

Werk

Titel: Die Entwicklung von Max Plancks Strahlentheorie

Autor: Wien , W.

Ort: Berlin

Jahr: 1918

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0006 | LOG_0150

Kontakt/Contact

[Digizeitschriften e.V.](#)
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

✉ info@digizeitschriften.de

klassischen Periode durch *Clausius*, *Maxwell*, *Boltzmann*, *van der Waals* zu Ehren gebracht, steht gegenwärtig die Atomistik an der Spitze der Forschung und würde wahrscheinlich auch von *Helmholtz*, wenn er noch lebte, in ihrer jetzigen Form anerkannt werden. Denn das, wogegen er sich besonders wendet, ist die Theorie, welche es nicht für nötig hält, die Folgerungen aus ihren, ihr als Axiome erscheinenden Hypothesen an der Erfahrung zu prüfen.

Planck steht im Anfang seiner Laufbahn ganz auf dem Boden der klassischen Theorie, indem er atomistische Betrachtungen geflissentlich vermeidet. Aber auch in seinen späteren Arbeiten, welche auf der Atomistik fußen, insbesondere in seinen Untersuchungen über die Strahlung, erweist er sich in bezug auf sein Verhältnis zum Experiment als echter Schüler von *Helmholtz*. Nachdem er zuerst die Ansicht von der Notwendigkeit des Wienschen Strahlungsgesetzes vertreten hat, wird er durch die Experimentaluntersuchungen von *Lummer* und *Pringsheim* und die von *Kurlbaum* und *Rubens* sofort veranlaßt, diese Ansicht fallen zu lassen. Er stellt zunächst versuchsweise sein neues Strahlungsgesetz auf, dessen theoretische Begründung ihm bald darauf gelingt. Das Wiensche Gesetz gilt nur für sehr dünne Strahlung, also für Strahlung sehr tiefer Temperatur, wobei, da es auf das Produkt $\lambda \cdot T$ ankommt, längere Wellen tiefere Temperaturen erfordern. So kommt es, daß für die Berechnung von Strahlungsversuchen im Ultrarot in der Regel auf *Plancks* Gesetz zurückgegriffen werden muß; auch im sichtbaren Gebiet muß dieses Gesetz angewandt werden, wenn es sich um sehr hohe Temperaturen, wie bei gewissen Sternen, handelt.

Von noch viel allgemeinerer Bedeutung für die experimentelle Forschung ist die von *Planck* zur theoretischen Begründung seines Strahlungsgesetzes aufgestellte Quantenhypothese. Zunächst konnte er aus ihr die Avogadro'sche Zahl berechnen, für welche bis dahin nur Schätzungen vorlagen. Aus dieser Zahl und der Valenzladung ergab sich das elektrische Elementarquantum, welches *Planck* im Jahre 1900 zu $4,69 \cdot 10^{-10}$ e. s. Einh. bestimmte, das ist sehr nahe der aus verschiedenen experimentellen Daten später ermittelte Wert, während die älteren Angaben noch zwischen $1,3$ und $6,5 \cdot 10^{-10}$ schwankten.

Aber außerdem liefert die Quantentheorie heutzutage theoretische Grundlagen für eine Fülle von Gebieten, z. B. für die Gebiete der spezifischen Wärme, der Spektroskopie, der Photochemie. Viele hervorragende Forscher, welche die von *Planck* eröffnete Bahn betraten, haben sich an diesen Untersuchungen beteiligt, in besonders grundlegender Weise die Herren *Einstein* und *Bohr*. Aber im Mittelpunkt all dieser Anwendungen steht die Plancksche universelle Konstante h , deren genaue Bestimmung zurzeit eine der wichtigsten Aufgaben der experimentellen Forschung bildet und deren Entdeckung mir als

das bedeutungsvollste Ergebnis der Planckschen Forschungen erscheint.

Charlottenburg, den 12. Februar 1918.

Die Entwicklung von Max Plancks Strahlungstheorie.

Von Geheimrat Prof. Dr. W. Wien, Würzburg.

Die eigentliche Strahlungstheorie baute sich, da es sich um eine Wirkung der Wärme handelt, zunächst auf die mechanische Wärmetheorie auf. Ihr erster Erfolg war das Kirchhoffsche Gesetz über das Verhältnis von ausgestrahlter zu absorbierter Wärme. Viel später folgte unter Heranziehung der elektromagnetischen Lichttheorie das Gesetz von *Stefan-Boltzmann*. Mit dem von mir aufgefundenen Verschiebungsgesetz, welches aussagt, daß bei der Strahlung eines schwarzen Körpers die Temperaturänderung das Produkt aus Temperatur und Wellenlänge konstant läßt, waren die Folgerungen, die sich aus der Wärmelehre ziehen lassen, erschöpft. Ich konnte schon bald hernach darauf hinweisen, daß es nicht möglich ist, durch rein thermodynamische Betrachtungen die Energieverteilung im Spektrum der Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers festzustellen, obwohl sich behaupten ließ, daß diese Verteilung dem Maximum der Entropie entsprechen muß. Für die Entropie der Strahlung hatte ich auch bereits die thermodynamisch ableitbaren Ausdrücke aufgestellt und die Folgerungen gezogen, daß einem Lichtstrahl im freien Raum eine bestimmte angebbare Entropie zukommen muß. Merkwürdigerweise fand diese, jetzt wohl allgemein angenommene Verallgemeinerung des Entropiebegriffs. Widerspruch und *Lord Kelvin* hat sich ihr bis zu seinem Tode nicht anschließen können und sich noch im Jahre 1904 mir gegenüber gesprächsweise geäußert, daß man die Entropie nicht auf den leeren Raum anwenden dürfe.

Nach dem Abschluß der thermodynamischen Strahlungstheorie mußte versucht werden, Wege zu finden, um zu dem Gesetz der Energieverteilung der Strahlung auf die Wellenlänge zu gelangen. Es war der gegebene Weg, die kinetische Theorie der Materie zu Hilfe zu nehmen. In der Tat zeigt die beobachtete Verteilung der Energie auf die Wellenlängen so große Ähnlichkeit mit dem Maxwellschen Verteilungsgesetz der Geschwindigkeiten der Gasmoleküle, daß es nahe lag, dieses für die Strahlungstheorie heranzuziehen. Unter der Annahme, daß Moleküle, welche dem Maxwellschen Verteilungsgesetz folgen, die Wärmestrahlung aussenden können und daß jedes nur eine der Geschwindigkeit entsprechende Wellenlänge aussendet, stellte ich unter Heranziehung der thermodynamischen Ergebnisse der Strahlungstheorie das Strahlungsgesetz auf, das sich für geringe Dichten der Energie bestätigt hat.

Dieses Strahlungsgesetz hatte die Eigentümlichkeit, daß es für steigende Temperatur einen

Grenzwert für die Strahlungsenergie ergab, der nicht überschritten werden sollte. Es schien sich zunächst durchaus zu bestätigen.

Max Planck fing bald darauf an, sich mit der Strahlungstheorie zu beschäftigen. Er wandte seine aus der Hertz'schen Theorie der elektromagnetischen Wellen abgeleiteten Betrachtungen zunächst darauf an, die Entropie der Strahlung abzuleiten und glaubte zunächst im elektromagnetischen Strahlungsvorgang selbst einen nicht umkehrbaren Prozeß zu erblicken. Ein solcher würde tatsächlich notwendigerweise zu einer Entropie der Strahlung und unter der Bedingung ihres Maximums auch zur Abhängigkeit der Energie der Strahlung von der Temperatur, d. h. zum Strahlungsgesetz führen müssen.

Eine genauere Analyse zeigte jedoch, daß diese Folgerung nicht richtig war und daß alle nach den Maxwell'schen Gleichungen ablaufenden Vorgänge streng umkehrbar sein müssen. Es mußte nun die Folgerung gezogen werden, daß man von der Wellentheorie des Lichts zum Entropiebegriff bei der Strahlung nur gelangen kann, wenn man ihr eine genügende Regellosigkeit beilegt, wie sie dadurch bedingt wird, daß die Erregung der Strahlung durch die ungeordneten Molekularbewegungen erfolgt. Planck gelangte so zu dem Begriff der „natürlichen Strahlung“, indem er den Amplituden und Phasen der einzelnen Wellen, aus denen sich die Strahlung zusammensetzt, einen möglichst unregelmäßigen Charakter verlieh. Für unsere Beobachtungen sind dann ähnlich wie bei den Wärmeprozessen nur gewisse Mittelwerte, nicht aber einzelne Wellen, mit bestimmter Amplitude und Phase, zugänglich.

Die Bedingungen, welche die natürliche Strahlung erfüllen soll, lassen sich nur bei vielen einzelnen, übereinander sich lagernden Schwingungen mit unregelmäßiger Amplitude und Phase erfüllen. Wenn diese Eigenschaften der natürlichen Strahlung vorausgesetzt werden, so läßt sich in der Tat nachweisen, daß sie ein nicht umkehrbarer Vorgang ist und ihr daher eine Entropie zugeschrieben werden muß. In der Tat kann man eine Funktion angeben, welche die Eigenschaft der Entropie, immer zuzunehmen, besitzt.

Planck konnte eine solche Funktion finden, die zu dem von mir abgeleiteten Strahlungsgesetz führt. Aber diese Funktion ist nicht die einzige, welche die Eigenschaften der Entropie besitzt. Jedoch schienen alle andern Funktionen zu einem der Erfahrung widersprechenden Strahlungsgesetz zu führen.

Bei diesen Betrachtungen war Planck nur von einer einzigen Strahlungsquelle ausgegangen. Da nun die natürliche Strahlung immer von einer großen Zahl von Atomen ausgesandt wird, schlug er zur Berechnung der Entropie schwingender Sender einen Weg ein, der von der Betrachtung einer größeren Zahl gleichzeitig strahlender Elemente ausgeht. Eine Entropievermehrung aller

dieser setzt sich additiv aus den Änderungen der Einzelentropieen zusammen, da alle unabhängig voneinander strahlen. Planck hielt nun für selbstverständlich, daß eine durch zeitliche Änderung der (von dem stationären Zustand, dem Maximum der Entropie, abweichenden) Schwingungsenergie hervorgerufene Entropieänderung durch die Schwingungsenergie, ihre Abweichung vom Gleichgewichtszustand und ihre zeitliche Änderung im Ganzen bestimmt sein müsse, ohne daß man die entsprechende Größe für die einzelnen Sender zu kennen brauche.

Es ergab sich dann eine einfache Differentialgleichung zur Bestimmung der Entropie der Strahlung als Funktion der Energie, welche dann unter Benutzung des zweiten Hauptsatzes zu dem von mir abgeleiteten Strahlungsgesetz führte. Planck hielt diese Ableitung für zwingend und betrachtete dies Strahlungsgesetz als das durch die Thermodynamik geforderte, da die Nebenannahmen kaum zu umgehen seien.

Die experimentellen Untersuchungen hatten indessen gezeigt, daß dies Strahlungsgesetz nicht ganz allgemein gültig, sondern daß es ein Grenzwertgesetz für verhältnismäßig kurze Wellenlänge sei.

Planck sah sich daher genötigt, seine Theorie einer Nachprüfung zu unterziehen und mußte die erwähnten Nebenannahmen aufgeben, ohne so gleich andere an ihre Stelle setzen zu können. Um zu einem allgemeinen Strahlungsgesetz zu gelangen, änderte er die Differentialgleichung, die den Zusammenhang zwischen Energie und Entropie darstelle, zunächst rein formal ab. Die ursprüngliche Gleichung sagte aus, daß der zweite Differentialquotient der Entropie nach der Energie der letzteren umgekehrt proportional sei. Nun setzt er diesen Differentialquotienten einem quadratischen Ausdruck der Energie umgekehrt proportional und gewinnt dann einen etwas allgemeineren Ausdruck für das Strahlungsgesetz, der für kleine Energie in den einfacheren übergeht.

Zur Begründung des neuen Ausdruckes für die Entropie bedurfte es neuer Annahmen. Diese neuen Annahmen bestanden nun in der Einführung der berühmten Hypothese der Energieelemente oder Quanten. Planck konnte nämlich nachweisen, daß, wenn man die Schwingungsenergie der Strahlungssender in einzelne Elemente von der Größe $h\nu$ zerlegt, wo h eine universelle Konstante, ν die Schwingungszahl ist, man durch Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der Boltzmann'schen Beziehung zwischen Entropie und Wahrscheinlichkeit zu einem Ausdruck für die Entropie gelangt, der zu dem erweiterten Strahlungsgesetz führt.

Hiermit war die theoretische Grundlage für die Ableitung des Strahlungsgesetzes und gleichzeitig für die Quantentheorie gegeben.

Man darf nicht verschweigen, daß, von den Schwierigkeiten der Quantentheorie selbst ganz abgesehen, die Theorie noch weit entfernt ist, auf

die Selbständigkeit Anspruch machen zu können, die z. B. die kinetische Begründung der Gasgesetze und des zweiten Hauptsatzes erreicht. Hier gelingt es nämlich, in der Hauptsache alle thermodynamischen Beziehungen auf Grundlage der Wahrscheinlichkeitsrechnung abzuleiten. In der Strahlungstheorie muß aber immer noch von den thermodynamischen Gesetzen, die oben erwähnt wurden, Gebrauch gemacht werden, die eigentlich als Folgerungen aus der Theorie fließen sollten. Das Verschiebungsgesetz bestimmt erst die Größe der Energieelemente, auf welche sich die Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung bezieht. Bei dem jetzigen Stande der Wissenschaft besteht keine Aussicht, die Strahlungstheorie in dieser Richtung zu vervollständigen. Die Konstante h , welche bisher nur durch statistische Theorien eingeführt werden konnte, muß eine atomistische Eigenschaft ausdrücken, die wir jetzt noch nicht angeben können. Diese Kenntnis muß aber erst gewonnen werden, die dann die Grundlage bilden wird, um die Behandlung so zu gestalten, daß auch die thermodynamischen Gesetze aus ihr gefolgert werden können.

Planck hatte aus seiner Theorie geschlossen, daß eine der Konstanten des Strahlungsgesetzes mit den Entropiekonstanten identisch ist, durch welche Entropie und Wahrscheinlichkeit miteinander verknüpft werden. Es ist der Faktor, mit dem der Logarithmus der Wahrscheinlichkeit zu multiplizieren ist, um die Entropie zu erhalten. Diese Konstante k spielt in der statistischen Mechanik eine große Rolle. Nach einem Satz dieser Theorie, den bereits Lord Rayleigh früher auf die Strahlungstheorie angewandt hatte, fällt im Zustande des Gleichgewichts der Energie jedem Freiheitsgrade des Systems dieselbe mittlere Energie zu und diese ist die Hälfte des Produkts aus der absoluten Temperatur und der Konstanten k .

Ein Strahlungssender ist von zwei Veränderlichen abhängig, wenn er nur nach einer Richtung schwingen kann, weil seine Bewegung durch zwei voneinander unabhängigen Größen, dem elektrischen und dem magnetischen Vektor ausgedrückt wird. Die mittlere lebendige Kraft eines Gasmoleküls hat drei Freiheitsgrade, ist also gleich der Energie eines Strahlungssenders von einer Schwingungsrichtung multipliziert mit dreihalb. Da die mittlere lebendige Kraft eines Gases, d. h. seine Wärmeenergie gleich der Anzahl der Moleküle mal der mittleren lebendigen Kraft eines einzelnen Moleküls ist, so kann man die Anzahl der Moleküle der Raumeinheit bei bestimmtem Druck und gegebener Temperatur durch die Entropiekonstante ausdrücken, welche eine Konstante des Strahlungsgesetzes ist. Sobald aus Messungen der Wärmestrahlung diese Konstante bekannt ist, kann man sie zur Bestimmung der Anzahl der Moleküle benutzen. Wie bereits erwähnt, hatte Lord Rayleigh einen Satz der statistischen Mechanik auf die Strahlungstheorie

angewendet. Er gelangte hierdurch zu einem Strahlungsgesetz, das mit dem verallgemeinerten Strahlungsgesetz für lange Wellen, beziehentlich großen Werten der Energie, übereinstimmt. Jeans hat dann die Rayleighsche Theorie strenger formuliert und später bewies Lorentz, daß das Rayleighsche Strahlungsgesetz ganz allgemein gefolgert werden müsse, wenn man die gewöhnliche Statistik auf die Strahlungstheorie anwendet. Da nun dies der Erfahrung völlig widerspricht, so folgte aus diesen Betrachtungen, daß die bisherigen Methoden der statistischen Mechanik unzureichend sind.

In der Tat bedeutet die Einführung der Energieelemente, oder besser und allgemeiner der Konstanten h (des Wirkungselements), eine neue Grundlage für die statistische Mechanik. Wenn sich behaupten läßt, daß die bisherigen Theorien der Mechanik und Elektrodynamik notwendig auch zur bisherigen statistischen Mechanik führen, so kann man sich allerdings der Folgerung nicht entziehen, daß die Einführung des Wirkungselements, durch welches abgegrenzte Gebiete gleicher Wahrscheinlichkeit der elementaren Vorgänge bestimmt werden, auch besondere in unsern bisherigen Naturgesetzen nicht enthaltene Eigenschaften der Atome der Körper zur Voraussetzung hat. Es ist bisher nicht möglich gewesen, etwas bestimmtes über die hierdurch geforderten Gesetze der atomistischen Vorgänge auszusagen. Auch in der Anwendung der Theorie auf die Spektrallinien, die zu so überraschenden Erfolgen geführt hat, werden die Elektronenbahnen, die den einzelnen Spektrallinien entsprechen, durch den mathematischen Ansatz bestimmt, der die Unterlage der statistischen Mechanik bildet.

Das Verdienst Plancks liegt nicht nur in der Verallgemeinerung des Strahlungsgesetzes, sondern wohl in noch höherem Grade in der Begründung der Theorie des elementaren Wirkungsquantums. Die Einsicht, daß die bisherigen Unterlagen der theoretischen Physik nicht ausreichen, vielmehr die bisher immer gemachte Voraussetzung, daß nur stetige Vorgänge in der Natur vorkommen könnten, daß diese „keinen Sprung mache“, aufgegeben werden müsse, ist sicherlich eine der bedeutendsten wissenschaftlichen Leistungen.

Trotzdem scheinen die allgemeinen Gesetze der Elektrodynamik, wie sie in den Maxwellschen Gleichungen ausgedrückt sind, ihre Gültigkeit auch in den atomistischen Vorgängen zu bewahren. Wenigstens hat sich noch immer, wenn wirklich zwingende Folgerungen dieser Gesetze geprüft werden konnten, Übereinstimmung gezeigt. Da, wo sich noch Widersprüche zeigen, wie z. B. beim Bohrschen Atommodell, bei dem, entgegen den Forderungen der Theorie, ein in einer Kreisbahn laufendes Elektron nicht ausstrahlen soll, liegt der Fehler jedenfalls noch an der Unvollständigkeit des Modells. Die Konstante h muß eine zu den allgemeinen Gesetzen hinzu-