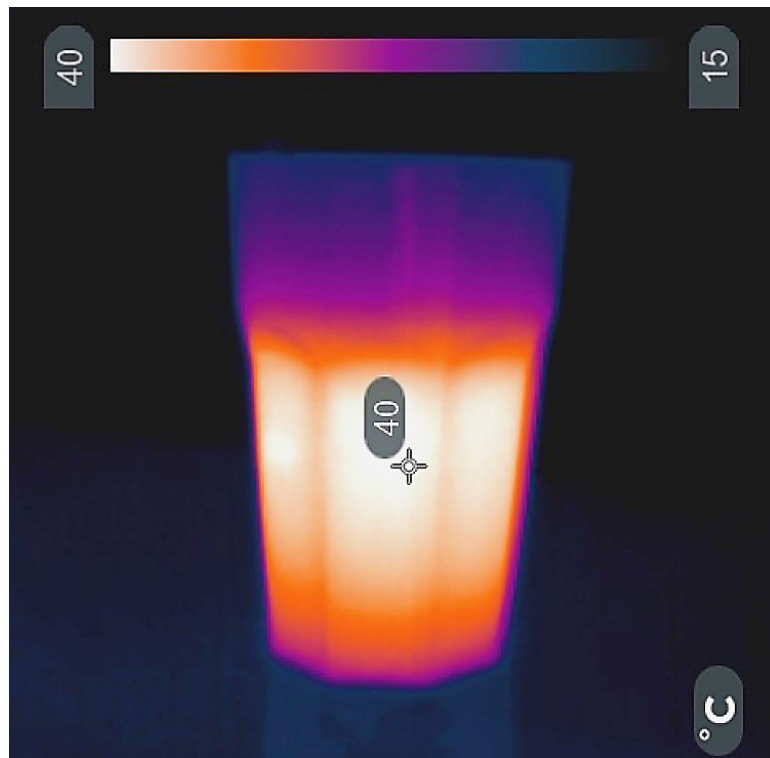


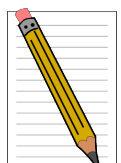


Plancksche Strahlung

In diesem Versuch untersuchen Sie die Plancksche Strahlung (=Wärmestrahlung = Temperaturstrahlung). Alle Körper, auch kalte, senden diese elektromagnetische Strahlung aus. Sie wird von der ständigen, ungeordneten Bewegung der Atome und Moleküle erzeugt. Sie ist daher stark von der Temperatur der Körper abhängig. Bei Zimmertemperatur wird nur Strahlung im Infrarotbereich erzeugt. Sie ist für menschliche Augen unsichtbar. Erst ab etwa 850 K wird auch sichtbares, dunkelrotes Licht abgestrahlt. Bei 1370 K sehen wir Gelbglut und ab etwa 1570 K strahlen die Körper weiß.

Schriftliche VORbereitung:

- Erklären Sie die Begriffe: Strahlungsgleichgewicht und Emissionsgrad.
- Das Sonnenlicht lässt sich mit einem Prisma in Spektralfarben zerlegen (Regenbogenfarben). Wie könnte man hinter dem Prisma auch die unsichtbare Temperaturstrahlung der Sonne beobachten?
- Bei Zimmertemperatur, $T = 300 \text{ K}$, strahlt ein schwarzer Körper mit der Fläche 1 m^2 die Leistung $P_{300} = \dots \text{ W}$ ab. Jede dunkle, raue Oberfläche (1 m^2) in unserer Umgebung strahlt und empfängt in etwa diese Leistung. Warum fühlen wir das nicht?
- Das Falschfarbenbild einer Wärmebildkamera, wie Abb. 1, ist trügerisch. Warum sind die angegebenen Temperaturen eventuell mit großen systematischen Unsicherheiten behaftet?
- Die Temperatur wird im Versuch mit einem Infrarot-Sensor gemessen. Solch ein Sensor besteht aus vielen, hintereinander geschalteten Thermoelementen. Wie funktionieren Thermoelemente, welche Temperaturdifferenz zeigen sie als Spannung an und wie wird diese Spannung erzeugt?



1 Grundlagen

Plancksches Strahlungsgesetz. Das Plancksche Strahlungsgesetz beschreibt die spektrale Energiedichte eines schwarzen Körpers, $U(f, T)df$. Es kann also die Frage beantworten, wieviel Energie in einem Frequenz- bzw. Wellenlängenbereich von einem schwarzen Körper emittiert wird. Bereits aus der Einleitung ist deutlich, dass die spektrale Energiedichte temperaturabhängig ist. Die Eckpunkte der Herleitung des Gesetzes sollen hier skizziert werden.

Ausgangspunkt ist ein Hohlraumwürfel mit Kantenlänge L , dessen Wände ideale schwarze Strahler sind. Nimmt man die Wände als elektrisch leitend an, ergibt sich als Resonanzbedingung für stehende Wellen, dass ein Knoten der stehenden Welle an den Wänden auftritt. Die möglichen stehenden Wellen bezeichnet man als Moden des Strahlungsfeldes. Ihnen wird die Energie $E_{Ph} = hf$ zugeordnet, die Zu- und Abfuhr von Energie zu einer Mode kann nur in ganzzahligen Vielfachen dieser Energiequanten erfolgen: Dieser Gedankengang gilt historisch als die Geburtsstunde des Photons. Zwei Fragen leiten zur spektralen Energiedichte. Erstens, wie viele Moden gibt es in einem Frequenzbereich $f + df$? Diese werden durch $g(f)df$ beschrieben. Zweitens, wie hoch ist die Besetzungszahl der jeweiligen Moden im thermodynamischen Mittel, $n(f, T)$.

Die Resonanzbedingung für die drei Dimensionen des Würfels führt dazu, dass alle Moden gleicher Frequenz auf dem Teil einer Kugelfläche liegen, hieraus kann man folgern, dass die Anzahl der Moden im Frequenzbereich $f + df$ proportional zum Quadrat der Frequenz f^2 ist. Insgesamt berechnet sich die Anzahl der Moden im Frequenzbereiche $f + df$ zu:

$$g(f)df = \frac{8\pi \cdot L^3}{c^3} f^2 df$$

Die Frage nach der Besetzungszahl beantwortet die Bose-Einstein-Verteilung. Es ist:

$$n(f, T) = \frac{1}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1},$$

mit der Boltzmannkonstante k_B die Verteilung ist von der Temperatur T abhängig.

Die spektrale Energiedichte ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} U(f, T)df &= E_{Ph} n(f, T) g(f)df \frac{1}{L^3} \\ &= \frac{8\pi f^3 h}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1} df. \end{aligned} \quad (1)$$

Gleichung (1) beschreibt das Plancksche Strahlungsgesetz. Mit $f = \frac{c}{\lambda}$ folgt $\left|\frac{df}{d\lambda}\right| = \frac{c}{\lambda^2}$ und schließlich die Wellenlängendarstellung des Gesetzes:

$$U(\lambda, T)d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} d\lambda.$$

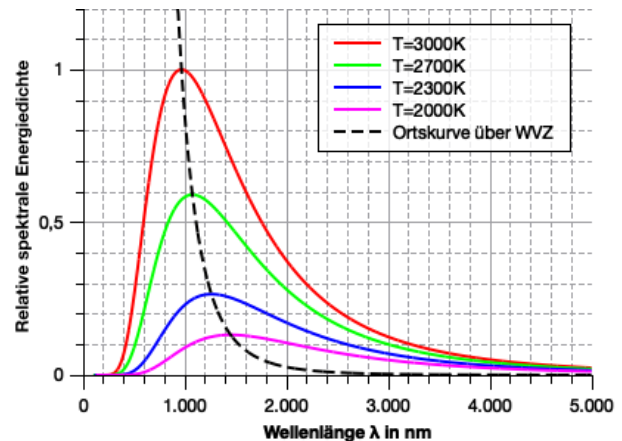


Abb. 1: Dargestellt sind die spektralen Energiedichten im Hohlraum für $T = 3000\text{ K}$, 2700 K , 2300 K und 2000 K sowie die Ortskurve der Emissionsmaxima welche sich aus dem Wienschen Verschiebungsgesetz (WVG) ergibt.

Wiensches Verschiebungsgesetz. Das Wiensche Verschiebungsgesetz beschreibt die Veränderung des Maximums der spektralen Energiedichte bei Variation der Temperatur. Je größer die Temperatur desto kürzer ist die Wellenlänge $\lambda_{\max}$ bei der die maximale Energie emittiert wird:

$$\lambda_{\max} = \frac{2897.8 \mu\text{m}}{T} \quad (2)$$

Die Temperatur T ist in Kelvin gegeben.

Stefan-Boltzmann-Gesetz. Die von einer Fläche A (in m^2) mit der Temperatur T (in Kelvin) abgestrahlte Leistung P (in Watt) wird durch das STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz beschrieben:

$$P = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4.$$

(Stefan-Boltzmann-Konstante)

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

Der Emissionsgrad ϵ ist eine dimensionslose Größe zwischen 0 und 1, die vom Material und von der Oberflächenbeschaffenheit des strahlenden Körpers abhängt. In der Regel emittieren dunkle Flächen gleicher Temperatur mehr Strahlung als helle. Ein idealer schwarzer Strahler besitzt den Emissionsgrad $\epsilon = 1$. Das Gesetz ergibt sich auch aus der Integration des Strahlungsgesetzes über alle Frequenzen und dem Halbraum in dem die schwarze Fläche abstrahlt.

Hat ein Körper die *gleiche* Temperatur wie seine Umgebung, so wird er weder wärmer noch kälter. Die von ihm absorbierte Strahlungsleistung ist in diesem Fall gleich seiner emittierten Strahlungsleistung. **Strahlungsgleichgewicht:** Im thermischen Gleichgewicht wird effektiv keine Temperaturstrahlung abgegeben:

$$P_{\text{netto}} = P_{\text{ab}} - P_{\text{zu}} = 0.$$

Hat ein Körper eine höhere Temperatur T als seine Umgebung (T_U), so strahlt er mehr ab als er aus der Umgebung absorbiert. Ausschlaggebend ist dafür der Unterschied zwischen den Temperaturen T und T_U :

$$P_{\text{netto}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A(T^4 - T_U^4).$$

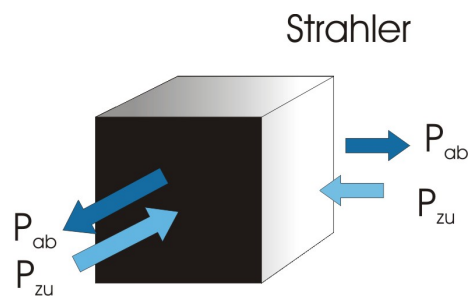


Abb. 2: Im thermischen Gleichgewicht ist die abgegebene Strahlungsleistung gleich der aufgenommenen Strahlungsleistung.

2 Experimente

Die Strahlungsintensität bei niedrigen Temperaturen

Als Temperaturstrahler wird ein Leslie-Würfel mit vier unterschiedlichen Oberflächen benutzt. Er wird im Inneren von einer Glühlampe aufgeheizt und seine Oberflächentemperatur mit einem Thermoelement ermittelt. Wird die Temperatur des Leslie-Würfels größer als die der Raumtemperatur, so steigt die Emission seiner elektro-magnetischen Strahlung an. Diese erzeugt im Infrarotsensor eine Spannung im Millivoltbereich, welche proportional zur Strahlungsintensität ist: $U_{\text{sensor}} \propto P_{\text{netto}}$.

Zwei Bitten:

1. Die Oberflächen des Leslie-Würfels auf keinen Fall berühren
2. und den Infrarotsensor immer nur kurzfristig betätigen.

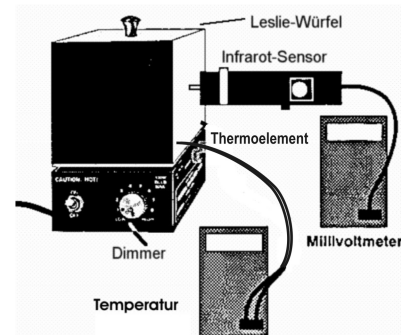


Abb. 3: Das Thermoelement misst die Temperatur des Leslie-Würfels, der Infrarot-Sensor seine Temperaturstrahlung

- (M1) Notieren Sie zuerst die Raumtemperatur T_0 und die Spannung U_0 am Infrarotsensor, um bei der Auswertung später die Differenz für die Messwerte bilden zu können. Erhöhen Sie die Temperatur des Strahlers schrittweise durch Einstellen der Solltemperatur T_{nominal} an der Vorderseite. Notieren Sie bei thermischem Gleichgewicht die Temperatur T_{actual} und die Sensorspannung U aller vier Oberflächen im gleichen Abstand in möglichst kurzer Zeit. Wiederholen Sie das Vorgehen für 5 weitere Temperaturen im Bereich zwischen Raumtemperatur und 100°C .
- (A1) Stellen Sie in einem Diagramm die Spannung $U - U_0 = f(T^4 - T_0^4)$ für alle vier Oberflächen dar. Was erkennen Sie in dieser Darstellung? Setzen Sie für die schwarze Fläche $\epsilon = 1$. Wie groß ist dann der Emissionsgrad bei den anderen drei Flächen (weiß, matt, poliert)?

Hinweis

Denken Sie bitte daran, die Temperatur T immer in Kelvin anzugeben: 0°C entsprechen 273.15 K .

Die Strahlungsintensität bei hohen Temperaturen

Im vorigen Versuch haben Sie untersucht, ob die Strahlungsintensität bis zu Temperaturen von etwa 400 K proportional zu T^4 ist. Geprüft werden soll nun, ob dieses Stefan-Boltzmann-Gesetz auch bei Temperaturen von 1000 K bis 3000 K noch gilt. Solch hohe Temperaturen werden in diesem Versuch im Glühfaden einer Lampe erreicht.

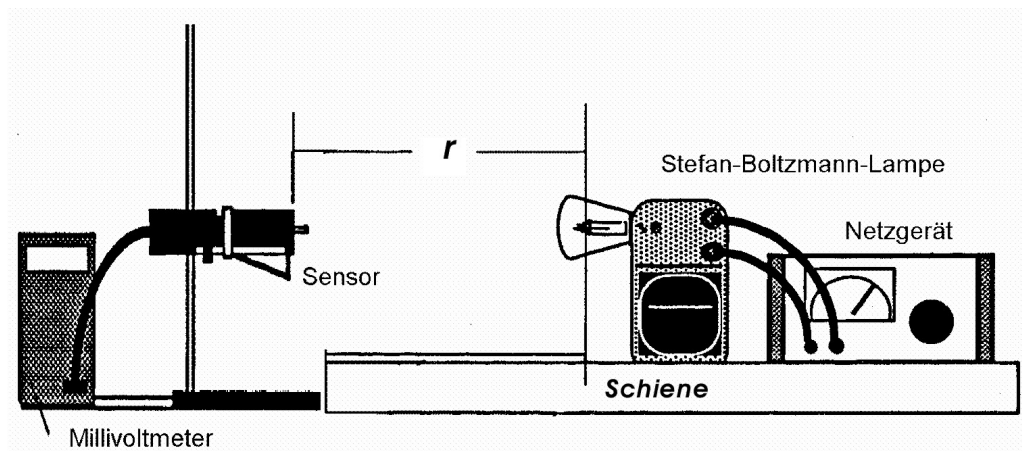


Abb. 4: Versuchsaufbau: Die Versorgungsspannung der Lampe und die Stromstärke können direkt am Netzgerät abgelesen werden

- (M2) Haben sich Raumtemperatur T_0 und Sensorspannung U_0 geändert?

- (M3) Stellen Sie die Spannung für die Lampe U_{Lampe} am Netzgerät ein. Notieren Sie Strom und Spannung der Lampe sowie die Spannung des Sensors für 7 Wertepaare. $U_{\text{Lampe}} < 13 \text{ V}$
- (A2) Ermitteln Sie die Temperatur des Glühfadens. Dazu wird zunächst für jede Einstellung der elektrische Widerstand R der Lampe berechnet: $R = U_{\text{Lampe}}/I_{\text{Lampe}}$. Die Temperatur des Glühfadens ergibt sich dann aus:

$$T = \frac{R - R_0}{\alpha \cdot R_0} + T_0$$

T = momentane Temperatur in Kelvin

R = Widerstand der Glühwendel bei der Temperatur T

T_0 , Raumtemperatur

R_0 , Widerstand der Glühwendel bei Raumtemperatur T_0 ist am Arbeitsplatz hinterlegt.

$\alpha = 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ Temperaturkoeffizient des Widerstandes der Glühwendel

- (A3) Stellen Sie die Spannung des Sensors ($U - U_0$) in Abhängigkeit von $(T^4 - T_0^4)$ graphisch dar.

Plancksches Strahlungsgesetz und das Wiensche Verschiebungsgesetz

In diesem Versuchsteil werden Sie das Wiensche Verschiebungsgesetz messen. Hierzu nehmen Sie das optische Spektrum der Stefan-Boltzmann-Lampe auf. Dieses kann durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben werden. Das Maximum der spektralen Leistungsdichte liegt allerdings außerhalb des Bereichs, der durch das optische Spektrometer untersucht werden kann. Sie arbeiten daher mit einem Fit und extrapolieren diesen um den Wert der maximalen Wellenlänge ermitteln zu können.

Die Spannung mit der die Stefan-Boltzmann-Lampe betrieben wird ist weiter kleiner als 13 V

- (M4) Öffnen Sie am Spektrometerarbeitsplatz die Software Spectra Suite. Betreiben Sie die Lampe mit 13 V. Regeln Sie über die Integrationszeit das angezeigte Spektrum so ein, dass das aufgenommene Maximum zwischen 80 % und 100 % der Anzeige liegt. Berechnen Sie die Temperatur aus dem Widerstand der Glühwendel. Stellen Sie die Temperatur in der Spectra Suite ein. Schalten Sie die Lampe aus. Schalten Sie das Spektrometer gegenüber der Deckenbeleuchtung ab. Nehmen Sie ein Dunkelspektrum auf. Schalten Sie die Lampe wieder bei 13 V ein. Stellen Sie die Anzeige auf relatives Spektrum. Das Spektrum hat sich nun deutlich verändert. Es zeigt den sichtbaren Bereich der spektralen Leistungsdichte. Der infrarote Bereich ist stark verrauscht: Erhöhen Sie die Runanzahl um über mehrere Spektren zu mitteln.
- (M5) Nehmen Sie U_{Lampe} , I_{Lampe} und die Spektren für vier Spannungen auf (Als Tab-getrennte Werte exportieren). Eine Spannung ist 13 V.
- (A4) Stellen Sie die Spektren in einem Diagramm dar.
- (A5) Führen Sie eine Fitanalyse auf der Grundlage $f(x) = a/(x^5 * (\exp(5b/x) - 1))$ für alle Spektren durch. Startwerte für a sind extrem groß. Probieren Sie $a = 10^{19}$ als Startwert. Warum wurde hier $5b$ und nicht b als Fitparameter gewählt, mathematische Bedeutung von b ?
- (A6) Extrapolieren Sie den Fit bis $5 \mu\text{m}$

- (A7) Ermitteln Sie $\lambda_{\max,i}$. Berechnen Sie aus den elektrischen Widerständen die Temperaturen T der Wendel. Können Sie mit einer Fitanalyse das Wiensche Verschiebungsgesetz Gl. (2) bestätigen?

Wärmebildkamera

Mit einer Wärmebildkamera können Sie die Wärmestrahlung als Falschfarbenbild darstellen. Die Kamera leitet zusätzlich auf der Grundlage des STEFAN-BOLTZMANN-Gesetzes eine Temperatur ab und zeigt diese an. Wesentlich für das Messverfahren ist also der Emissionsgrad. Dieser lässt sich in der Kamera voreinstellen.

- (M6) Verdeutlichen Sie mit Hilfe des Leslie-Würfels den Einfluss des Emissionsgrads auf die Temperaturmessung der Wärmebildkamera. Ein Bild aufnehmen.
- (A8) Erläutern Sie das aufgenommene Bild.

Absorption

Untersuchen Sie verschiedene Material bezüglich ihrer Transmission und Absorption von IR-Strahlung.

- (M7) Untersuchen Sie die Abschirmung von Wärmestrahlung mit Hilfe der Wärmebildkamera und des Infrarotsensors. Sie finden verschiedene Materialien am Arbeitsplatz.
- (M8) Nehmen Sie die Transmissionskoeffizienten $T = \frac{I_{\text{Absorber}}}{I_0}$ für Glas und PE-Folie im sichtbaren (Luxmeter) und infrarotem Spektralbereich (Infrarotsensor) auf. Dabei ist I_0 die gemessene Intensität ohne Absorber
- (A9) Beschreiben Sie das Absorptions- und Transmissionsverhalten von Glas und PE-Folie.

Untersuchung der Umwelt

Bei der Umwandlung oder dem Transport von Energie entstehen in der Realität Verluste. Es entsteht also eine Differenz zwischen der aufgewendeten Energie und der tatsächlich genutzten Energie. Diese Differenz wird meistens in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben, zum Beispiel Reibung oder Joulesche Wärme. Eine Wärmebildkamera eignet sich somit in besonderer Weise, um solche Verluste sichtbar zu machen.

- (M9) Fotografieren Sie mit der Wärmebildkamera einen Prozess bei dem Reibungsverluste sichtbar werden.
- (M10) Fotografieren Sie einen Prozess bei dem Joulesche Wärme einen Verlust darstellt.
- (A10) Erläutern Sie beide Bilder.

Literatur

[fileadmin/praktikumphysik/Zusatzmaterial/Crash_Messunsicherheit.pdf](#)

- [1] Scholz, R.(2014): *Analyse und Präsentation von Messdaten* Leibniz Universität Hannover, <https://www.praktikumphysik.uni-hannover.de/>

- [2] Demtröder
- [3] Gerthsen/Kneser/Vogel
- [4] Tipler

