Jens Küchenmeister (1253810)
Julian Merkert (1229929)

Versuch: P2-43

Wärmestrahlung

- Vorbereitung -

Vorbemerkung
Dieser Versuch beschäftigt sich mit der Wärmestrahlung von Körpern. Der Untersuchung der Strahlungsspektren kam besonders um 1900 herum eine besondere Bedeutung zu, denn sie konnten nicht mit der klassischen Theorie verstanden werden - hierfür musste erst Max Planck seine Hypothese der Quantisierung der Energie aufstellen, denn nur unter der Annahme, dass die Energieabsorption und -emission quantisiert abläuft, ließen sich die spektralen Verteilungen richtig deuten und vorhersagen. Desweiteren spielen die Strahlungsgesetzte eine weitreichende Rolle in der Technik, so etwa bei Sonnenkollektoren und Hitzeschilden für Raumfahrzeuge. Im Praktikumsversuch soll nun die Gültigkeit der entsprechenden Gesetze demonstriert und der Umgang mit den entsprechenden Messaparaturen vermittelt werden.

Inhaltsverzeichnis

0 Theoretische Grundlagen

0.1 Wärmestrahlung

Wärmeenergie kann auf drei Arten übertragen werden, nämlich durch Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung. Unter Wärmeleitung versteht man den Prozess, dass die Energie mittels Wechselwirkung von Atomen oder Molekülen übertragen wird, wobei diese selbst ihre Position aber mehr oder weniger beibehalten. Hinter dem Begriff der Konvektion verbirgt sich die Übertragung von Wärme mittels Stofftransport, also z.B. das Abführen von warmer Luft. Bei der Wärmestrahlung emittieren oder absorbieren die Körper Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung, die sich im Raum mit Lichtgeschindigkeit ausbreitet (und transversaler Natur ist). Je nach Temperatur des Körpers kann diese Strahlung in verschiedenen Wellenlängenbereichen liegen, beispielweise im infraroten oder um sichtbaren Licht. Grundsätzlich absorbiert und emittiert jeder Körper Strahlung. Befindet er sich in thermischem Gleichgewicht mit seiner Umgebung, so vollziehen sich Emission und Absorption mit gleicher Geschwindigkeit, d.h. der Netto-Umsatz ist Null. Hat der Körper eine höhere Temperatur als seine Umgebung, so emittiert er mehr, als er absorbiert - dadurch kühlt er sich ab und erwärmt seine Umgebung.

0.2 Absorptions- und Emissionsvermögen

Als (integrales) *Absorptionsvermögen* A definiert man den über alle Wellenlängen gemittelten Quotienten

$$A = \frac{\text{absorbierte Strahlungsleistung}}{\text{auftreffende Strahlungsleistung}} \tag{1}$$

Als das *Emissionsvermögen* E bezeichnen wir eine von der Art der Oberfläche eines Materials abhängende Konstante, welche die über alle Wellenlängen integrierte Leistung angibt, die pro m^2 Oberfläche in die Raumwinkeleinheit $\Delta\Omega = 1sr$ um die Flächennormale abgestrahlt wird.
Eine Besonderheit ist nun, dass für alle Körper mit einer Temperatur T das Verhältnis von Emissions- und Absorptionskoeffizient gleich einer Konstanten K ist, die nur von der Temperatur, nicht aber vom Material des Körpers abhängt:

$$K(T) = \frac{E(T)}{A(T)} \tag{2}$$

Kurz gesagt - das Verhältnis von Emissionsvermögen und Absorptionsvermögen beliebiger Körper mit der Temperatur T ist eine nur von T abhängige Funktion $K(T)$ (dies wird als Kirchhoffsches Gesetz bezeichnet).

0.3 Schwarzer Strahler

Wir wollen nun einen Spezialfall näher betrachten, nämlich $A \equiv 1$. Gilt dies für einen Körper, so nennen wir ihn *schwarzer Körper*. Ein solcher Körper absorbiert die gesamte auf ihn treffende Strahlung! Da der Name irreführend ist, muss aber deutlich gesagt werden: der Körper ist ganz und gar nicht „schwarz“ im dem Sinne, dass er keine Strahlung emittieren würde. Im Gegenteil: wie erwähnt ist K eine Funktion, die körperunabhängig und nur temperaturabhängig ist. Somit folgt für einen schwarzen Körper, dass er von allen Körpern gleicher Temperatur das größte Emissionsvermögen besitzt! Das die Bezeichnung „schwarzer Körper“ irreführend ist, zeigt ein einfaches Beispiel: unsere Sonne ist in guter Näherung ein schwarzer Körper, emittiert aber doch deutlich fühlbar Wärmestrahlung!
Die beste experimentelle Realisierung eines schwarzen Körpers besteht in einem erhitzten Hohlraum, der eine kleine Öffnung hat, durch die die Strahlung ein- und austreten kann (Abb.1).

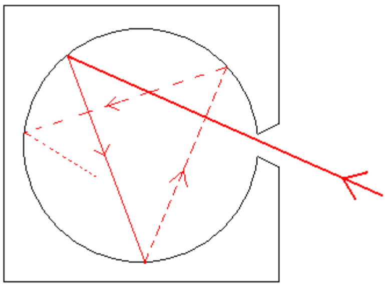

Abb.1: Annäherung an schwarzen Körper

Die sich im Innern befindliche elektromagnetische Strahlung befindet sich aufgrund der häufigen Absorption und Emission (die stattfindet, bevor sie wieder austritt) mit den Wänden in einem thermischen Gleichgewicht. Somit ist die irgendwann austretende Strahlung charakteristisch für die Temperatur des Hohlraums, weswegen man die Strahlung eines schwarzen Körpers auch als Hohlraumstrahlung bezeichnet.

0.4 Plancksches Strahlungsgesetz

Abbildung 2 zeigt die Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge für drei verschiedene Temperaturen.

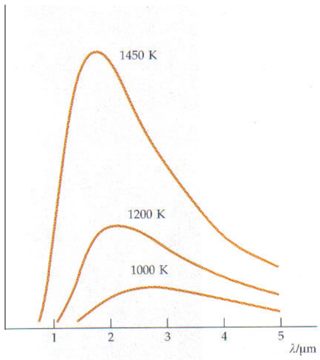

Abb.2: Strahlungsleistung schw. Körper
Quelle: Tipler, S.551

Nachdem alle Versuche zur Erklärung dieses spektrums aus den bekannten thermodynamischen und elektrodynamischen Gesetzen gescheitert waren, führte Max Planck 1900 die Hypothese der Quantisierung der Energie ein, so dass ein strahlendes System mit einem Strahlungsfeld nicht beliebige Energieportionen austauschen kann, sondern nur ganzzahlige Vielfache eines Wertes, dem Planckeschen Energiequantum $h \cdot \nu$. Aus dieser Annahme heraus erhielt Planck folgendes Strahlungsgesetz:

$$\rho(\nu, T)\, d\nu \quad = \quad \frac{8\pi \cdot h}{c^3} \cdot \frac{\nu^3}{e^{\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}} - 1}\, d\nu \qquad (3)$$

wobei ρ die Energiedichte im Frequenzintervall $[\nu, \nu + d\nu]$ ist, die in einem von einem schwarzen Körper ausgehenden Strahlungsfeld herrscht.

0.5 Pyrometer

Bei einem Pyrometer handelt es sich um ein Gerät zur Messung der Strahlung eines Körpers mit dem Ziel des Rückschlusses auf seine Temperatur. In unserem Fall handelt es sich um ein optisches Verfahren, auch photometrisches Verfahren genannt, bei dem ein optisches Pyrometer verwendet wird:

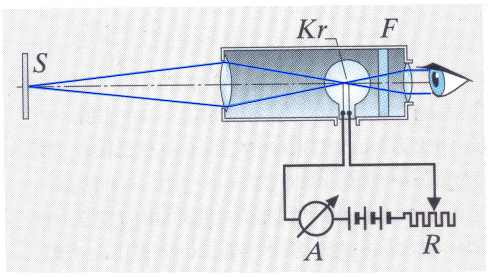

Abb.3: optisches Pyrometer
Quelle: Gerthsen, S.579

Durch die Linse am Eingang wird das Bild des strahlenden Körpers in die gleiche Ebene abgebildet, in der sich der Faden einer Glühlampe befindet (Kr). Am Pyrometer gibt es einen verstellbaren Widerstand R, der dazu dient, den Strom in der Glühwendel zu regulieren. Entsprechend dem Strom in der Wendel wird diese anfangen sich zu erhitzen und entsprechendes Licht einer gewissen Wellenlänge emittieren. Der Grundgedanke ist nun der, dass man versucht die Glühwendel auf die gleiche Temperatur zu bringen, die auch die zu untersuchende strahlende Fläche hat. Man betrachtet also (durch einen Rotfilter F) die Glühwendel, die sich wie eingangs erwähnt in der gleichen Ebene befindet wie das Bild der strahlenden Fläche. Man regelt nun so lange der Strom hoch (mittels R), bis die Glühwendel vor dem Hintergrund der strahlenden Fläche verscnwunden ist.
Zur Eichung des Pyrometer verwendet man einen schwarzen Körper mit bekannter Temperatur, denn bei diesem ist ja die Emission bei gleicher Temperatur am größten. Anschließend ordnet man die gemessenen Ströme den Temperaturen des schwarzen Körpers zu.

1 Stefan-Boltzmann Gesetz

Die Gesamtenergiedichte in einem von schwarzer Strahlung erfüllten Hohlraum, über alle Frequenzen integriert, entspricht der Fläche unter der Planckschen Kurve. Sie ist bis auf einen Faktor c identisch mit der spezifischen Ausstrahlung des schwarzen Körpers, das heißt mit der Energie, die ein m^2 seiner Oberfläche in den Hohlraum abstrahlt. Mittels (3) erhält man somit:

$$R = \frac{c}{4} \cdot \int_0^\infty \rho(\nu, T)\ d\nu \tag{4}$$

Setzt man (3) explizit ein, so erhält man

$$\begin{aligned} R &= \frac{c}{4} \cdot \int_0^\infty \rho(\nu, T)\ d\nu & (5)\\ &= \frac{2\pi}{c^2} \cdot \frac{k^4 \cdot T^4}{h^3} \cdot \int_0^\infty \left(\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}\right)^3 \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}} - 1}\ d\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T} & (6)\\ &= \frac{2\pi}{c^2} \cdot \frac{k^4 \cdot T^4}{h^3} \cdot \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1}\ dx & (7) \end{aligned}$$

Löst man noch das Integral und setzt die Konstanten ein, dann ergibt sich das *Stefan-Boltzmann Gesetz*:

$$R = \sigma \cdot T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot T^4 \tag{8}$$

Folglich ergibt sich für die Leistung, die eine Fläche A mit der Temperatur T in einen Halbraum abstrahlt:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \tag{9}$$

Der Proportionalitätsfaktor σ erhält den Namen Stefan-Boltzmann Konstante.
Da wir aber eingangs schon erwähnten, dass ein Körper immer auch Strahlung aufnimmt, also die aus der Umgebunsstrahlung stammende Leistung $P = \sigma \cdot A \cdot T_0^4$ aufnimmt (T_0 bezeichne die Umgebungstemperatur), ist die abgestrahlte Nettoleistung bei gleicher Fläche:

$$P = \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_0^4) \tag{10}$$

In dieser Aufgabe soll nun die Gültigkeit dieses Zusammenhangs verifiziert werden. Hierfür wird ein schwarzer Strahler aufgeheizt (darauf achten, dass der Stelltransformator für die Versorgung der Heizung anfangs noch nicht ganz aufgedreht wird), wobei seine Temperatur mittels eines eingebauten $PtRh - Pt$ Thermoelements und einem Millivoltmeter gemessen wird. Um die Strahlungsleistungen bei verschiedenen Temperaturen zu vergleichen, benutzt man eine Mollsche Thermosäule mit einem Millivoltmeter. Da sich die gesamte Strahlungsleistung aufgrund der Geometrie schwer messen lässt, beschränken wir uns darauf, die Propotionalität zur vierten Potenz der Temperatur zu zeigen. Hierfür wird nur die Strahlungsleistung gemessen, die durch eine Lochblende auf die Thermosäule fällt, wodurch eine Spannung an der Säule abfällt, die proportional zur Strahlungsleistung pro Fläche und somit auch zur gesamten Strahlungsleistung des schwarzen Strahlers ist. Es gilt also

$$U_{Thermo} \quad \propto \quad T^4 - T_0^4 \tag{11}$$

wobei T_0^4 konstant ist. Nun kann durch geeignete Wahl des Ursprungs die Proportionalität

$$U_{Thermo} \quad \propto \quad T^4 \tag{12}$$

leicht geprüft werden, es sollte ein linearer Zusammenhang bestehen. Da aber die vierte Potenz der Temperatur sehr schnell sehr große Werte erreichen wird, dürfte es für die Auswertung geschickter sein, wenn man $ln(U)$ über $ln(T)$ aufträgt und die Steigung m dieser Geraden bestimmt, aus der dann folgt, dass die Spannung proportional zu T^m ist.

Das gleiche Problem des schnellen Anstiegs von T^4 ergibt sich bei der Wahl der Messintervalle, weshalb wir nicht die Temperatur äquidistant messen sollten, sondern die Spannung. Wenn wir also n Messpunkte haben wollen, so müssen wir das Messintervall $[0, T_{max}]$ so einteilen, dass für die Schrittbreite ΔT_n gilt:

$$T_{max}^4 = n \cdot \Delta T_n^4 \tag{13}$$

Somit sollten wir für folgende Temperaturschritte äquidistante Spannungsschritte erhalten:

$$\Delta T_n = \frac{T_{max}}{\sqrt[4]{n}} \tag{14}$$

wobei n aus den natürlichen Zahlen gewählt sei.
Man achte beim Versuch darauf, dass die Thermosäule eine längere Einstellzeit hat (mehrere Sekunden) und dass die Wärmestrahlung in Messpausen abgeschirmt werden sollte, um ein Erwärmen der ganzen Thermosäule und der Lochblende zu vermeiden.

2 Emissionsvermögen verschiedener Flächen

Bei dieser Aufgabe wird der Aufbau mehr oder weniger beibehalten, man ersetzt lediglich den schwarzen Strahler durch einen Sektor einer herzbaren Scheibe mit verschiedenen Oberflächsektoren. Die Scheibe wird elektrisch geheizt und die Temperatur per befestigtem $NiCr - Ni$-Thermoelement und Millivoltmeter abgelesen. Das Ziel ist wieder die emittierte Strahlung zu messen, diesmal von verschiedenen Flächen in Abhängigkeit von ihrer Temperatur, um damit das Emissionsvermögen der einzelnen Flächen zu ermitteln. Aus (2) folgt direkt, dass bei isothermer Betrachtung das Emissionsverhalten proportional zum Absorptionsverhalten ist. Wir erwähnten schon, dass ein schwarzer Strahler bei gleicher Temperatur stärker strahlt als alle anderen Körper; wir können diesen Sachverhalt auch über folgende Relation beschreiben:

$$\Phi = \epsilon \cdot \Phi_s \tag{15}$$

Mit anderen Worten: der Strahlungsfluß des schwarzen Körpers Φ_s ist über den Faktor ϵ, dem sogenannten Emissionsvermögen, mit dem Strahlungsfluß deines anderen Körpers gleicher Temperatur verbunden. Wir haben in der vorangegangen Aufgabe schon erläutert, dass die Strahlungsleistung proportional zur Heizspannung ist. Um nun also das Emissionsvermögen zu bestimmen, nutzen wir aus, dass gilt:

$$P_{schwarzerKoerper} = \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_0^4) \tag{16}$$
$$P_{Sektorenscheibe} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_0^4) \tag{17}$$

Und mittels der Spannungsproportionalität gilt für das Emissionsvermögen:

$$\epsilon = \frac{U_{Sektorenscheibe}}{U_{schwarzerKoerper}} \tag{18}$$

Um den Strahlungsfluss zu maximieren, sollte darauf geachtet werden, dass Strahler und Lochblende nah beieinander sind.

3 Bestimmung der wahren Glühlampentemperatur

Eingangs wurde die Funktionsweise des Pyrometers und seine Eichung an einem schwarzen Körper beschrieben. Nun ist aber nicht jeder Körper ein schwarzer Körper, was zur Folge hat, dass die eigentliche Temperatur des Körpers höher als die angezeigte Temperatur ist (denn der Körper strahlt weniger, wenn er kein schwarzer Körper ist; somit muss er um die gleiche Strahlungsleistung wie ein schwarzer Körper abzustrahlen, heißer sein). Die Temperatur, die die Körper wirklich hat, nennt man die *wahre Temperatur*, entsprechend ist die am Pyrometer gemessene Temperatur seine sog. *schwarze Temperatur* T'. Um nun die Temperaturen ineinander umzurechnen, benötigen wir Angaben wie die Materialart, die Beobachtunswellenlänge und die Temperatur. Dann ergibt sich nämlich aus (3) durch logarithmieren:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} = \frac{k}{h \cdot c} \cdot \lambda \cdot ln(\epsilon) \tag{19}$$

wobei ϵ der Emissionskoeffizient ist. Diese Betrachtung soll aber nicht fortgesetzt werden, da die Eichkurve bereits in der Vorbereitungsmappe gegeben ist.
Es soll im folgenden die wahre Temperatur einer Glühlampe in Abhängigkeit vom Lampenstrom ermittelt werden. Wir messen nun zunächst, wie eingangs beschrieben, pyrometrisch die schwarze Temperatur des Körpers in Abhängigkeit vom Strom (Eichkurve). Danach wird die Temperaturdifferenz $T_w - T_s$ bestimmt, wodurch sich die wahre Temperatur T_w des Wolframdrahts als Summe von schwarzer Temperatur und eben genannter Temperaturdifferenz ergibt (s.Eichkurve im Aufgabenblatt). Nocheinmal das Vorgehen zusammengefasst:

- Glühlampenstrom einstellen
- Pyrometerlampenstrom einstellen, bis gleiche Helligkeit erreicht ist
- Bestimmung der schwarzen Temperatur aus Eichkurve mit Heizstrom
- Korrekturbestimmung aus Eichkurve $\Rightarrow$ Summe ergibt wahre Temperatur