

2. Die obere Grenze der Wellenlängen, welche in der Wärmestrahlung fester Körper vorkommen können; Folgerungen aus dem zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie; von Willy Wien.

Die bisher sichergestellten Gesetze der Strahlung sind ausschliesslich aus dem zweiten Hauptsatze abgeleitet worden. Als Grundlage dienten bekannte Eigenschaften der Aetherwellen, ohne dass man auf die Bewegungen der Molecüle selbst und die Wechselwirkungen zwischen ihnen und dem Aether zurückzugehen brauchte. Bei dem gegenwärtigen Stande unserer Kenntnisse ist diese rein thermodynamische Behandlungsweise die einzige, welche ganz frei von Hypothesen bleibt und deshalb sichere Resultate liefert. Andererseits muss sie sich darauf beschränken, die Gesetzmässigkeiten der Strahlung aufzufinden, soweit sie einzig und allein durch die Wärmebewegung als solche hervorgerufen wird, und kann niemals die Einzelheiten darstellen, welche wahrscheinlich durch besonderen Molecularbau oder durch zufällige Beschaffenheit der strahlenden Oberfläche bedingt sind. Es sind nach diesen Principien die Beziehungen zwischen Emission und Absorption, die Abhängigkeit von dem umgebenden Medium, die Abhängigkeit der Strahlung von der Temperatur für *schwarze Körper* als physikalisch bekannt anzusehen. Die letzte Beziehung lässt sich auf beliebige Körper ausdehnen, wenn das Reflexionsvermögen als Function der Temperatur bekannt ist.

Dagegen ist die Energievertheilung im Spectrum bei *einer* Temperatur noch unbekannt und aus den erwähnten Beziehungen nicht zu gewinnen. Soweit ich sehe, ist diese letzte noch fehlende Lücke durch die gegenwärtige Kenntniss der Eigenschaften der Aetherwellen nicht ausfüllbar, weil hier Rechenhaft verlangt wird, in welchem Verhältniss der Intensität der strahlende Körper Strahlen verschiedener Wellenlänge aussendet. Um diese durch einen thermodynamischen Process zu geben, müssten wir Eigenschaften kennen, welche eine verschiedene Abhängigkeit der Strahlen verschiedener Wellenlänge von ihrer Intensität anzeigt.

Es lässt sich aber zeigen, dass solche Strahlen, *welche von Drahtnetzen vollständig zurückgeworfen werden, in der Wärmestrahlung nur unendlich kleine Intensitäten haben können.*

Bevor wir uns zu den Voraussetzungen und der Ableitung dieses Satzes wenden, wollen wir uns damit beschäftigen, aus dem Gesetze, welches die Abhängigkeit der Strahlung von dem umgebenden Medium ausspricht ¹⁾, einige einfache Folgerungen zu ziehen, von denen wir später Gebrauch zu machen haben.

§ 1.

Vertheilung der Strahlung in Räumen, die mit dielectrisch polarisirbarer Substanz angefüllt sind.

Im Innern eines geschlossenen leeren Raumes, dessen Wände ein für alle möglichen Wärmestrahlen von Null verschiedenes Emissionsvermögen besitzen, und gleiche Temperatur haben, befindet sich eine dieser Temperatur entsprechende gleichmässig vertheilte Strahlung. Die Energiemenge dieser Strahlung ist nach einer von Kirchhoff aus seinem bekannten Satze gezogenen Folgerung so gross, als ob die Wände des Raumes vollkommen schwarz wären. Es lässt sich ohne weiteres einsehen, dass dieselbe Energiemenge vorhanden sein muss, wenn ein Theil der Wände vollkommen spiegelnd und nur der übrige entweder vollkommen schwarz ist oder für alle Strahlen ein endliches Emissionsvermögen besitzt. Ist der Raum kein Vacuum, sondern mit einer isolirenden Substanz erfüllt, so ist die Energiemenge nach dem erwähnten Gesetz eine grössere und zwar für jede Schwingungsdauer im umgekehrten Verhältniss des Quadrats der Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Wenn der Raum mit schwarzen Innenwänden theilweise Vacuum, theilweise mit dem Isolator angefüllt ist, so folgt weiter, dass die Energievertheilung auch jetzt sowohl im Vacuum als im Isolator die soeben festgesetzte ist. *Wir wollen sie als die normale bezeichnen.*

Dasselbe ist der Fall, wenn die dem Isolator anliegenden Wände vollkommen spiegelnd sind und die schwarzen Flächen nur an das Vacuum stossen.

¹⁾ v. Helmholtz, Physiol. Optik p. 171; Clausius, Mech. Wärmetheorie 1. p. 315.

Denn denkt man sich hinter dem Spiegel eine schwarze Fläche von der gleichen Temperatur, so würde, wenn in dem Isolator eine grössere Energiemenge als die normale herrschte, nach dem Fortziehen des Spiegels, wie aus dem vorigen folgt, nunmehr die normale Vertheilung sich herstellen, also ein Theil der Energie an die schwarze Fläche übergehen müssen; es würde sich diese also auf Kosten der gleichtemperirten andern erwärmen. Wenn andererseits die anfängliche Vertheilung so wäre, dass in dem Isolator eine geringere Energiemenge als die normale sich befände, so könnte man durch Fortziehen des Spiegels die normale herstellen und dabei würde die schwarze Fläche hinter dem Spiegel ein bestimmtes Wärmequantum abgeben. Nach Schliessung des Spiegels müsste sich dann wieder das anfängliche Gleichgewicht der Strahlung herstellen und dabei Wärme an die im Vacuum befindliche schwarze Fläche übergehen, die sich nun auf Kosten der andern erwärmen würde. Auch wenn der isolirende, feste Körper völlig frei begrenzt in dem Raum sich befindet und vom Vacuum umgeben wird, ist immer die Energievertheilung die angegebene. Ein solcher Körper ist von gleichmässiger Strahlung umgeben und der Druck auf seine Oberfläche hält ihn an jeder Stelle des Raumes im Gleichgewicht. Eine Bewegung desselben durch diesen Raum ist deshalb auch mit keiner Arbeitsleistung gegen den Druck der Strahlung verbunden. Die Veränderung der Farbe nach dem Doppler'schen Princip¹⁾ muss sich hier ebenfalls aufheben, weil eine solche Veränderung immer einer Arbeitsleistung gleichwerthig ist. Die Verkürzung der Schwingungsdauer auf der einen Seite wird von der Verlängerung auf der anderen in jedem Zeitintervall aufgehoben. Wäre nun die Energievertheilung zwischen dem Vacuum und dem isolirenden Körper nicht die normale, so könnte man ihn ohne angebbare Arbeitsleistung bis an die schwarze Fläche verschieben. Die sich dann herstellende normale Vertheilung würde, wie bereits erörtert, zu einer Erwärmung eines Theiles der Oberfläche des Raumes auf Kosten eines anderen führen.

1) W. Wien, Sitzungsber. d. Berl. Akad. 9. Febr. 1893.

§ 2.

Voraussetzungen.

Bei den Betrachtungen, welche wir anstellen wollen, muss vorausgesetzt werden, dass die Strahlung jeder Wellenlänge von den einschliessenden Wänden vollständig zurückgeworfen wird. Nun ist der Vorgang der Reflexion immer mit einer geringen Absorption verbunden. Denkt man sich aber die Dimensionen der betrachteten Räume vergrössert, so steigert man die Dimensionen der Räume in der dritten Potenz, die spiegelnde Oberfläche aber nur im Quadrat der Lineardimensionen. Es ist also keine theoretische Grenze gegeben, die in einer bestimmten Zeit absorbirte Energie auf einen beliebigen Bruchtheil des ganzen Energievorrathes hinabzudrücken.

Wir setzen weiter voraus, dass bei Bewegung beliebiger, auch gasförmiger Körper in einem mit Strahlung erfüllten Raume keine andern ponderomotorischen Kräfte wirksam werden als die Maxwell'schen Druckkräfte.

Aus diesen Annahmen werden wir folgern, dass Wellenlängen, welche durch Drahtnetze nicht hindurchgehen, auch in der Wärmestrahlung nicht als endliches Energiequantum vorkommen können. Wenn die Hertz'schen Schwingungen von Drahtnetzen vollständig zurückgehalten werden¹⁾, so müssen wir annehmen, dass die obere Grenze der Wellenlängen, welche von der Wärme hervorgebracht werden können, zwischen denen der Hertz'schen Schwingungen und der bisher beobachteten ultrarothern Strahlen liegt. Die Voraussetzung liegt also darin, dass die Durchlässigkeit des Drahtgeflechtes für Strahlung schnell mit wachsender Wellenlänge abnimmt. Von einer bestimmten Grenze an muss gleichzeitig die entsprechende Energie kleiner und kleiner werden.

§ 3.

Die Bewegung eines ideellen Gases in einem mit Strahlung von grosser Wellenlänge erfüllten Raume.

Durch die Eigenschaft der Drahtnetze, Strahlung von grosser Wellenlänge zurückzuhalten, ist offenbar die Möglich-

1) Hertz, Sitzungsber. d. Berl. Akad. 1888. p. 841; Stefan, Sitzungsber. d. Wien. Akad. 24. April 1890; H. Rubens und R. Ritter, Wied. Ann. 40. p. 55. 1890.

keit geboten, die wägbaren Theile eines ideellen Gases durch die Zwischenräume des Netzes aus dem Raume austreten zu lassen, während die Strahlung gezwungen ist, zurückzubleiben. Nach unserer Voraussetzung wird hierbei keine Arbeit geleistet soweit die Strahlung in Betracht kommt. Wenn sich auf der anderen Seite des Netzes ein beweglicher Stempel befindet, so kann das hindurchgehende Gas eine seiner Ausdehnung entsprechende Arbeit leisten. Dann ist der Process umkehrbar.

Wenn nun auch von dem Drahtnetz die Schwingungen nicht hindurchgelassen werden, so muss doch die Möglichkeit offen gehalten werden, dass ein Theil der electricen Energie, *soweit diese durch die dielectrische Polarisation vermehrt wird*, an den Gasmoleculen haftet und mit diesen fortgezogen wird. Das Verhältniss der durch Anwesenheit der Gasmoleculen vermehrten Energie zu der im Vacuum ist bei constant gehaltener electricer Kraft gleich der dielectrischen Constante und in demselben Verhältniss steht die Dichtigkeit der normalen Strahlung in beiden Fällen. Diese ist doppelt so gross, als die der electricen Energie. Wenn also auch die ganze, durch Polarisation erfolgte Vermehrung der Energie vollständig an den wägbaren Theilen haftete, so würde doch immer nur die Hälfte des Ueberschusses, den die Anwesenheit des Gases in der Dichtigkeit der Energie bedingt, von den Moleculen fortgezogen werden. Nun ist nach Boltzmann die dielectrische Constante proportional der Dichtigkeit des Gases. Die Dichtigkeit der Strahlung ist also in einem sich ausdehnenden Gase immer dann die normale, wenn die Dichtigkeit der Strahlung in demselben Verhältniss sich ändert.

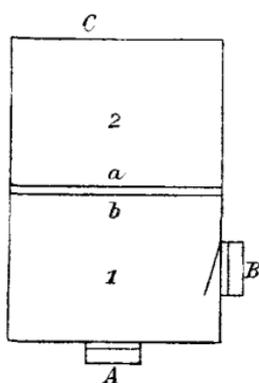
Wenn wir also im Stande sind, während das durch das Gitter strömende Gas den Stempel vor sich hertreibt, durch die vorausgesetzten Eigenschaften des Drahtnetzes auch nur die Hälfte des Ueberschusses der Energie, den die hindurchgegangenen Moleculen vorher bedingten, an dem Gitter zurückzuhalten, so haben wir diesseits des Gitters eine Dichtigkeit der Strahlung, welche grösser ist, als die normale. Wenn wir Körper herstellen könnten, welche durch blosse Erwärmung nur Strahlen von der betrachteten Wellenlänge aussenden, so besässen wir ein Mittel, einen solchen Körper auf Kosten

eines anderen von derselben Temperatur zu erwärmen, weil die betrachteten Vorgänge vollständig umkehrbar sind. Wir müssen aber auf die Anwesenheit der anderen Wärmestrahlen, welche von dem Drahtgitter hindurchgelassen werden, Rücksicht nehmen und deshalb einen etwas verwickelteren Process betrachten.

§ 4.

Ausscheidung der Strahlung von grosser Wellenlänge.

Wir denken uns einen Cylinder, in welchem sich ein beweglicher, für Strahlung vollkommen durchlässiger Stempel *a* befindet. Die Innenwände seien vollkommen spiegelnd; die Schlusswand *C* sei ebenfalls beweglich. Der Stempel *a* theilt den Raum in zwei Theile 1 und 2. Hinter *A* und *B* sollen sich schwarze Körper von unendlich grosser Wärmecapacität



befinden, welche durch bewegliche lichtdichte Klappen in den Spiegeln vom Innenraum getrennt sind. Zwischen den Klappen und den schwarzen Körpern befinden sich für Strahlung vollkommen durchlässige Platten, welche den Raum gasdicht abschliessen. Der Raum zwischen diesen Platten und dem schwarzen Körper sei Vacuum; ebenso Raum 2. In Raum 1 dagegen soll sich ein ideales Gas von beliebiger Temperatur befinden. Alle Spiegel

und die durchlässigen Platten sollen schlechte Wärmeleiter sein, sodass das Gas durch Leitung weder Wärme abgibt noch empfängt. Da das Gas selbst vollkommen durchlässig für Strahlen ist, gibt es keine Wärme durch Strahlung ab und nimmt keine auf.

Anfangs sei die Klappe *B* geschlossen, *A* offen. Es stellt sich dann ein Gleichgewichtszustand der Energie her, indem in Raum 1 die dem dielectricischen Verhalten des Gases entsprechende normale Strahlung sich gleichmässig vertheilt, in 2 die dem Vacuum entsprechende sich ansammelt.

Wir schliessen jetzt *A* und gehen mit *a* gegen *C* hin. Das Gas folgt dem Stempel und leistet dabei eine bestimmte Arbeit auf Kosten seines Wärmeverraths. Dieser Process ist umkehrbar. Die Strahlung wird bei der Ausdehnung des

Gases ebenfalls Arbeit leisten, weil im Raum 1 die Dichtigkeit infolge der Anwesenheit des Gases eine grössere ist. Da diese Arbeitsleistung auf Kosten der Strahlung geschehen ist, wird ihre Dichtigkeit nicht mehr die normale sein; würden wir jetzt den Raum 1 mit dem schwarzen Körper in Austausch der Strahlung setzen, so würde ein Ausgleich stattfinden, der nicht mehr umkehrbar wäre. Wenn wir dagegen den Stempel *C* jetzt so weit vorschieben, dass die Dichtigkeit der Strahlung nunmehr die normale wird, so wird ein Oeffnen der Klappe *B* offenbar keine Veränderung der Strahlung hervorbringen, Dann sind die Vorgänge vollständig umkehrbar.

Nach diesen vorbereitenden Betrachtungen denken wir uns den Stempel *a* wieder in seiner Anfangslage, und zwar belegt mit einem Drahtnetz, welches Strahlen, deren Wellenlänge eine gewisse Grenze überschreitet, vollständig zurückwirft. Die Drähte des Netzes sind der Strahlung kürzerer Wellenlänge gegenüber auch als spiegelnd anzusehen. Diese Strahlen gehen frei durch das Geflecht hindurch. Ein zweites frei bewegliches Drahtnetz *b* befinde sich zwischen *a* und dem Raum 1 (Figur p. 638) unendlich nahe an *a*. Dann vollziehen wir folgenden Kreisprocess.

I. Vorwärtslaufende Prozesse.

1. *Anfangszustand.* *B* ist geschlossen, *A* offen; der Stempel *a* liegt dicht an dem Netz *b*; in 1 befindet sich das Gas und die Gesamtstrahlung; in 2 nur die Strahlung kürzerer Wellenlänge.

2. *A* wird auch geschlossen; der Stempel *a* wird eine Strecke bewegt; dabei leistet Arbeit

a) die Strahlung kürzerer Wellenlänge entsprechend ihrer grösseren Dichtigkeit im Gase;

b) das Gas;

c) die möglicherweise von den Gasmoleculen hinübergezogene Strahlung grosser Wellenlänge (vgl. § 3), welche von dem Drahtnetz des Stempels *a* zurückgeworfen wird.

3. Der Stempel *C* wird so weit vorgeschoben, dass die durch die Arbeitsleistung 2a) verminderte Energie der Strahlung kurzer Wellenlänge wieder normale Dichtigkeit in 2 hat. Nach § 1 hat sie diese dann auch in 1.

4. Es wird B geöffnet. Die Strahlung kurzer Wellenlänge bleibt unverändert. Die Strahlung grosser Wellenlänge hat in 1 einen Ueberschuss über die normale Dichtigkeit (vgl. § 3). Dieser Ueberschuss Q geht an B über. Die Strahlung grosser Wellenlänge zwischen a und b bleibt unverändert.

II. Rückwärtslaufende Prozesse.

1. B wird wieder geschlossen. Der Stempel C in seine frühere Lage zurückgeführt; dabei wird die auf dem Hinwege geleistete Arbeit wiedergewonnen.

2. Das Gitter b wird so weit nach C bewegt, dass die Strahlung grosser Wellenlänge auf beiden Seiten gleich gross wird; dabei wird Arbeit gewonnen.

3. Das Drahtnetz b wird fortgezogen; der Stempel a in seine Anfangslage zurückgebracht; hierzu genügen die unter I. 2a), b), c) und II. 2. gewonnenen Arbeitswerthe, weil keine Strahlung ohne entsprechende Arbeitsleistung sich ausgedehnt hat.

4. b wird an seine erste Stelle gesetzt; A geöffnet, der Anfangszustand ist wieder erreicht.

Da die Ueberführung des Energiequantums Q von A nach B dem zweiten Hauptsatz widerspricht, müssen wir annehmen, dass solche Strahlen, welche von dem Gitter vollständig zurückgehalten werden, überhaupt in der Wärmestrahlung keine endliche Intensität haben.

Für die Ausstrahlung der Körper bei sehr niedriger Temperatur kann die gleiche Folgerung nicht mit Sicherheit gezogen werden. Es folgt dies schon aus der Veränderung der Wellenlängen nach dem Doppler'schen Princip, welche den durch Temperatur hervorgebrachten gleichwerthig sind; wenn die Temperatur sehr klein wird, müssen die Wellenlängen in der Nähe des Maximums der spectralen Energievertheilung sehr grosse Werthe annehmen. Wenn nun in dem oben dargestellten Prozesse die schwarzen Körper sehr tiefe Temperatur besitzen sollen, so würde zwischen ihnen und dem Gas eine sehr grosse Temperaturdifferenz bestehen bleiben, weil das Gas nicht soweit abgekühlt werden darf, ohne die vorausgesetzten Eigenschaften des ideellen Gases zu verlieren. Da ausserdem für sehr kleine Werthe der Temperatur nach

dem Stefan'schen Gesetz die ausgestrahlte Energie verschwindend klein ist gegen den Betrag bei höherer Temperatur, so kann das sonst verschwindende Ausstrahlungsvermögen des Gases selbst und namentlich auch der dem Gase anliegenden diathermanen Platten, welche mit dem Gase gleiche Temperatur haben müssen, gegen die Energie der Strahlung in Betracht kommen.

Dass den Hertz'schen Schwingungen gegenüber die festen Körper als stetige Massen und nicht wie bei den Lichtschwingungen als Molecülgruppen wirken, ist bereits von Bjerknæs¹⁾ ausgesprochen. Es können dann auch durch die Molecularbewegungen der Wärme keine Hertz'schen Wellen ausgesandt werden. Es mag aber schliesslich noch besonders hervorgehoben werden, dass aus unseren Betrachtungen keineswegs eine Unstetigkeit des Verhaltens der Strahlen verschiedener Wellenlänge folgt. Es sollte nur gezeigt werden, dass die Eigenschaften langer Wellen uns zu der Annahme führen, dass in der Wärmestrahlung durchaus nicht Strahlen *jeder* Wellenlänge vorhanden sind, sondern dass die Energiecurve, als Function der Wellenlänge dargestellt, auf der Seite der grossen Wellenlängen schon im endlichen Gebiet stetig auf unendlich kleine Werthe herabsinkt.

1) Bjerknæs, Wied. Ann. 48. p. 593. 1893.