen	J.W. Ritter (1801) Cornu (1879)
$0,18 \mu$ bis $0,12 \mu$	Schumann-Strahlen	Schumann (1890)
$0,12 \mu$ bis $0,09 (?) \mu$	Reflex-Strahlen	Lyman (1904) Lénard (1910)
	Unbekannt	
$\lambda < 4 \times 10^{-5} \mu$	Röntgenstrahlen	Röntgen (1895) Sommerfeld (1912) Laue (1912)

theorie folgt die Huyghens-Fresnelsche Theorie des elastischen Aethers, dann kommt die vollkommene des elektromagnetischen Aethers von Maxwell und Hertz. Diese letztere, durch neue Hypothesen von Drude, Lorentz u. A. bereichert, erscheint im moderneren Gewande als elektronische Theorie,

um neuerdigs durch Einführung des Relativitätsprinzips, wie Schlemihl von seinem Schatten, vom Aether befreit zu werden.

Aber auch in dieser scheinbar sehr vollkommenen Form ist sie nicht in der Lage uns Antwort auf gewisse Fragen zu geben, welche wir uns stellen bei Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie. Im Speziellen bei der so grundlegenden Frage der Emission und Absorption des Lichtes durch Materie sind wir nicht in der Lage aus *ihr allein* Konsequenzen zu ziehen die uns die dabei eintretenden Verhältnisse vorausszusagen erlauben. Um diesem abzuhelpen haben Theoretiker wie Planck, Jeans, Einstein u. A. neue Methoden und Gesichtspunkte bei der Betrachtung der entsprechenden Probleme eingeführt. Ehe wir aber zur Besprechung derselben übergehen, erlauben Sie mir Ihnen in Erinnerung diejenigen Tatsachen zu bringen, welche für unsere späteren Erwägungen von Wichtigkeit sind.

Eine der wichtigsten neueren Eroberungen für unsere Kenntniss der Natur der der Strahlung ist die Entdeckung des sogenannten *Strahlungsdruckes*.

Schon Kepler im Jahre 1619 spricht im Werke *Harmonice mundi* die Vermutung aus, dass die Krümmung des Schweifes der Kometen in der Nähe der Sonne infolge des Druckes zu Stande kommt, welchen die Strahlung der Sonne auf denselben ausübt. Die Existenz dieses Druckes haben im XVIII Jahrhundert de Mairan und du Fay vergeblich experimentell nachzuweisen gesucht. Das Aufblühen der Undulationstheorie des Lichtes liess sogar gewissen Gelehrten die Existenz dieses Druckes als wenig wahrscheinlich erscheinen. In den nicht so sehr alten ersten Auflagen der populären Astronomie von Newcomb wird das Vermuten eines solchen von der Strahlung ausgeübten Druckes als unwissenschaftlich bezeichnet. Maxwell war der erste, der aus der elektromagnetischen Wellentheorie die Existenz dieses Druckes ableiten wollte, aber erst Bartoli (1876) und sodann Boltzmann ist es gelungen einen strengen theoretischen Nachweis dieses Druckes zu führen. Im Jahre 1874 veröffentlichte Crookes einen Bericht über Versuche, welche im ersten Augenblick die Hoffnung erregten, dass der Strahlungsdruck sich auch experimentell demonstrieren lässt.

Es sind dieses die berühmt gewordenen Versuche über das Radiometer. Der Verlauf der Radiometer-Erscheinungen war zwar derart verwickelt, dass man es sofort vermuten konnte, es wären nicht reine Druckkräfte der Strahlung, welche die Radiometerbewegungen bewirken, aber erst die genaue Ausrechnung dieser Kräfte durch Boltzmann im Jahre 1884 bewies, dass dieselben viel kleiner als die beobachteten sind. Bezeichnen wir mit  $U$  die Energiedichte der Strahlung, mit  $r$  das Reflexionsvermögen der Oberfläche, auf die die Strahlung normal auffällt, so wird der von der Strahlung ausgeübte Druck gegeben durch die Formel :

$$p = U(1 + r)$$

Dem entsprechend, da die Sonne im Mittel einer senkrecht zur Strahlung gelegenen Ebene ca. 2,54 kleine Kalorien pro  $\text{cm}^2$  und Sekunde zusendet, erhalten wir für eine vollkommen reflektierende Fläche einen Druck von ca. 1,2 mg. pro Quadratmeter. Sind die Flächen nicht vollkommen reflektierend, so ist die Kraft noch kleiner.

Im Radiometer beobachten wir aber Bewegungen, welche viel grösseren Kräften entsprechen.

Es war der Moskauer Physiker Lebedew, welchem es im Jahre 1901 gelungen ist einwurfsfrei die Existenz dieses Strahlungsdruckes nachzuweisen. Im Jahre 1903 gelingt es den amerikanischen Physikern Nichols und Hull den Druck mit einer wundervollen Genauigkeit zu messen. Diese Gelehrten führten Messungen mit verschiedenen Strahlungsdichten aus, indem sie das Licht ihrer Strahlungsquelle durch Absorption schwächten. In der folgenden Tabelle sind ihre Resultate mit den berechneten Zahlen verglichen.

TABELLE II

Beobachtet in	Berechnet in	Differenz in %
$10^{-5} \times \text{Dyn/cm.}$	$10^{-5} \times \text{Dyn/cm.}$	
7,01 + 0,02	7,05 + 0,03	— 0,6
6,94 + 0,02	6,86 + 0,03	+ 1,1
6,52 + 0,03	6,48 + 0,04	— 0,6

Wenn man beachtet wie schwierig es ist, so kleine Druckkräfte zu messen so muss man diese Uebereinstimmung zwischen Berechnung und Versuch als glänzend ansehen.

In neuerer Zeit wurden die Versuche von Lebedew und die von Nichols und Hull von anderen Gelehrten bestätigt. Speziell sind hier die Versuche von Poynting und die geistreiche Anordnung von Amerio zur Demonstration des Strahlungsdruckes zu erwähnen.

Nachdem Fitzgerald theoretisch abgeleitet hatte, dass der auf die Teilchen eines Gases von der Strahlung ausgeübte Druck, proportional dem Absorptionsvermögen des Gases für die gegebene Strahlung ist, hat Lebedew im Jahre 1910 durch Versuche nachgewiesen, dass sich dies mit einer Genauigkeit von 10 % bestätigt. Auch hier ist die gesuchte Uebereinstimmung in Anbetracht der experimentellen Schwierigkeiten eine überraschende.

*Wir dürfen also heute die Existenz des Strahlungsdruckes als eine experimentale Tatsache betrachten.*

An zweiter Stelle haben wir hier zu erwähnen die Untersuchungen, welche auf dem Gebiete der sogenannten Temperaturstrahlung gemacht worden sind. Die Temperaturstrahlung könnte man zunächst definieren als Strahlung, welche ein Körper infolge seiner Temperaturerhöhung emittiert. Es zeigt sich aber, dass eine solche Definition nicht streng genug ist. Bei Temperaturerhöhung eines Körpers beobachten wir öfters gewisse Vorgänge, welche sekundär zu Strahlungserscheinungen Veranlassung geben können. Leitet man diese Vorgänge auf einen anderen Weg als Temperaturerhöhung ein, so würden sie zu ähnlichen Strahlungserscheinungen führen. In diesen Fällen darf also die durch Erhöhung der Temperatur erzielte Strahlung, nicht als *reine Temperaturstrahlung* angesehen werden. Eine solche wird strenger definiert, wenn wir vom Kirchhoff'schen Gesetz der Strahlung ausgehen. Nach demselben gilt für eine homogene Temperaturstrahlung die Gleichung:

$$\frac{E}{A} = f(\lambda, T)$$

in welcher  $E$  das Emissionsvermögen,  $A$  das Absorptionsvermögen,  $\lambda$  die Wellenlänge und  $T$  die Temperatur bedeutet. Umgekehrt können wir dieses Gesetz als Definition der Temperaturstrahlung ansehen, also ähnlich verfahren wie bei der Benutzung des Boyle-Mariotteschen Gesetzes zur Definition der idealen Gase. Wir können also sagen: Emittiert und absorbiert bei Temperaturerhöhung ein Körper die Strahlung so, dass das Verhältniss des Emissionsvermögens zum Absorptionsvermögen allein von der Wellenlänge und absoluten Temperatur abhängig ist, dann haben wir mit reiner Temperaturstrahlung zu tun.

Zwischen den verschiedenen Körpern, welche als Temperaturstrahler dienen, können wir uns einen denken, welcher das Absorptionsvermögen gleich eins besitzt. So einen Körper bezeichnet man als einen *absolut schwarzen Körper* und die Strahlung die er emittiert als *schwarze Strahlung*. Für diese ist also die Emission  $S$  gleich einer universalen Funktion der Temperatur und Wellenlänge allein.

Einen wesentlichen Fortschritt erzielten W. Wien u. O. Lummer, indem sie in ihrer Hohlraumtheorie der Strahlung (1895) auf die Mittel zur experimentellen Verwirklichung des Kirchhoffschen schwarzen Körpers gaben. Eine einfache Ueberlegung zeigt uns in der Tat, dass die Temperaturstrahlung im Innern eines Hohlraumes eines beliebigen Körpers als schwarze Strahlung anzusehen ist. Kurz nachher (1897) haben Lummer und Pringsheim experimentel die Gesetze der schwarzen Strahlung ermittelt, indem sie einen Hohlraum auf möglichst gleichmässige Temperatur brachten und seine Strahlung durch eine kleine Oeffnung nach Aussen gelangen liessen. Für die Gesamtstrahlung eines solchen Körpers fanden sie das Stefansche Gesetz bestätigt, nach welchem

$$S = T^4$$

ist. Auch wurden für diese Strahlung die von Wien theoretisch abgeleiteten Verschiebungsgesetze experimentell richtig gefunden.



Nach diesen gelten die Gleichungen

$$\begin{aligned}\lambda_m \times T &= b = \text{einer Konstante} \\ S_m \times T^{-5} &= B = \text{einer anderen Konstante.}\end{aligned}$$

In diesen Gleichungen bezeichnen wir mit  $\lambda_m$  die Wellenlänge, für welche bei Temperatur  $T$  eine Emission ein Maximum ist, und mit  $S_m$  den Betrag dieser maximalen Emission.

Das Interessanteste war aber die Auffindung der Verteilung der emittierten Energie im Spektrum, denn diese konnte uns Aufschluss geben über die Form der genannten Universalfunktion. Auch hier verdanken wir den Untersuchungen von Lummer und Pringsheim (1899), die Festsetzung des Verlaufes der Verteilung der Emission im Spektrum und zwar für verschiedene Temperaturen bis zur absoluten Temperatur von ca.  $1600^\circ$ . Dieser Verlauf wird am besten durch die von Planck aufgestellte Gleichung wiedergegeben. Dieselbe hat die folgende Form :

$$S = F(\lambda, T) = \frac{8 \pi c h}{\lambda^5} \times \frac{1}{\frac{c h}{k \lambda T} \exp. -1}$$

Die Uebereinstimmung zwischen dieser Gleichung und der Erfahrung ist ganz vorzüglich, wenn wir für die Konstanten  $h$  und  $k$  folgende Werte annehmen :

$$\begin{aligned}h &= 6,55 \times 10^{-27} \text{ erg} \times \text{sec.} \\ k &= 1,346 \times 10^{-16} \text{ erg} \times \text{grad.}\end{aligned}$$

Diese letzte Formel von Planck, welche tatsächlich in vorzüglicher Weise uns Rechenschaft von der Verteilung der Energie in dem Spektrum eines strahlenden schwarzen Körpers giebt, soll jetzt zum Ausgangspunkt unserer weiteren Betrachtungen dienen. Es wäre unmöglich an dieser Stelle auf die ausführliche Ableitung, wie sie Planck gegeben hat, einzugehen. Wir wollen nur ganz kurz den Weg skizzieren, den Planck dabei eingeschlagen hat.

Die Tatsache, dass die Strahlung einen Druck auf die umgebenden Wände ausübt, erlaubte schon Boltzmann thermody-

namische Betrachtungen in die theoretischen Untersuchungen ihrer Eigenschaften einzuführen und auf diesem Wege zum Beweis des Stefan'schen Gesetzes zu gelangen. Diese Methode wurde erweitert und präzisiert durch Wien und Planck. Der Begriff der Temperatur und Entropie der monochromatischen Strahlung wurde streng definiert. Die Wienschen Verschiebungsgesetze konnten ohne weiteres auf diesem Wege aus der klassischen Elektrodynamik abgeleitet werden. Nun versagte aber die Methode, sobald man das Problem der Verteilung der Energie im Spektrum in Angriff nehmen wollte. Und da tauchte der Gedanke auf, einen Weg einzuschlagen, welcher auf dem Gebiete der Wärmetheorie grosse Erfolge feierte gerade dort, wo die reine Thermodynamik versagte. Die statistischen Methoden der kinetischen Wärmetheorie erlaubten ja Maxwell sein berühmtes Verteilungsgesetz der verschiedenen Geschwindigkeiten zwischen die einzelnen Molekeln eines Gases zu finden. Das Gesetz der Aequipartition der Energie erlaubte theoretisch das Verhältniss der spezifischen Wärmen einfacherer Gase zu berechnen. Sollte man nicht auch auf dem Gebiete der Strahlung diese Methoden anwenden können, um so mehr, da eine Ueberbrückung durch die Boltzmannsche Definition der Entropie gegeben war? Nach dieser letzteren dürfen wir die Entropie eines Gases, bis auf eine additive Konstante, als den Logarithmus der Wahrscheinlichkeit des Zustandes des Gases definieren. Dabei können wir die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes folgendermassen auffassen: Denken wir uns eine ungeheuer lange Zeit hindurch das Gas beobachtet und verbleibe dasselbe während einer bestimmten Zeit  $t$  in dem betreffenden Zustand, dann ist das Verhältniss von  $t$  zur Totalzeit die Wahrscheinlichkeit dieses Zustandes.

Analoge Betrachtungen stellt nun auch Planck über die Entropie der Strahlung an. Der Weg, den er aber verfolgt, unterscheidet sich vom klassischen Wege der statistischen Methode. In diesem letzteren wird nämlich an dem sogenannten Prinzip der Aequipartition der Energie festgehalten. Nach diesem Prinzip verteilt sich im Falle des Wärmegleichgewichts die Energie so, dass keine von den vorhandenen unabhängigen Arten der

Energie bevorzugt ist. Jede solche Art bekommt den gleichen Betrag der Gesamtenergie. Die Anwendung dieses Prinzipes führt, wie es mit grosser strenger Jeans gezeigt hat zu dem sogenannten Rayleighschen Strahlungsgesetz, welches nur richtig für sehr lange Wellen ist, aber im Fall kurzer Wellen versagt.

Nach Planck geschieht nun die Emission des Lichtes (Strahlung) durch elektrische Oscillatoren von molekularer Grösse. Diese Oscillatoren können nicht jede beliebige Menge von Energie aufnehmen oder abgeben, sondern nur bestimmte Energiequanta. Diese sind entsprechend dem Wienschen Verschiebungsgesetz der Wellenlänge einer bestimmten Schwingung umgekehrt proportional. Alle andere Eigenschaften der Oscillatoren nimmt Planck entsprechend der klassischen Elektrodynamik an. Darin liegt aber etwas unbefriedigendes der Planck'schen Ableitung. Nun ist es der Verdienst von Einstein streng gezeigt zu haben, dass die Annahme der Energiequanten eine notwendige Folgerung der Anwendung der Boltzmannschen Methode der Wahrscheinlichkeitsberechnung auf Strahlungsprobleme. Dadurch gewann die Existenz der Energiequanta eine gewisse Berechtigung und die Wissenschaft bemächtigte sich dieses Gebildes, ehe man ganz im klaren war, welche gewaltige Schwierigkeiten uns dieses neue Denkmittel bringen wird.

Die Spektralgleichung von Planck kann man in Angesicht der schönen Uebereinstimmung mit der Erfahrung, als experimentell gegeben ansehen. Die Frage, welche sich nun Einstein stellt, ist die folgende: Was kann man aus der als richtig angenommenen Spektralgleichung, auf die Natur der Strahlung folgern?

Um zu dem Ziele zu gelangen, benutzt Einstein eine, so für die moderne Denkweise charakteristische Ueberlegung, dass es für uns von grösstem Interesse ist wenigstens kurz auf dieselbe einzugehen. Einstein führt ein sogenanntes Gedankenexperiment aus. Bei einem Gedankenexperiment werden gewisse ideale aber fiktive Verhältnisse angenommen, welche auch nur von schematischen Charakter zu sein brauchen. In diesen Ver-

hältnissen wird nun schrittweise ein Vorgang verfolgt unter strenger Anlehnung an die Erfahrung. Solche Gedankenexperimente benutzt der moderne Naturforscher geläufig. Es ist ein Gedankenexperiment, welches van't Hoff zur Entdeckung der Gesetze der Lösungen geführt hat. Es sind Gedankenexperimente, die ein organischer Chemiker ausführt, wenn er an Hand einer Formel nach neuen Körpern sucht. Es sind noch Gedankenexperimente die Adam Smith ausführt, um aus der Fiktion «Egoismus einziges treibendes Prinzip» seine ökonomischen Gesetze abzuleiten sucht. Der Wert eines Gedankenexperimentes liegt also in der Brauchbarkeit der Fiktionen und der weiteren kritischen Anlehnung an die Erfahrung. Dabei scheint mir nicht unnötig hier hervorzuheben, dass eine Fiktion keine Hypothese ist. Eine Hypothese soll ein adäquates Bild des wirklichen Geschehens in der Natur sein. Sie hat nur solange ihre Berechtigung, solange sie als realer Ausdruck eines Realen angesehen werden kann. Bei einer methodisch richtigen Fiktion muss dagegen das Bewusstsein ihrer Unmöglichkeit ausdrücklich ausgesprochen werden. Ihre einzige Berechtigung ist ihre praktische Brauchbarkeit. Es muss der Fehler den wir begehen bei Benutzung der Fiktion praktisch zu vernachlässigen sein. Sie muss sich als nützliches Denkmittel erweisen und die Begründung dieses Nachweises sollte bei jeder Fiktion speziell vorgenommen werden.

In dem uns interessierenden Fall arbeitet Einstein mit der Fiktion eines vollkommenen Gases und der Fiktion von vollkommen reflektierenden Wänden. In einem Hohlraum denken wir uns wenige Molekeln eines vollkommenen Gases und eine gewisse Energie in Form von Strahlung. Die Strahlung soll dabei eine reine Temperaturstrahlung sein von derselben Temperatur wie das umgebende Gas. In diesem Hohlraum befindet sich noch eine Platte, welche in einer zu seiner Oberfläche senkrechten Richtung frei beweglich ist. Diese Platte sei so beschaffen, dass sie eine Strahlung von einem bestimmten Frequenzbereich vollständig reflektiert, dagegen Strahlungen von anderen Frequenzen vollständig durchlässt. Einstein zeigt, dass im Falle des Wärmegleichgewichtes die Platte sowohl

infolge von Molekularstößen wie auch in Folge des Strahlungsdruckes, gewisse kleine unregelmässige Bewegungen ausführen wird, ähnlich der Brown'schen Bewegung kleiner Teilchen. Unter Zugrundelegung der Planck'schen Spektralgleichung, lässt sich nun streng die Bewegungsgrösse berechnen, welche infolge der unregelmässigen Schwankungen des Strahlungsdruckes auf die Platte in einer bestimmten Zeit übertragen wird. Der mathematische Ausdruck für diesen Wert setzt sich aus zwei Gliedern zusammen. Eins von denselben lässt sich aus der klassischen Wellentheorie folgern, das zweite dagegen, welches wie Einstein zeigt, keineswegs zu vernachlässigen ist und welches sogar bei kleiner Dichte der Strahlungsenergie das erste Glied überwiegt, kann unmöglich als eine Folge der klassischen Theorie angesehen werden.

Einstein zeigt, dass dieses zweite Glied der Formel am einfachsten abzuleiten ist aus der Annahme, dass die Strahlung aus abgesonderten Mengen von Energie zusammengesetzt ist. Diese Mengen hätten den Betrag  $h\nu$ , wo  $h$  die Konstante des Planckschen Gesetzes ist und  $\nu$  die Frequenz der betrachteten Strahlungsart. Diese Menge, Licht-Quanta, sollten sich dabei unabhängig voneinander durch den Raum bewegen und unabhängig voneinander reflektiert werden. Um also beide Glieder der Formel zu erhalten, sollte man versuchen, die alte Undulationstheorie mit der soeben auseinandergesetzten Vorstellung über die quantenhafte Struktur der Strahlung zusammenzuschmelzen. Ich will es hier sofort hervorheben, dass diese Verschmelzung auf grosse Schwierigkeiten gestossen hat, welche bis jetzt nicht zu überwinden waren. Insbesondere sind gewisse Interferenzerscheinungen scheinbar direkt widersprechend einer derartigen diskontinuierlichen Struktur der Strahlung.

Man könnte zunächst glauben, dass vielleicht die spezielle Form des Planckschen Strahlungsgesetzes, die Einstein seinen Betrachtungen zugrunde legt, auf diese schwer mit der Undulationstheorie zu vereibarenden Vorstellungen führt. Nun hat aber am Anfang dieses Jahres Poincaré gezeigt, dass wenn wir einerseits die Plancksche Resonatorentheorie als richtig ansehen, andererseits ohne eine besondere Form der Strahlungs-

formel zu geben, einfach voraussetzen, dass die Totalstrahlung eines Körpers endlich ist, dann sind wir auch dazu geführt, ähnliche Diskontinuitäten in der Struktur der Strahlung anzunehmen, wie die durch die Quantenhypothese gegebenen.

Die Plancksche Resonatoretheorie ist eine strenge Folgerung der klassischen Elektrodynamik, diese lassen wir nicht gern fallen, zuviele Erfolge sind mit ihr verbunden. Die Endlichkeit der Totalstrahlung ist eine durch die Erfahrung gegebene Tatsache, mit der müssen wir zunächst rechnen. Wir stehen also hier vor einer dieser Schwierigkeiten, von der Poincaré so richtig sagt: « Les théories anciennes reposent sur un grand nombre de coïncidences numériques qui ne peuvent être attribuées au hasard; nous ne pouvons donc disjoindre ce qu'elles ont réuni; nous ne pouvons plus briser les cadres, nous devons chercher à les plier; et ils ne s'y prêtent pas toujours. »

Wir stehen also augenblicklich vor einer offenen theoretischen Frage; was die Zukunft uns für eine Lösung der Schwierigkeiten vorenthält, ist heute kaum vorauszusagen, und daher könnten wir uns mit voller Berechtigung fragen: Wie kommt es, dass die Wissenschaft in den letzten Jahren, so oft mit dem Begriff des Lichtquantums arbeitet? Ich glaube darauf die Antwort geben zu können, dass die Ursache davon in dem Erfolg liegt, welchen der Quantenbegriff bei der Lösung einer Reihe von experimentellen Fragen gehabt hat.

Die Methode, welche Planck bei der Ableitung seines Strahlungsgesetzes gebraucht, erlaubte schon diesem Gelehrten im Jahre 1900 die Konstanten seines Strahlungsgesetzes mit gewissen Konstanten auf ganz anderen Gebieten der Physik zu verknüpfen. So berechnet er aus seinem Strahlungsgesetze unter Zugrundelegung der aus den Messungen von Lummer, Pringsheim und Kurlbaum bestimmten Konstanten  $h$  und  $k$ , den Wert des Elementarquantums der Elektrizität zu  $4,69 \times 10^{-10}$  gegenüber dem in der allerletzten Zeit mit grosser Sorgfalt aus dem Fallgesetz von Tropfen durch Millikan bestimmten Wert von  $4,777 \times 10^{-10}$  und durch Zählung der  $\alpha$ -Teilchen des Radiums von Rutherford und Geiger ermittelten Wert von  $4,65 \times 10^{-10}$ . Diese wunderbare Uebereinstimmung kann kaum

auf Zufall beruhen und macht die Vermutung recht wahrscheinlich, dass den Konstanten des Planckschen Gesetzes eine gewisse allgemeine physikalische Deutung zuzuschreiben ist.

Wir verdanken aber Einstein die ersten Anwendungen des Lichtquantenbegriffes auf experimentelle Fragen. Es war im Jahre 1905, dass Einstein als erster *explicite* zum Ausdruck brachte, dass die Annahme, die Materie könnte nur in gewissen Quanten Strahlung emittieren und absorbieren, uns in einer Reihe von Fällen eine Erklärung der experimentell gefundenen Tatsachen geben kann. Emittiert die Materie Strahlung von der Frequenz  $\nu$  so kann dies nach Einstein nur diskontinuierlich geschehen, indem die Energiequanta vom Betrag  $h\nu$  als Ganze emittiert werden. Aehnlich bei Absorption, kann die Materie nur ein Energiequantum  $h\nu$  oder ein Vielfaches davon absorbieren. Hier wäre es wohl am Platze, eine kurze Bemerkung einzuschieben. Oefters hat man diese Hypothese als atomistische Auffassung der Struktur der Strahlungsenergie bezeichnet. Und doch ist ein wesentlicher Unterschied zwischen einem Atom der Materie und einem Energiequantum. Entsprechend den verschiedenen Elementen, haben wir eine gewisse endliche Anzahl verschiedener Atome, welche sich von einander durch eine endliche Differenz von Masse unterscheiden. Bei Strahlungsenergieelementen haben wir für jede monochromatische Strahlung von der Frequenz  $\nu$  das Quantum  $h\nu$ . Wir können also für einen endlichen Wellenbereich uns unendlich viele verschiedene Energiequanta denken, welche untereinander sich nur durch unendlich kleine Beträge der Energie unterscheiden. Bei jedem Bilde, das wir uns über die quantenhafte Struktur der Strahlung machen, dürfen wir diesen Umstand nicht vergessen.

Einstein wendet nun die Quantenhypothese in der oben erwähnten Form zur Ableitung eines Gesetzes, welches wir als *lichtelektrisches Äquivalenzgesetz* bezeichnen wollen.

Schon vor ca. 25 Jahren entdeckte Hertz die fördernde Wirkung des Lichtes auf die elektrische Entladung. Hallwachs, Elster und Geitel, Swyngedauw und andere, studierten diese Wirkung in verschiedenen Formen. Man verdankt es aber den

Arbeiten von Lenard im Jahre 1900, Klarheit in die Verhältnisse bei diesem *lichtelektrischem Effekt* hineingebracht zu haben. Er zeigt nämlich, dass das auf eine metallische Oberfläche auffallende Licht an derselben eine sekundäre Elektronenstrahlung erzeugt. Diese Strahlung ist um so intensiver, je intensiver das wirkende Licht ist. Die Geschwindigkeit dagegen, mit welcher die negativen elektrischen Teilchen die Oberfläche verlassen, sind in verhältnismässig grossen Grenzen von der Intensität des Lichtes unabhängig und wachsen mit der Abnahme der Wellenlänge des wirkenden Lichtes. Diese letzte Eigentümlichkeit der lichtelektrischen Erscheinungen war ziemlich schwer zu erklären; mehr oder weniger wahrscheinliche Hypothesen wurden zu diesem Zwecke aufgestellt. Nun zeigt Einstein unter Zugrundelegung der Quantenhypothese, dass dieses Verhalten als direkte Folgerung dieser Hypothese anzusehen ist. Es genügt nur anzunehmen, dass die Quelle der Energie der austretenden Elektronen die Energie der auffallenden Strahlung ist und dass diese letztere keine zu grosse Dichte besitzt. Er leitet noch weiter ab, dass die Geschwindigkeit der austretenden Elektronen in diesem Falle eine lineare Funktion der Frequenz des erregenden Lichtes sein muss.

Dieses *lichtelektrische Aequivalenzgesetz* wurde in glänzender Weise durch die Versuche von Erich Ladenburg im Jahre 1907 bestätigt gefunden. Neuere Versuche von Millikan (1912) zeigen weiter, dass wenn man die Voraussetzung von Einstein einer kleinen Strahlungsdichte des erregenden Lichtes fallen lässt, in der Tat die austretenden Elektronen Geschwindigkeiten erreichen, welche nicht mehr dem unter dieser Voraussetzung abgeleiteten Aequivalenzgesetz entsprechen. In der allerletzten Zeit hat O. W. Richardson weiter die Theorie von Einstein verfolgt, und die erhaltenen Beziehungen gemeinschaftlich mit K. T. Crompton experimentell bestätigt gefunden.

Einstein verallgemeinert auch seine Betrachtungen auf Probleme der Verwandlung der Strahlung einer bestimmten Wellenlänge in Strahlung von anderer Wellenlänge bei Fluoreszenz und Phosphoreszenz. Die bekannte Stokesche Regel ergibt sich als direkte Folgerung dieser Betrachtungen. Da die Stokesche



Regel in vielen Fällen sich als nicht richtig erwiesen hat, und zwar unter Bedingungen, bei welchen man kaum die Dichte der Energie als sehr gross ansehen konnte, so könnte es scheinen, dass hier die Quantentheorie im direkten Widerspruch mit der Erfahrung steht. Man muss aber in Erinnerung bringen, dass die Einsteinschen Betrachtungen von der Annahme ausgehen, dass die bei Photolumineszenz hervorgebrachte Strahlung allein auf Kosten der erregenden Strahlung zustande kommt. Man kann aber wohl annehmen, dass zu dieser Hauptquelle der Energie sich eine andere gesellt, z. B. die Energie der thermischen Agitation. Macht man diese Annahme, so müssten die Abweichungen vom Stokeschen Gesetz bei Abnahme der Temperatur des fluoreszierenden Körpers auch abnehmen. Kowalski (1910) ist es gelungen, diese Tatsache festzustellen. Unter Zugrundelegung der Quantenhypothese berechnet er ferner die Differenz der Abweichungen für zwei verschiedene Temperaturen. Er findet, dass der Grössenordnung nach, auch hier die Quantenhypothese mit der Erfahrung übereinstimmende Resultate liefert.

Der Erfolg der ersten Betrachtungen von Einstein regte auch andere Physiker zu weiteren Anwendungen des Begriffes der Lichtquanta an. An erster Stelle ist hier J. Stark zu nennen. In einfacher Weise verallgemeinert er das von Einstein gefundene Aequivalenzgesetz auf photochemische Fragen. Bei Hinzunahme gewisser Hypothesen über den Mechanismus der Entstehung des Bandenspektrums einer Substanz, erlaubt ihm die Quantenhypothese, die Berechnung der unteren Grenze dieses Spektrums. In vielen konkreten Fällen wird die Rechnung durchgeführt und diese Grenze für das Absorptionsspektrum bestimmter Substanzen als der Erfahrung entsprechend gefunden. Im Anschluss daran wird von Stark eine atomistisch-elektrische Valenzlehre entwickelt. Stark wendet seinen Ideen gang auch auf Fragen über Phosphoreszenz und Fluoreszenz an und alle diese Arbeiten geben ihrerseits eine manigfache Anregung zur experimentellen Forschung. In den letzten vier Jahren sehen wir eine Reihe von Forschern sich mit Untersuchungen beschäftigen, welche, wenn auch nicht immer sich an

die Anschauungsweise von Stark anlehnen, doch aber durch das sich daran anknüpfende, neugeweckte theoretische Interesse angeregt worden sind. Manche neue Errungenschaft auf dem Gebiete der Absorption, Phosphoreszenz, Fluoreszenz, Photochemie, verdanken wir dem Ansporn, welchen die Quantentheorie der Forschung gegeben hat. Wir wollen hier nur an die Entdeckung der Bandenstruktur des Absorptionsspektrums des Diacetyls von *Gelbke* erinnern und an den von *Haber* entdeckten Zusammenhang zwischen dem Ultraroten und Ultravioletttem Absorptionsspektrum. Beinahe gleichzeitig mit diesen Ideen (1907-1908) entwickelte Stark gewisse Betrachtungen über die Anwendung des Quantenbegriffes auf Probleme die im Zusammenhang mit dem von Stark entdecktem Doppler-Effekt bei Kanalstrahlen stehen. Wenn auch durch die in letzter Zeit veröffentlichten Untersuchungen von Vegard (1912) die Anwendbarkeit des Quantenbegriffes in seiner einfachsten Form auf die Verteilung der durch die Kanalstrahlen emittierten Lichtintensität in Zweifel gezogen werden kann, so sehen wir auch hier deutlich den Impuls, welcher der Wissenschaft durch die neuen Begriffe gegeben worden ist.

In allen diesen Arbeiten wird der Begriff des Energiequantums in der von Einstein genauer im Jahre 1905 formulierten Form gebraucht. Wir wiederholen: es wird der Strahlungsenergie eine quantenhafte Struktur zugeschrieben. Um die Schwierigkeiten, welche mit der physikalischen Auffassung der Energieelemente verbunden sind zu vermeiden, hat zuerst Planck und sodann in sehr deutlicher Weise Sommerfeld darauf aufmerksam gemacht, dass man statt die diskontinuierliche Struktur der Energie zuzuschreiben, es für die Wirkung, *Energie*  $\times$  *Zeit*, tut. Nach Sommerfeld wird die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie derart geregelt, dass jedesmal bei der Aufnahme oder Abgabe von Energie durch Moleküle dies für eine grosse Energiemenge in kurzer Zeit geschieht, für eine kleine dagegen, eine lange Zeit beansprucht wird, so, dass das Produkt aus *Energie*  $\times$  *Zeit* gleich der Planckschen Konstante  $h$  ist. Diese Auffassung hebt zwar nicht die erwähnten theoretischen Schwierigkeiten auf, hat aber mit dem Vorteil einer

gewissen physikalischen Deutung einen grossen heuristischen Wert. Man kann die Lehre von den Quanten, wie es Sommerfeld gezeigt hat, in einfacher Weise auf nicht periodische Prozesse ausdehnen. Interessante Anwendungen dieser Auffassung sind von Sommerfeld auf die Erscheinungen der Röntgen- und  $\gamma$ -Strahlen gemacht worden, sodann von Sommerfeld und Debye auf lichtelektrische Phänomene und von Sackur auf rein molekulartheoretische Betrachtungen.

Es gebührt wieder Einstein der Verdienst, zuerst die Plancksche Formel auf Wärmeevorgänge in der Materie angewandt zu haben.

Aus der klassischen Molekulartheorie der Wärme, also aus der Theorie, welcher das Aequipartitionsprinzip zugrundegelegt ist, ergibt sich als Folgerung für hinreichend tiefe Temperaturen die Gültigkeit des Gesetzes von Dulong und Petit. Bei hinreichend niedrigen Temperaturen müsste daher das Produkt von Atomgewicht  $\times$  spezifische Wärme für alle Elemente gleich sein. Nun lehrt uns die Erfahrung, dass eben bei niedrigen Temperaturen wir für eine Reihe von Elementen Ausnahmen finden.

Einstein ersetzt daher für feste Körper, in welchen wir ja die Träger der Wärme als periodisch schwingende Gebilde ansehen, das Prinzip der gleichmässigen Verteilung durch die Verteilung nach dem Planck'schen Gesetz.

Die Rechnung ergibt, dass wir dann in der Tat Abweichungen vom Dulong-Petit'schen Gesetz und zwar im von der Theorie geforderten Sinne, erwarten dürfen. Um diese Abweichungen zu berechnen, müssen wir allerdings den schwingenden Gebilden (Systemen) bestimmte Schwingungsfrequenzen zuschreiben. Umgekehrt, können wir bei der Annahme, dass es Atome sind, die die Schwingungen in den festen Körpern ausführen, die Eigenfrequenzen der Atome bezüglich der Atomkomplexe aus dem Verlauf der spezifischen Wärme mit der Temperatur berechnen. Die Betrachtungen von Einstein wären also nicht verifizierbar, falls wir nicht die Möglichkeit hätten, auf einem anderen Wege auch die Eigenfrequenzen der Atome bzw. der Moleküle der festen Körper zu berechnen. Auf eine

solcher Möglichkeiten weist schon in seiner ersten Arbeit über diesen Gegenstand Einstein hin. Für viele Körper dürfen wir nämlich die die Wärme hervorbringenden Gebilde mit den positiv geladenen Atomen identifizieren, welche Drude zur Erklärung der Absorption der Körper im ultraroten Gebiet annahm. Die Eigenfrequenzen dieser Gebilde sind uns aus den Messungen von Rubens und seinen Schülern mit Reststrahlen bekannt. Es sind inzwischen auch noch andere Wege zur Ermittlung dieser Eigenfrequenzen gefunden worden. So findet Einstein die folgende Formel

$$a) \quad \nu = 2,8 \times 10^7 M^{-\frac{1}{3}} d^{-\frac{1}{6}} K^{-\frac{1}{2}}$$

wo  $M$  das Atomgewicht bedeutet,  $d$  die Dichte und  $K$  den kubischen Kompressibilitätskoeffizienten.

Lindemann findet die Formel :

$$b) \quad \nu = 2,8 \times 10^{12} \times \sqrt{\frac{f}{Mv^{2/3}}}$$

wobei  $f$  den Schmelzpunkt,  $M$  das Atomgewicht und  $v$  das Atomvolumen bedeutet. Kürzlich stellt derselbe Forscher die Formel auf :

$$c) \quad \nu = 1,095 \times 10^{14} \times \sqrt{\frac{d \cdot n}{M}}$$

wo  $M$  ebenfalls Atomgewicht,  $d$  die Dichte und  $n$  die Valeur ist.

In der folgenden Tabelle III sind die Eigenfrequenzen, die aus der experimentell bestimmten Atom- bzw. -berechnet worden sind, mit den nach anderen Methoden bestimmten verglichen. Dabei ist bei der Berechnung nicht der ursprünglich von Einstein abgeleitete Ausdruck benutzt worden, sondern eine von Nernst und Lindemann aufgestellte Formel. Dieselbe lautet :

$$d) \quad C_v = \left[ \frac{\left(\frac{\beta\nu}{T}\right)^2 \exp. \frac{\beta\nu}{T}}{\left(\exp. \frac{\beta\nu}{2T} - 1\right)^2} + \frac{\left(\frac{\beta\nu}{2T}\right)^2 \exp. \frac{\beta\nu}{2T}}{\left(\exp. \frac{\beta\nu}{2T} - 1\right)^2} \right] \frac{3}{2} R$$

In dieser Formel bedeutet T die absolute Temperatur, R die Gaskonstante  $\beta$  ist eine universelle Konstante, welche mit dem Planckschen Wirkungsquantum  $h$  durch folgende Gleichung verbunden ist:

$$\beta = N \times \frac{h}{R}$$

Der Wert dieser Konstante ist demnach :

$$\beta = 4,865 \times 10^{-11}$$

TABELLE III — EIGENFREQUENZEN DER ATOME

	nach Gl. a)	nach Gl. b	nach Gl. c)	nach Gl. d)
Al.....	$6,7 \times 10^{12}$	$7,6 \times 10^{12}$	$8,2 \times 10^{12}$	$8,3 \times 10^{12}$
Cu.....	$5,7 \times 10^{12}$	$6,8 \times 10^{12}$	$7,2 \times 10^{12}$	$6,6 \times 10^{12}$
Ag.....	$3,8 \times 10^{12}$	$4,4 \times 10^{12}$	$4,6 \times 10^{12}$	$4,4 \times 10^{12}$
Hg.....	—	$1,3 \times 10^{12}$	$2,0 \times 10^{12}$	$2,2 \times 10^{12}$
Pb.....	$2,2 \times 10^{12}$	$1,8 \times 10^{12}$	$2,5 \times 10^{12}$	$1,9 \times 10^{12}$
Diamant.....	—	$34,1 \times 10^{12}$	$34,1 \times 10^{12}$	$40,0 \times 10^{12}$
S.....	—	$3,9 \times 10^{12}$	$6,6 \times 10^{12}$	$7,3 \times 10^{12}$
J.....	—	$1,7 \times 10^{12}$	$1,9 \times 10^{12}$	$2,0 \times 10^{12}$

Die Uebereinstimmung, welche wir in dieser Tabelle sehen ist eine überraschende und zwar um so mehr überraschend, wenn wir beachten, dass die Vorstellungen, welche den Ableitungen aller angeführten Formeln zugrundeliegen, sehr rudimentär sind. Nicht ein Mal geht es aus den Betrachtungen klar hervor, was man als Eigenschwingung eines aus Molekülen aufgebauten festen Körpers ansehen soll. Vor kurzem haben sich mit den dabei entspringenden Schwierigkeiten Debye, Natanson, Born u. Kärman und Brillouin beschäftigt. Aus diesen Untersuchungen springt es hervor, dass es in der Tat in festen Körpern, welche wir uns aus Raumgittern aufgebaut denken dürfen, gewisse Grenzfrequenzen gibt, die einigermaßen als Eigenfrequenzen aufgefasst werden können.

Debye einerseits, Born und Kärman andererseits, gelangen dabei zu einer Formel für den Verlauf der spezifischen Wärme mit der Temperatur, welche in ganz ausgezeichnete Weise die beobachteten Werte wiedergibt.

Die Grenzen dieses Vortrages erlauben mir nicht noch auf eine Reihe von anderen Untersuchungen einzugehen, welche ihren Ursprung auch in der Quantenhypothese finden. Diese kurze Uebersicht zeigt schon zur Genüge, wie die mit dem Quantenbegriff zusammenhängenden Ideen, befruchtend auf die experimentelle und theoretische Forschung gewirkt haben.

Eins ist aber scharf hervorzuheben: Dem Quantenbegriff als solchen, sind wir durch alle diese Untersuchungen kaum näher gerückt. Umgekehrt, eine ruhige Kritik der Verhältnisse lässt durchblicken, dass die ursprüngliche Quantenhypothese nicht haltbar sein wird. Hr. Einstein zeigt in einer höchst wichtigen Betrachtung, dass das photochemische Aequivalenzgesetz, einer der schönsten Erfolge der Quantentheorie, auch ohne dieselbe aus anderen, sehr einfachen Prämissen abzuleiten ist. Ich glaube daher mit Hrn. Einstein und anderen Physikern der Gegenwart in Einklang zu sein wenn ich sage:

*Die Quantentheorie vom Jahre 1905 ist ein überwundener Standpunkt.*

Um so mehr können wir uns fragen, wie kommt es, dass der an sich so unklare und mit den bisherigen Anschauungen widerspruchsvolle Begriff des Energiequantums, einen solchen gewaltigen Anstoss zur erfolgreichen Forschung geben konnte? Die Beantwortung dieser Frage müssen wir, meines Erachtens, in der Antwort auf eine viel allgemeinere Frage suchen und zwar in der auf die Frage: Was ist der Zweck und der Wert einer physikalischen Theorie?

Der wichtigste Baustein der Physik, wie auch jeder Naturwissenschaft, ist die Erfahrung. Bei dem Sammeln derselben bedienen wir uns unserer Sinne, deren Vollkommenheit wir durch unsere physikalischen Instrumente erweitern. Die experimentelle Methode erlaubt kritisch bei dem Sammeln der Tatsachen vorzugehen, die bestimmenden Bedingungen einer physikalischen Erscheinung festzusetzen, neue unbekanntes aufzufinden.

Nachdem wir die Erfahrung gesammelt, beschreiben wir die erhaltenen Resultate und das Bestreben dieses möglichst vollständig und doch auf einfachste Weise zu tun, im Sinne der

bekanntes Auffassung von Kirchhoff, gibt die erste Veranlassung zum Aufbau einer Theorie. Eine einfache Beschreibung einzelner Erscheinungen kann aber nicht als der einzige Zweck der Theorie angesehen werden. Die Erfahrung lehrt uns, dass manche auf den ersten Blick sehr verschiedene Erscheinungen zu einander in nahem Verhältnis stehen und wir glauben, dass alle physikalische Geschehenisse harmonisch mit einander verknüpft sind. Die Tatsache, dass Analogieschlüsse uns oft auf neue Entdeckungen mit Erfolg führen, bekräftigt uns in diesem Glauben. Daher verlangen wir von einer Theorie, dass sie uns den Weg zur Erforschung geahnter Zusammenhänge zeigt. Die Mittel, welche die physikalische Theorie zur Erfüllung dieses Zweckes besitzt, sind leider sehr beschränkt. Das was wir uns von den Erscheinungen denken, was wir sozusagen intuitiv von ihrem Zusammenhang fühlen, bestreben wir in Worten zum Ausdruck zu bringen. Wenn schon die menschliche Sprache überhaupt recht unvollkommen unsere Gedanken zum Ausdruck bringen kann, so hat die wissenschaftliche Sprache durch ihre, zwar sehr konsequente, aber auch zugleich sehr einseitige Entwicklung, gewissermassen den Gegensatz zwischen Wort und Gedanken noch verschärft. Entsprechend unserem visuellen Sinne, welcher bei den meisten Menschen als der vollkommenste anzusehen ist, arbeiten wir auch im Geiste am liebsten mit Gebilden, die wir uns visuell vorstellen können. Ja, ein so wichtiges Denkmittel, wie die mathematische Methode, hat sich zum grössten Teil auf unsere visuellen Empfindungen aufgebaut. Daher operiert die physikalische Theorie stets mit Gebilden, welche dem visuellen Sinn entsprechen. Dass wir über rein physikalische Erscheinungen und ihren Zusammenhang nicht notwendig mit visuellen Gebilden denken müssen, beweist die Tatsache, dass besonders auf andere Sinne veranlagte Menschen auch nichtvisuell logisch denken können. So denkt der geniale Musiker bei seinen musikalischen Deduktionen stets auditiv. Die ganze Harmonielehre und Kompositionslehre ist auf rein auditive Begriffe aufgebaut, im Gegensatz zur visuellen physikalischen Akustik. Es liegt nun in der Tradition der Physik mit visuellen Methoden zu arbeiten und

dem entsprechend hat sich auch unsere wissenschaftliche Sprache entwickelt. Wenn auch, infolge der grossen Vollkommenheit unseres Gesichtsinnes, dieses einen gewissen Vorteil in Bezug auf die Präzision und die Oekonomie des Denkens bietet, so können wir nicht umhin, in dieser Tatsache auch eine gewisse Beschränkung zu erblicken.

Durch das tiefe Hineindenken in die Verhältnisse des Geschehens in der Natur, wird im Geiste des Forschers die Ahnung des Zusammenhanges gewisser Tatsachen geweckt. Um Nutzen von dieser Ahnung zu ziehen, fixiert er sozusagen dieselbe an einem Bild, welches für ihn adäquat mit dem wirklichen Zusammenhang ist. Jedesmal wo er an das Bild denkt, wird in seinem Geiste die entsprechende Ahnung geweckt. Dies Bild kann nun der Forscher in Worten anderen Menschen mitteilen, es ist aber nicht gesagt, dass es auch bei Anderen dieselben Ahnungen hervorbringt, wie bei ihm selbst. Er ist dann ähnlich einem Amateur-Photographen, welcher sich wundert, dass die mässigen Bildern, die er seinen Freunden zeigt, diese nicht in gleiche Stimmung versetzen, wie ihn, der zugleich an das Original denkt. Anders der geniale Theoretiker; dieser bringt seine Stimmung in Bildern zum Ausdruck, welche auch Anderen seine Ahnungen zu suggerieren im Stande sind. Dabei braucht das Bild nicht gleich vollkommen und präzise zu sein. So wie eine Rodinsche Statue, kaum in Umrissen aus dem Marmorblock austretend, kann es uns die volle Empfindung des Schönen und Erhabenen der Harmonie des Geschehens in der Natur geben. In dieser Suggestionsfähigkeit besteht das künstlerische des Schaffens eines Theoretikers. Eine noch so vollkommene phänomenologische Theorie wirkt daher öfters weniger anregend, als ein nicht so klares aber künstlerisches Bild einer Hypothese. Wenn wir daher den Wert einer Theorie beurteilen wollen, müssen wir dieses künstlerische Moment mit berücksichtigen. Der weitere Fortschritt der Wissenschaft hängt von demselben in grossem Maasse ab und in der Förderung desselben liegt ja der Hauptwert jeder Theorie.

In dem bezeichneten Sinne müssen wir die Quantenhypothese als besonders künstlerisch bezeichnen. Der Quanten-



begriff ist zwar mit einem Bild zu vergleichen, welches wir aus weiter Ferne durch einen dichten Schleier betrachten. Die Umrisse, welche hervortreten, erlauben nicht einmal ihren Zusammenhang mit dem Ganzen zu entdecken. Was wir aber sehen, ist schön und kraftvoll genug, um in unserem Geiste die Ahnung der Wahrheit zu wecken.

---