

Schriften der Sudetendeutschen Akademie
der Wissenschaften und Künste
Band 34
Forschungsbeiträge
der Naturwissenschaftlichen Klasse

Seiten 135 - 139

HARRY PAUL

Auf dem Weg zur Quantentheorie: Die Entdeckung des Hohlraumes und ihre Folgen

Bekanntlich entdeckte Max Planck im Jahre 1900 das elementare Wirkungsquantum im Rahmen eines intensiven Studiums der Strahlung eines schwarzen Körpers. Angesichts der Tragweite dieser Entdeckung – sie ist das Fundament, auf dem das wundervolle Gebäude der Quantentheorie errichtet wurde – erscheint es nicht abwegig, die klassischen Vorarbeiten zu würdigen, die einerseits zur Realisierung dieser Strahlung und andererseits zu ihrem theoretischen Verständnis durchgeführt wurden.

Beginnen wir mit der Frage, weshalb man sich in der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts gerade für diese Strahlungsart interessierte. Es gab dafür verschiedene Gründe.

Zunächst ist ein schwarz gefärbter Körper vor allen anderen Körpern dadurch ausgezeichnet, dass er bei gegebener Temperatur des Körpers maximal Licht ausstrahlt. Das ist leicht einzusehen: Definitionsgemäß absorbiert ein ideal schwarzer Körper die auf ihn fallende elektromagnetische Strahlung vollständig. Er muss daher, wenn er auf einer bestimmten Temperatur gehalten wird, auch maximal ausstrahlen, und zwar bei allen Frequenzen, nämlich genauso viel, wie er absorbiert. Wäre es weniger, so würde er immer mehr Energie aufnehmen, sich also immer mehr erhitzen und schließlich heißer werden als die bestrahlende Lichtquelle, etwa die Sonne. Das geht natürlich nicht, es stände im Widerspruch zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Würde er mehr Energie ausstrahlen als aufnehmen, müsste er sich ständig abkühlen, und auch das stände im Widerspruch zum 2. Hauptsatz. Damit ist ein schwarzer Körper die ideale thermische Strahlungsquelle, und in der Tat benutzte Edison in den von ihm erfundenen Glühlampen Kohlefäden zur Lichtemission.

Der zweite große Vorteil eines schwarzen Körpers ist, dass die von ihm ausgesandte Strahlung universellen Charakter besitzt. Sie ist ja nicht durch mehr oder weniger zufällige Materialparameter wie Absorptions-, Reflexions- und Emissionsvermögen beeinflusst, wie sie andere Körper aufweisen. Sie eignet sich daher hervorragend als ein Frequenznormal, woran gerade die mit der Glühlampenherstellung befassten Physiker ein großes Interesse hatten.

Die entscheidende praktische Frage war nun: Wo findet man denn den möglichst idealen schwarzen Körper? Soll man nach dem schwärzesten Stück Kohle suchen? Hier hatte nun Otto Lummer einen genialen Einfall: Die beste Realisierung eines schwarzen Körpers ist ein Hohlraum, dessen Wände auf einer konstanten Temperatur gehalten werden und der eine kleine Öffnung aufweist, durch die Strahlung sowohl ein- als auch austreten kann. Der springende Punkt ist, dass die Wände aus einem beliebigen Material bestehen können, sie dürfen nur nicht alle absolut spiegelnd sein. Der zugrunde liegende physikalische Gedanke ist ganz einfach, ein jeder einfallende Lichtstrahl „läuft sich tot“, er wird im Innern des Hohlraums von den Wänden so lange hin und her reflektiert, wobei er jedes Mal durch Absorption etwas geschwächt wird, bis er schließlich verschwunden ist. Andererseits emittieren die Wände auch Strahlung, von der es ein Teil schafft, durch das Loch nach außen zu gelangen. Der Hohlraum leuchtet daher auch, und zwar genau wie ein schwarzgefärbter Körper.

Die Lummersche Erfindung hatte zwei wichtige Konsequenzen: Erstens konnte man an der Hohlraumstrahlung, wie sie bald genannt wurde, sehr präzise Messungen unter kontrollierten Bedingungen ausführen, und zweitens wurde den Theoretikern eine Spielweise eröffnet, auf der sie fundamentale Erkenntnisse über diese Strahlung gewinnen konnten. Das lag daran, dass man im Gedankenexperiment mit einem Hohlraum alles Mögliche anstellen und sich dabei aus dem Fundus der klassischen Theorie (Mechanik, Elektrodynamik und Thermodynamik) bedienen konnte.

Die einfachsten Gedankenexperimente bestanden darin, dass man sich die Öffnung zweier Hohlräume durch ein innen verspiegeltes Röhrchen verbunden dachte [1], sodass es zu einem Energieaustausch kam. In dieses Röhrchen konnte man sich zusätzlich einen Frequenzfilter und einen Polarisator eingesetzt denken. Wenn sich die beiden Hohlräume auf gleicher Temperatur befinden, verlangt der 2. Hauptsatz der Thermodynamik, dass das so bleibt. Das bedeutet, der Netto-Energiefluss muss bei jeder Frequenz und Polarisation der Strahlung Null sein, das heißt, es muss aus dem einen Hohlraum genauso viel Energie (bei der Durchlassfrequenz des Filters und der Durchlassrichtung des Polarisators, wobei beide Größen nach Belieben eingestellt werden können) herausströmen wie in Gegenrichtung aus dem anderen. Da man dem zweiten Hohlraum eine beliebige Form geben und ihn überdies noch willkürlich verschieben und drehen kann, gelangt man schnell zu dem Schluss, dass die Hohlraumstrahlung folgende Eigenschaften haben muss: Sie ist homogen (ihre Energiedichte ist unabhängig vom Ort innerhalb des Hohlraums), isotrop (richtungsunabhängig) und unpolarisiert. Ihre spektrale und räumliche Energiedichte u , die so definiert ist, dass sich in einem Volumenelement dV und einem Frequenzintervall $\nu \dots \nu + d\nu$ die Energie $u dV \cdot d\nu$ befindet, ist daher nur von der Frequenz ν und der Temperatur T abhängig. Einen expliziten Ausdruck für diese universelle Funktion $u(\nu, T)$ zu finden, ist das ultimative Ziel einer Theorie der Hohlraumstrahlung. Aus ihrer Kenntnis ergibt sich in einfacher Weise die in einen vorgegebenen Raumwinkel emittierte Strahlungsleistung, die sich direkt messen lässt.

Die ganze Tragweite der Lummerschen Idee zeigte sich erst, als man mit dem Hohlraum – in Gedanken – in ähnlicher Weise verfuhr wie mit einem Gasbehälter. Als erstes verschloss man die Öffnung des Hohlraums, die die Betrachtung nur störte. Des Weiteren stellte man sich den Hohlraum als einen Zylinder mit einem verschiebbaren, spiegelnden Kolben vor. Man konnte so den Hohlraum vergrößern oder verkleinern. (Zweckmäßigerweise dachte man sich die Bewegung „unendlich“ langsam.) Weiterhin sollte der Hohlraum durch Kopplung an ein großes Wärmereservoir auf einer konstanten Temperatur gehalten werden. Nun war aus der Maxwellschen Elektrodynamik bekannt, dass die Strahlung einen Druck ausübt (schon Kepler hatte auf dessen Existenz aus der Beobachtung geschlossen, dass der Schweif von Kometen immer von der Sonne weg weist). Mit der Kolbenbewegung war daher eine mechanische Arbeitsleistung verbunden. Das führte dazu, dass bei Kompression dem Reservoir Wärme zugeführt und im Falle von Expansion von ihm abgeführt wurde. Unter Verwendung des 1. und 2. Hauptsatzes der Thermodynamik und der Definition der Entropie konnte Ludwig Boltzmann im Jahre 1884 das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz, das zuvor von Josef Stefan experimentell gefunden worden war, streng ableiten [2]. (Wegen ihrer Eleganz wurde diese Ableitung von H.A. Lorentz als „Perle der theoretischen Physik“ gerühmt.) Das genannte Gesetz beschreibt die Temperaturabhängigkeit der gesamten, das heißt über alle Frequenzen integrierten, Strahlungsenergie $U(T) = \int_0^\infty u(\nu, T) d\nu$ in folgender Weise:

$$U(T) = aT^4 \quad (1)$$

Dabei ist a eine Konstante, deren Wert offen bleibt. Man kann nur sagen, dass sie auf Grund des universellen Charakters der Hohlraumstrahlung ebenfalls universeller Natur sein muss, das heißt, sie muss entweder selbst eine Naturkonstante sein oder sich aus solchen zusammensetzen.

Ein Glanzstück physikalischer Argumentationskunst gelang im Jahre 1893 Wilhelm Wien mit der Aufstellung seines Verschiebungsgesetzes. Um Informationen über die Strahlungsdichte $u(\nu, T)$ zu bekommen, betrachtete er wie vor ihm Stefan einen zylinderförmigen Hohlraum mit verschiebbarem Kolben, wobei nun aber sämtliche Wände spiegelnd sein sollten. Damit erübrigte sich die Kopplung eines Wärmereservoirs an den Hohlraum. Wien überlegte sich, was mit der eingeschlossenen Strahlung nach Verstreichen einer Zeit δt im Einzelnen passiert ist, wenn der Kolben mit konstanter Geschwindigkeit nach innen bewegt wird. Hier kommt nun der Doppler-Effekt an einem bewegten Spiegel zum Tragen, der folgendes bewirkt: Betrachten wir die Strahlungsenergie bei einer bestimmten Frequenz ν , so wird sie dank der Frequenzverschiebung (zu höheren Frequenzen hin) vermindert, andererseits jedoch dadurch vergrößert, dass Strahlungsenergie bei niedrigeren Frequenzen dorthin „geschaufelt“ wird. Die ganze Sache wird dadurch kompliziert, dass die Doppler-Verschiebung ja noch von der Ausbreitungsrichtung der einfallenden Strahlung abhängt. Wien meisterte dieses Problem [2] und fand, nachdem er an Stelle der Zeit das Hohlraumvolumen V als Variable verwendet hatte, eine partielle

Differentialgleichung erster Ordnung für u , deren allgemeine Lösung er angeben konnte. Schließlich konnte er aus der Entropieerhaltung auf einen Zusammenhang zwischen dem Volumen V und der Temperatur T schließen, was es ihm erlaubte, letztere als neue Variable einzuführen. Er gelangte so schließlich zu dem fundamentalen Ergebnis

$$(2) \quad u(v, T) = v^3 f(v/T),$$

das als Wiensches Verschiebungsgesetz bekannt wurde. Die hier auftretende Funktion f kam dabei über die allgemeine Lösung der erwähnten partiellen Differentialgleichung ins Spiel und bleibt damit leider unbestimmt. Was man – wieder auf Grund des universellen Charakters der Hohlraumstrahlung – lediglich sagen kann, ist, dass auch sie eine universelle Funktion sein muss.

Das Resultat (2) stellt nichtsdestoweniger einen Triumph der klassischen Strahlungstheorie dar. Man hatte ja eine Funktion von zwei Variablen auf eine Funktion einer einzigen zurückgeführt, was bedeutete, man brauchte zur experimentellen Bestimmung der Strahlungsdichte nur noch bei einer Variablen – v oder T – zu messen, was den Experimentatoren das Leben wesentlich erleichterte. Weiterhin folgt aus (2) ein Verschiebungsgesetz, das die Frequenz ν_{\max} , bei der die Ausstrahlung maximal ist, in einfacher Weise mit der Temperatur T des Strahlers in Verbindung bringt

$$(3) \quad \nu_{\max} T = \text{const},$$

wobei die Konstante allerdings unbestimmt bleibt.

Bei all diesen beeindruckenden Resultaten muss allerdings festgehalten werden, dass das Hauptziel, nämlich die explizite Bestimmung der Energiedichte u , nicht erreicht wurde. Wie später deutlich wurde, ist die klassische Theorie damit grundsätzlich überfordert. Tatsächlich gelang es erst Max Planck im Jahre 1900, das Problem exakt zu lösen. Aber er musste über die klassische Physik hinausgehen und in einem „Akt der Verzweigung“ eine ungeliebte Größe – das elementare Wirkungsquantum h , das nach ihm benannt wurde – einführen.

Doch bleiben wir bei den klassischen Ergebnissen (1) und (2). Wie oben schon betont, muss die Konstante a im Stefan-Boltzmannschen Gesetz entweder selbst eine Naturkonstante sein oder sich aus solchen Größen zusammensetzen. Es stellt sich nun heraus, dass die klassischen Naturkonstanten wie Lichtgeschwindigkeit, Boltzmann-Konstante, elektrische Elementarladung und Gravitationskonstante dafür nicht ausreichen, vielmehr braucht man eine neue Konstante von der Dimension einer Wirkung (3) [3]. Ein Vergleich mit dem aus dem Planckschen Strahlungsgesetz folgenden Wert für a zeigt, dass diese Konstante bis auf einen Zahlenfaktor mit dem Planckschen Wirkungsquantum identisch ist.

Im Falle des Wienschen Verschiebungsgesetzes (2) kann man den Mathematiker zu Wort kommen lassen. Das Argument einer mathematischen Funktion muss grundsätzlich eine dimensionslose Größe sein. Angewandt auf die Funktion f bedeutet dies, deren Argument muss korrekt in der Form $\alpha v/T$ geschrieben werden,

wobei die Konstante α dafür sorgt, dass das Argument dimensionslos wird. Der universelle Charakter der Funktion (2) verlangt dann wieder, dass α entweder selbst eine fundamentale Konstante ist oder sich aus solchen zusammenbasteln lässt. Auch diese Forderung lässt sich nur unter Zuhilfenahme einer nichtklassischen Naturkonstante von der Dimension einer Wirkung, also letztlich wieder des Planckschen Wirkungsquantums, erfüllen.

Wir kommen so zu der erstaunlichen Einsicht, dass eine *klassische* Analyse der Hohlraumstrahlung die Existenz einer *nichtklassischen* Naturkonstante zwingend erfordert. Damit springt aber die klassische Theorie über ihren eigenen Schatten! Der Grund kann nur der sein, dass die Hohlraumstrahlung gar kein klassisches System, sondern, wie Planck zeigte, in Wahrheit ein *makroskopisches Quantensystem* ist, das man nichtsdestoweniger durch klassische Messungen vollständig erforschen kann. Ich finde es erstaunlich, dass die Quantentheorie gerade an Hand eines solchen Systems entdeckt wurde, wobei mikroskopische Prozesse – die quantenhafte Energieaufnahme und -abgabe durch „Lichtoszillatoren“ – nur Modellcharakter besaßen.

Nicht vergessen werden sollte bei der Planckschen Entdeckung die entscheidende Rolle des Experiments. Es waren ja die Forscher an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin, vor allem O. Lummer und E. Pringsheim, die durch präzise Messungen im infraroten Spektralbereich systematische Abweichungen von der bislang allgemein anerkannten Wienschen Strahlungsformel (auf die Wien dadurch gestoßen war, dass er für die Funktion f in seinem Verschiebungsgesetz eine plausible Annahme machte) feststellten und damit Planck so stark unter Druck setzten, dass er „unter allen Umständen, koste es, was es wolle, ein positives Resultat herbeiführen musste“. So sah die Geburtsstunde der Quantentheorie aus! Da alles mit der Lummerschen Erfindung des Hohlraums als Strahlungsquelle begann, zögere ich nicht, die Lummersche Leistung einen Geniestreich zu nennen. Ohne ihn wäre die Entwicklung der Quantentheorie sicherlich ganz anders verlaufen. Aber darüber kann man nur spekulieren.

Literatur

- [1] Hund F.: *Theoretische Physik. Eine Einführung*, Band 3 Wärmelehre und Quantentheorie, Stuttgart: 1966 B.G. Teubner
- [2] Planck M.: *Theorie der Wärmestrahlung*. Leipzig ⁶1966: Johann Ambrosius Barth
- [3] Paul H., Schleich W.P.: The amazing power of thermodynamics: Planck's constant emerges from classical radiation theory. *Physica Scripta*, Special Issue FQMT13 Proceedings (im Druck).