Physikalisches Praktikum für Anfänger - Teil 1
Gruppe 2 - Wärmelehre

2.6 Temperaturstrahlung

1 Grundlagen

Die Oberfläche eines Körpers wird *schwarz* genannt, wenn alle einfallende elektromagnetische Strahlung absorbiert wird, das Reflexionsvermögen also Null ist. Hat der Körper die Temperatur T, so strahlt er seinerseits elektromagnetische Strahlung ab. Die Strahlungsenergie ΔE, die von der Fläche ΔF im Wellenlängenbereich $\Delta\lambda$ in der Zeit Δt unter dem Winkel $\Delta\Theta$ in den Raumwinkel $\Delta\Omega$ abgestrahlt wird, ist nach Planck durch

$$\Delta E = B_\lambda(T) \cdot \Delta F \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta t \cdot \cos\Theta \cdot \Delta\Omega \tag{1}$$

gegeben. $B_\lambda(T)$ ist hierbei die *Kirchhoff-Planck-Funktion* und hat die Form

$$B_\lambda(T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h \cdot c/\lambda}{k \cdot T}\right) - 1}, \tag{2}$$

wobei h das Plancksche Wirkungsquantum, k die Boltzmannkonstante und c die Vakuumlichtgeschwindigkeit sind. Ein Körper dessen Strahlung durch (1) beschrieben wird heißt *schwarzer Strahler*. Die Energie, die von der Fläche F eines schwarzen Körpers pro Sekunde in den Halbraum abgestrahlt wird, ergibt sich aus Gleichung (1) durch Integration über F, λ und Ω zu:

$$P = \Delta E / \Delta t = \sigma \cdot F \cdot T^4. \tag{3}$$

Diese Beziehung heißt *Stefan-Boltzmannsches Strahlungsgesetz*. Die Stefan-Boltzmann-Konstante σ hat den Wert

$$\sigma = 2\pi^5 k^4 / \left(15 c^2 h^3\right) = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\,(\mathrm{W/m^2\,K^4}). \tag{4}$$

Im ersten Teilen dieses Versuches soll das Stefan-Boltzmannsche Gesetz überprüft werden; im zweiten Teil wird die Temperatur einer Glühwendel mit Hilfe eines Strahlungspyrometers bestimmt.

Anmerkung: Den Winkel α zwischen zwei Geraden in der Ebene kann man wie folgt messen und damit auch definieren: Man schlage um ihren Schnittpunkt einen Kreis mit beliebigem Radius und messe den Bogen des Kreiabschnittes zwischen den Geraden. Als Winkel ist nun der Quotient von Bogen zu Radius definiert. Der so definierte Winkel kann Werte zwischen 0 und 2π annehmen und hat die Einheit 1, die auch als *Radiant* (rad) bezeichnet wird. Das Analogon in drei Dimensionen stellt der Raumwinkel dar. Zur Messung eines Raumwinkels (z.B. der sichtbaren Mondscheibe), wird um den Beobachter eine Kugel mit beliebigem Radius geschlagen und das Objekt auf diese Kugel projiziert. Der Raumwinkel ist definiert als die von der Projektion bedeckte Fläche dividiert durch das Quadrat des Radius. Die Einheit des Raumwinkels, dessen Wert zwischen 0 und 4π liegt, ist wieder 1 und wird als *Steradiant* (sr) bezeichnet.

2 Aufbau und Durchführung

2.1 Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz

In diesem Versuchteil ist die Proportionalität der von einer Fläche F eines schwarzen Strahlers abgestrahlten Leistung zur vierten Potenz der Temperatur des Strahlers zu untersuchen. Der schwarze Strahler wird durch

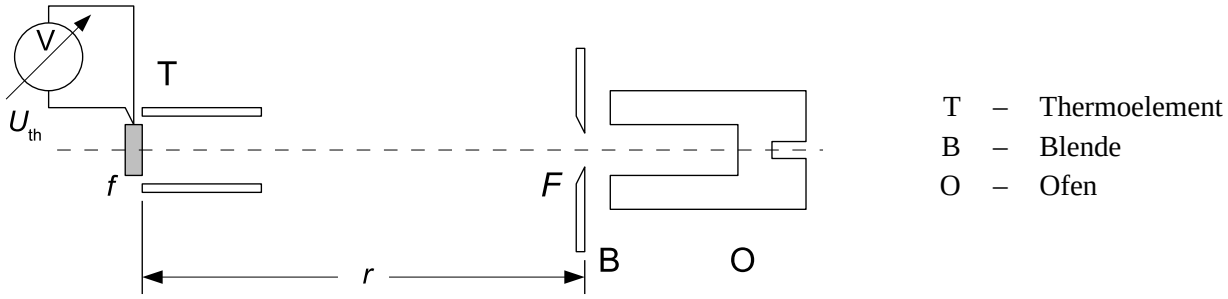


Abbildung 1: Versuchsaufbau zum Stefan-Boltzmannschen Gesetz

einen elektrischen Ofen, der eine Lochblende der Fläche F beleuchtet, nachgebildet. Da der Ofen wegen seines Aufbaus in erster Näherung als schwarzer Strahler betrachtet werden kann, stellt auch die Fläche der Lochblende einen schwarzen Strahler dar (Huygenssches Prinzip). Die Temperatur T des Ofens kann an einem Thermometer abgelesen werden.
Ein Teil der von F abgegebene Leistung trifft im Abstand $r = 30\,\text{cm}$ ein Strahlungsthermoelement. Eine der beiden Lötstellen des Thermoelementes ist der Strahlung des Ofens ausgesetzt und erwärmt sich durch die vom Strahler empfangenen Leistung P_1 und der von der Umgebung zugestrahlten Leistung P_2. Die Emission des schwarzen Strahlers erfolgt in der Richtung $\Theta = 0$ in einen kleinen Raumwinkel $\Delta\Omega$. Damit ergibt sich aus Gleichung (1) mit $\Delta\Omega = f/r^2$ nach Integration über die Wellenlänge

$$P_1 = \frac{\sigma}{\pi} \cdot T^4 \cdot F \cdot \Delta\Omega = \frac{\sigma}{\pi} \cdot \frac{f}{r^2} \cdot F \cdot T^4 \,. \tag{5}$$

Für die aus der Umgebung (Halbkugel, ausgenommen der Fläche F), zugestrahlte Leistung P_2 gilt nach Gleichung (3)

$$P_2 = \sigma \cdot f \cdot T_0^4 - \frac{\sigma}{\pi} \cdot \frac{f}{r^2} \cdot F \cdot T_0^4 \,, \tag{6}$$

wobei T_0 die Zimmertemperatur ist. Die Referenzlötstelle befindet sich ebenfalls auf Zimmertemperatur und ist der Strahlungsleistung

$$P_3 = \sigma \cdot f \cdot T_0^4 \,, \tag{7}$$

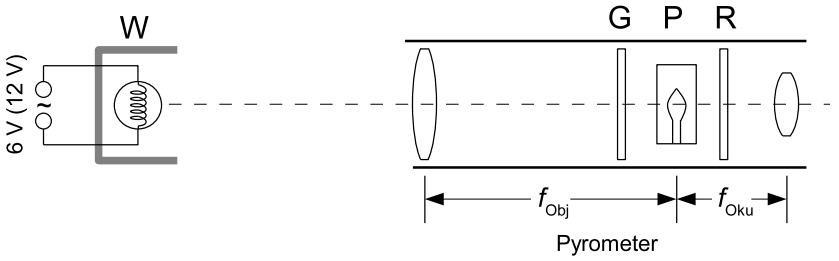
ausgesetzt. Die für die resultierende Thermospannung U_{th} maßgebliche Leistung P ist also

$$P = P_1 + P_2 - P_3 = \frac{\sigma}{\pi} \cdot \frac{F \cdot f}{r^2} \cdot \left(T^4 - T_0^4\right) . \tag{8}$$

Durch die Bauart des Strahlungsthermoelementes ist die abgegebene Thermospannung U_{th} in erster Näherung proportional zu P. Sie ist an einem mV-Meter abzulesen. Damit sich die Blende nicht erhitzt, wird sie wie der gesamte Strahlengang mit Wasser gekühlt.

Aufgaben:

1. Erhöhen Sie die Temperatur T des Ofens langsam von Zimmertemperatur auf 230 °C (maximal 250 °C) und messen Sie dabei alle 10 bis 20 Grad die Spannung U_{th}.
2. Tragen Sie U_{th} über $T^4 - T_0^4$ auf und verifizieren Sie anhand Ihrer Grafik das Stefan-Boltzmannsche Gesetz.



W – Glühbirne mit Wolframfaden
G – Graufilter
P – Pyrometerlampe
R – Rotfilter

Abbildung 2: Versuchsaufbau zum Stefan-Boltzmannschen Gesetz

2.2 Temperaturmessung einer Glühwendel

In diesem Teil des Versuches soll die Temperatur einer Glühwendel mit einem Strahlungspyrometer bestimmt werden. Nach dem Planckschen Gesetz (2) ist die Intensität der Wärmestrahlung für eine feste Wellenlänge nur von der Temperatur abhängig. Diesen Umstand benutzt man zur Temperaturmessung von strahlenden Oberflächen und Körpern, indem man die Strahlungsleistung in einem engen Wellenlängenbereich mit einem Vergleichsstrahler bekannter Temperatur oder geeichter Emission ins Verhältnis setzt.
Hier wird zum Vergleich der Strahlungsleistungen ein visuelles Strahlungspyrometer verwendet, das bei einer Wellenlänge von $655,0\,\mathrm{nm}$ arbeitet. Es besteht aus einem Fernrohr mit eingebauter Pyrometerlampe. Die leuchtende Fläche wird durch das Fernrohrobjektiv in die Ebene abgebildet in der sich der Glühfaden der Pyrometerbirne befindet. Zur Temperaturmessung beobachtet man durch ein Okular mit Rotfilter den in das Objekt eingebetteten Glühfaden und variiert dessen Temperatur solange, bis er sich vom Objekt nicht mehr abhebt. In diesem Fall liegt gleiche Emission vor und man kann aus dem Strom, der durch die Pyrometerbirne fließt auf die Temperatur des Objektes schließen.
Ist das untersuchte Objekt ein schwarzer Strahler, so ist die mit dem Pyrometer gemessene Temperatur direkt die Temperatur des Strahlers. Oberflächenstrahler haben jedoch eine Temperaturstrahlung, die unter der des schwarzen Strahlers liegt, d.h.

$$E_\lambda(T) < B_\lambda(T) \qquad \text{bzw.} \qquad E_\lambda(T) = \varepsilon(\lambda,T)\cdot B_\lambda(T)\,, \tag{9}$$

wodurch das Emissionsvermögen $\varepsilon(\lambda,T)$ definiert ist. Es ist für die Oberfläche spezifisch und hängt von Temperatur und Wellenlänge ab. Ist es von der Wellenlänge unabhängig, so spricht man von einem *grauen Strahler*. Beobachtet man mit einem visuellen Strahlungspyrometer einen nicht-schwarzen Strahler, so erhält man zunächst seine „schwarze Temperatur“ T_s, d.h. die Temperatur, die ein schwarzer Körper haben müsste, um bei der Beobachtungswellenlänge die gleiche Emission zu zeigen. Mit ihrer Definition hat man:

$$B_\lambda(T_\mathrm{s}) = E_\lambda(T) = \varepsilon(\lambda,T)\cdot B_\lambda(T) \tag{10}$$

Vernachlässigt man im Planckschen Gesetz die 1 gegenüber der Exponentialfunktion, was wegen $h\cdot c/(\lambda\cdot k\cdot T) > 1$ im vorliegenden Temperaturbereich erlaubt ist, so erhält man aus Gleichung (10):

$$\ln\varepsilon = \frac{h\cdot c}{\lambda\cdot k}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_\mathrm{s}}\right). \tag{11}$$

Wenn die Temperaturabhängigkeit des Emissionsvermögens bei der Beobachtungswellenlänge bekannt ist, lässt sich T iterativ aus dieser Gleichung ermitteln.

Aufgaben:

1. Messen Sie bei den Betriebsspannungen 6 V- und 12 V jeweils mehrmals die Temperatur T_s der Glühwendel. Es ist darauf zu achten, dass während der Messung der Graufilter zwischen Pyrometerobjektiv und Pyrometerlampe geschaltet ist (Blendgefahr!). Lesen Sie T_s an der entsprechenden Temperaturskala des Pyrometers ab.
2. Bestimmen Sie Mittelwerte und Standardabweichungen für alle Messwerte T_s. Ermitteln Sie hieraus die Werte $T_{s,min}$ und $T_{s,max}$.
3. Bestimmen Sie mit Hilfe der Gleichungen (10) und (11) iterativ die wahre Temperatur der Glühwendel. Die ε-Werte sind Abbildung 3 zu entnehmen.

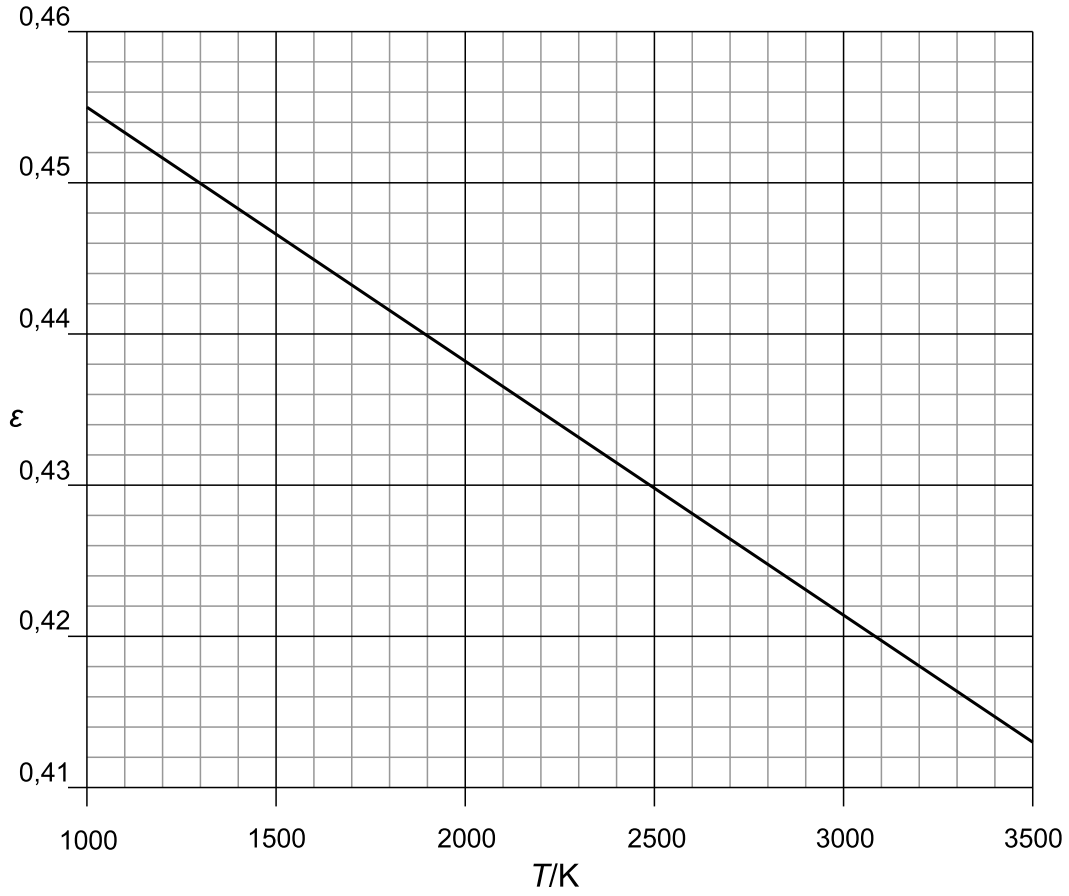


Abbildung 3: Emissionsvermögen $\varepsilon(T)$ von Wolfram bei $\lambda = 655,0\,\text{nm}$

Literatur: Gehrtsen Physik: Kap. 11.2.

9.2010/Ra