Schwarze Strahlung (A2)

Ziel des Versuches

Die Intensität der Strahlung eines schwarzen (grauen) Körpers soll im sichtbaren Bereich bei verschiedenen Wellenlängen und Temperaturen bestimmt werden.

Theoretischer Hintergrund

Ein idealer schwarzer Körper ist definiert als ein Objekt, das alle auf ihn fallende Strahlung vollständig absorbiert. Ein solcher Körper zeigt also keinerlei Reflexion, kann jedoch Strahlung emittieren. Die spektrale Verteilung L_ν^S der emittierten elektromagnetischen Wellen genügt dem planckschen Strahlungsgesetz (siehe Abb. 1):

$$L_\nu^\mathrm{S} = \frac{2h\nu^3}{c^2}\frac{1}{\mathrm{e}^{h\nu/kT}-1} \quad . \tag{1}$$

Dabei ist L_ν^S die pro Fläche des schwarzen Strahlers (S) im Frequenzintervall dν im Raumwinkel dΩ abgestrahlte Leistung P:[1]

$$L_\nu^\mathrm{S} = \frac{\mathrm{d}^3 P}{\mathrm{d}\Omega\ \mathrm{d}A\ \mathrm{d}\nu} \quad . \tag{2}$$

[1] c =Vakuumlichtgeschwindigkeit, k =Boltzmannkonstante, h =plancksches Wirkungsquantum

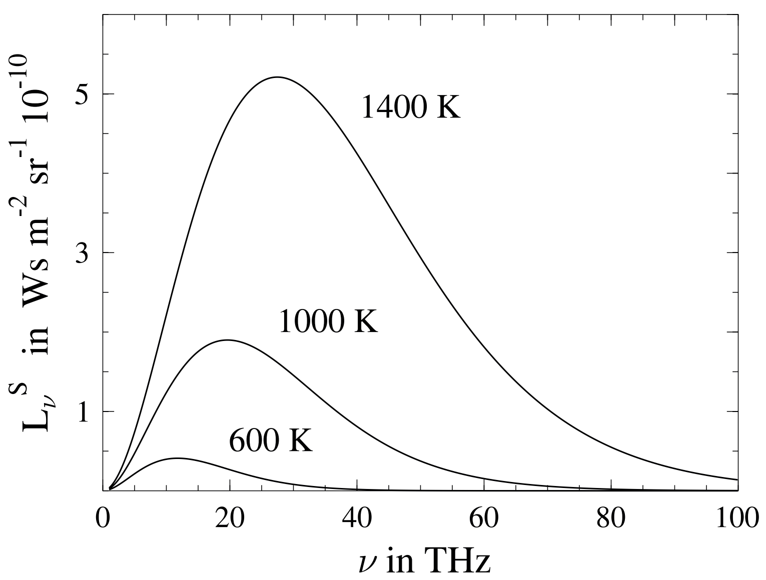

Abbildung 1: Spektrale Intensitätsverteilung des schwarzen Körpers.

Reale Strahler (R) gehorchen dem Strahlungsgesetz in Gl. (1) nur näherungsweise. Die Abweichung vom idealen schwarzen Strahler kann durch den Emissionskoeffizienten $\varepsilon(\nu, T)$ beschrieben werden:

$$L_\nu^{\mathrm{R}} = \varepsilon(\nu, T) L_\nu^{\mathrm{S}} \quad . \tag{3}$$

Ist ε unabhängig von der Frequenz, handelt es sich um einen grauen Strahler. Ein Beispiel dafür sind Glühlampen aus Wolfram im Bereich des sichtbaren Lichtes.

Für die technisch möglichen Temperaturen einer Glühlampe ist $\frac{h\nu}{kT} \gg 1$. In diesem Fall kann mit der wienschen Näherung (W) gearbeitet werden, bei der der Exponentialterm der Bose-Einstein-Statistik durch den klassischen Boltzmann-Faktor ersetzt wird. Unter Berücksichtigung der Eigenschaft des grauen Strahlers ergibt sich:

$$L_\nu^{\mathrm{W}} = \frac{2\varepsilon h \nu^3}{c^2} \mathrm{e}^{-h\nu/kT} \quad . \tag{4}$$

Bisher wurden nur spektrale Strahlungsverteilungen betrachtet. Die Integration dieser Verteilungen über alle Frequenzen und über einen Halbraum ergibt die Leistung, die ein Körper pro Fläche abstrahlt. Sie ist eine Funktion der Temperatur und wird für den schwarzen Strahler durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben:

$$\int_\nu L_\nu^{\mathrm{R}} \,\mathrm{d}\nu = \sigma T^4 \quad . \tag{5}$$

Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Bestimmung von L_ν^{W} wird der in Abb. 2 dargestellte Aufbau verwendet. Die Wellenlänge wird mit Interferenzfiltern (λ = 404 nm, 492 nm, 589 nm) selektiert. Die Irisblenden B dienen zur Unterdrückung des unerwünschten Streulichtes.

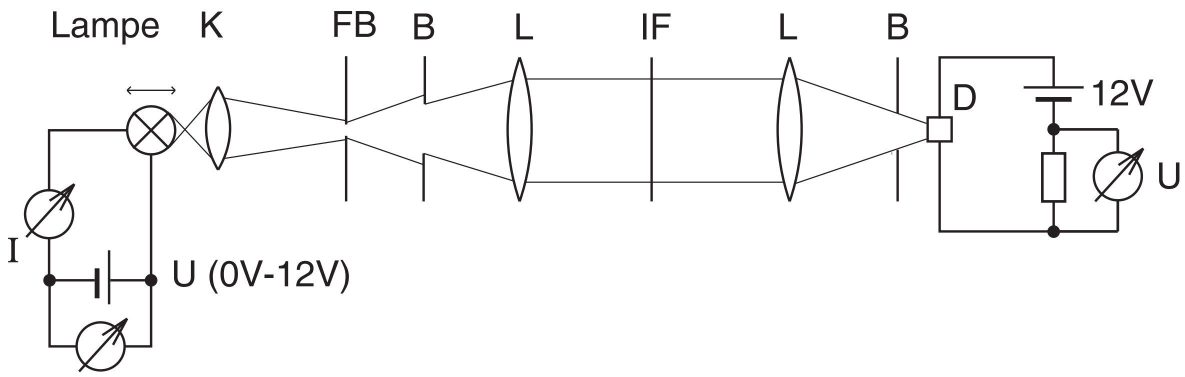

Abbildung 2: Aufbau zur Messung der Intensität eines grauen Strahlers.

Um möglichst viel Licht auf die Photodiode fokussieren zu können, muss eine Justage der Optik vorgenommen werden. Um eine punktförmige Lichtquelle zu erhalten, wird mit einer sogenannten Zwischenabbildung gearbeitet. Justieren Sie hierfür das System aus Glühwendel, Kondensorlinse (K) und erster Festblende (FB) so, dass Sie eine möglichst hohe Ausleuchtung der FB erreichen. Der Abstand der Lampe zur Kondensorlinse (K) kann mit der verschiebbaren Stange am Lampengehäuse verändert werden.[2] Über die Linse L kann nun ein paralleles Strahlenbündel erzeugt werden (Kontrolle in einigen Metern Entfernung), das für die richtige Funktion der Interferenzfilter notwendig ist (Warum?). Das Strahlenbündel kann mit einer Irisblende, die vor oder hinter der Linse L stehen kann, auf den Durchmesser des Interferenzfilters begrenzt werden. Mit einer zweiten Linse wird dann das Strahlenbündel auf die Photodiode fokussiert, so dass diese gut ausgeleuchtet ist. Danach wird die zweite Irisblende direkt vor die Diode gestellt, um den größten Teil des Raumlichtes auszublenden. Die Blende wird so eingestellt, dass die Photodiode, die eine der Intensität des auffallenden Lichtes proportionale Photospannung U_D liefert, gerade voll ausgeleuchtet ist. Zum Schluss wird der gewünschte Interferenzfilter in den Strahlengang gesetzt.

[2] Welcher Effekt tritt hierbei im Vergleich zu einer planaren Lichtquelle auf? Inwiefern ist dieser Effekt vernachlässigbar?

Die Temperatur T der Glühwendel wird mit Hilfe der regelbaren Stromversorgung verändert. Dabei werden an der Lampe sowohl der Strom I als auch die Spannung U gemessen, um die Aufnahmeleistung P nach

$$P = U \cdot I \tag{6}$$

bestimmen zu können. Bei Betrieb der Lampe stellt sich T gerade so ein, dass die abgestrahlte Leistung der Aufnahmeleistung entspricht. Da für erstere das Stefan-Boltzmann-Gesetz gilt (Gl. (5)), ist die Temperatur T somit proportional zur vierten Wurzel aus P:

$$T = a \cdot P^{1/4} \quad . \tag{7}$$

Bei den verschiedenen Wellenlängen wird nun die Lichtintensität in Abhängigkeit von der Aufnahmeleistung und damit von der Temperatur bestimmt. Mit diesen Daten soll das wiensche Gesetz in Gl. (4) überprüft werden.

Aufgabenstellung

1. Nehmen Sie die Photospannung U_D für $\lambda = 404\,\mathrm{nm}$, 492 nm und 589 nm als Funktion der Aufnahmeleistung P der Lichtquelle auf und tragen Sie U_D logarithmisch gegen $P^{-1/4}$ auf. Bestimmen Sie die Steigung der Geraden für die drei Wellenlängen und zeigen Sie, dass diese proportional zu ν bzw. umgekehrt proportional zu λ ist.

2. Bestimmen Sie aus den Steigungen der Geraden den Faktor a für die Umrechnung der Leistung auf die Temperatur (Gl. (7)). Stellen sie dazu den Exponentialfaktor in Gl. (4) als Funktion der Leistung anstelle der Temperatur dar und überlegen Sie, wie a mit den Geradensteigungen zusammenhängt.

3. Berechnen Sie für eine Wellenlänge die Temperatur der Glühwendel für die jeweiligen eingestellten Leistungen.

4. Stellen Sie für diese Wellenlänge und dem verwendeten Temperaturbereich der Glühwendel die abgestrahlte Leistung (Gl. 4) mit Hilfe eines selbstgeschriebenen Programmes (Scriptes) grafisch dar[3] und vergleichen Sie die theoretische mit der gemessenen Kurve. Dazu müssen sowohl die gemessenen Intensitäten als auch die berechnete, abgestrahlte Leistung für eine gemeinsame Temperatur auf eins normiert werden.

[3] z. B. Python, gnuplot, Matlab etc.

5. Diskutieren Sie eventuelle Abweichungen zwischen Theorie und Experiment.

Hinweise zur Auswertung:

$$U_{\mathrm{D}} \sim L_\nu^{\mathrm{W}} = B\nu^3 \exp\left(-h\nu/kT\right) = B\nu^3 \exp\left(-\frac{h\nu}{kaP^{1/4}}\right)$$

$$\ln U_{\mathrm{D}} \sim \ln B + 3\ln\nu - \frac{h\nu}{ka}\,P^{-1/4}$$