

Plancksche Strahlung

Im 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 und 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 800 K wird auch sichtbares, dunkelrotes Licht abgestrahlt. Bei 1370 K sehen wir Gelbglut und ab etwa 1550 K strahlen die Körper weiß.

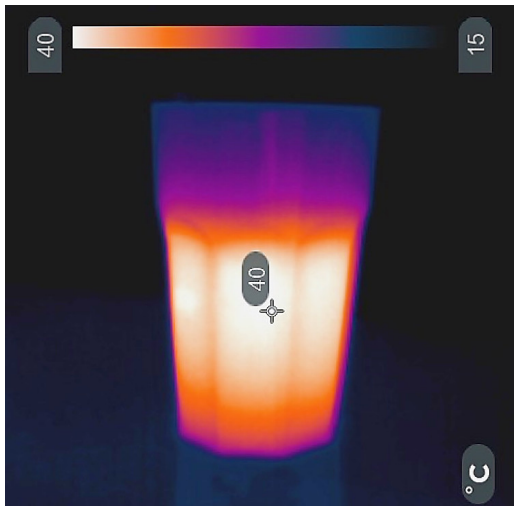


Abbildung 1: Temperaturstrahlung eines Heißgetränks; in den hellen und roten Bereichen wird viel Wärme abgestrahlt, in den dunklen und blauen Bereichen weniger. Die relative falschfarbenen Skala ist am oberen Bildrand aufgelöst ist.

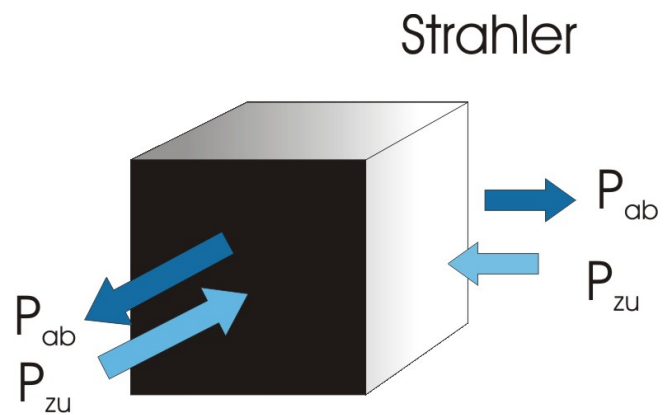
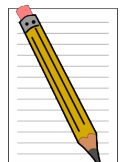


Abbildung 2: Dunkle, raue Körper absorbieren Plancksche Strahlung gut, deshalb emittieren sie auch gut - mehr als helle, glatte Körper

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? Was haben Lichtstrahlen und Temperaturstrahlen gemeinsam und worin unterscheiden sie sich?
- Die Fernbedienung eines Fernsehers sendet IR-Impulse aus, um z.B. die Lautstärke einzustellen. Können Sie die Impulse mit der Handykamera beobachten (Frontkamera)? Warum kann man diese IR-Strahlung mit Hilfe der Kamera sichtbar machen?
- Bei Zimmertemperatur, $T = 300$ 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

Mit der Temperatur ändert sich aber nicht nur die Farbe der Körper, sondern in besonderem Maße auch die Energie, die sie abstrahlen. Sie steigt mit der vierten Potenz der Temperatur. Etwas genauer: 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 $\epsilon = 1$.

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 :

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

2 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.

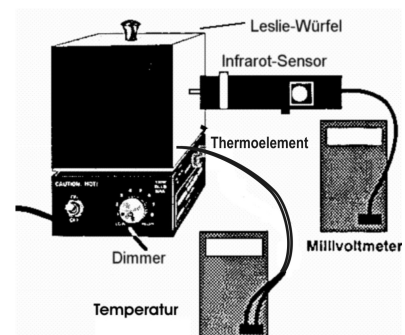


Abbildung 3: Das Thermoelement misst die Temperatur des Leslie-Würfels, der Infrarot-Sensor seine Temperaturstrahlung

- (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, indem Sie die Lampe einschalten und den Dimmer im unteren Bereich einstellen. Notieren Sie bei thermischem Gleichgewicht die Oberflächentemperatur T und die Sensorspannung U aller vier Oberflächen im gleichen Abstand in möglichst kurzer Zeit. Zusätzlich messen Sie bitte mit der Wärmebildkamera die Temperatur der schwarzen Oberfläche (wird für A7-A8 benötigt). 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 $273,15\text{ K}$.

3 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.

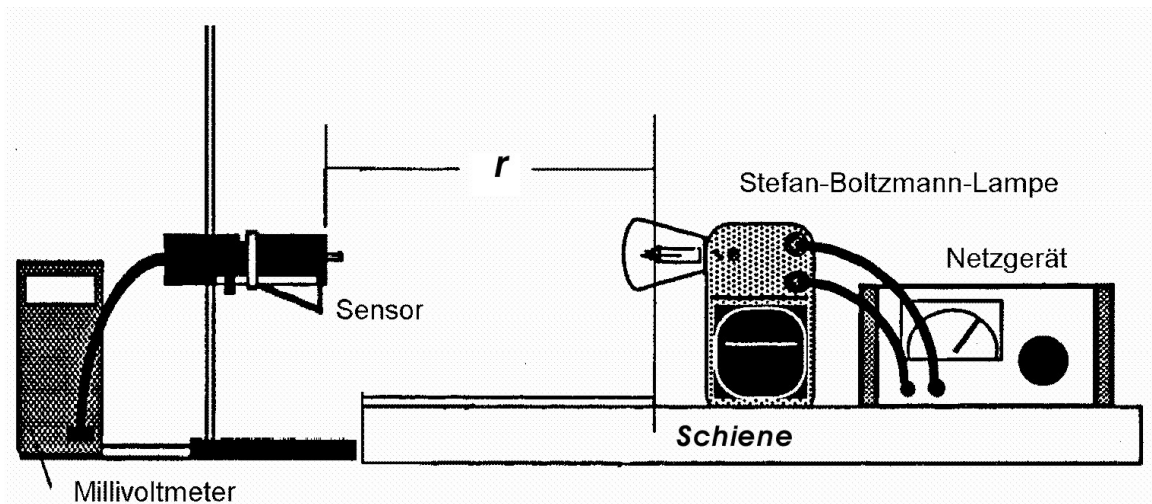


Abbildung 4: Versuchsaufbau: Die Versorgungsspannung der Lampe und die Stromstärke können direkt am Netzgerät abgelesen werden

- (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. $U_{\text{Lampe}} < 12\text{ V}$

- (A2) Ermitteln Sie die Temperatur des Glühfadens. Dazu wird zunächst für jede Einstellung der elektrische Widerstand R der Lampe berechnet: $R = U_{Lampe}/I_{Lampe}$. 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

$R_0 = 0,35 \Omega$, Widerstand der Glühwendel bei Raumtemperatur T_0

$\alpha = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 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.

4 Die Strahlungsintensität hängt von der Entfernung ab

Die Strahlungsintensität nimmt mit zunehmender Entfernung von einem Strahler mit dem Faktor $\frac{1}{r^2}$ ab. Dies soll in dem folgenden Versuchsteil untersucht werden.

Den Versuchsaufbau zeigt ebenfalls die Abb. 4. Die Stefan-Boltzmann-Lampe steht mit einem optischen Reiter auf einer Schiene, so dass der Abstand r von dem Sensor kontinuierlich verändert werden kann.

- (M4) Verbinden Sie die Lampe mit dem Netzgerät und variieren Sie bei konstanter Spannung den Abstand r und messen die Sensorspannung U . Nehmen Sie Werte für 7 Abstände auf. Erproben Sie vor der Messwertaufnahme einen sinnvollen Abstandsbereich.

Wichtiger Hinweis: Durch thermische Erwärmung wird der Sensor beschädigt. Daher darf er bei kleinem Abstand immer nur für kurze Augenblicke durch die Blechblende freigegeben werden.

- (A4) Stellen Sie die Messwerte in graphisch dar $U = U(r)$.

- (A5) Führen Sie eine Fitanalyse auf der Grundlage $f(x) = A/((x - B)^2) + C$ durch.

- (A6) Welche physikalische Bedeutung haben die Parameter A, B, C? Einheiten!

5 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.

- (M5) Verdeutlichen Sie mit Hilfe des Leslie-Würfels den Einfluss des Emissionsgrads auf die Temperaturmessung der Wärmebildkamera. Ein Bild aufnehmen.



- (A7) Berechnen Sie aus den Temperaturmessungen mit der Wärmebildkamera aus (A1) den in der Kamera hinterlegten Emissionsgrad ϵ_{WBK} :
- $$(T^4 - T_0^4) = \epsilon_{\text{wbk}}(T_{\text{wbk}}^4 - T_{\text{WBK},0}^4),$$
- dabei bezeichnet T die Kontaktmessung und T_{WBK} die Temperaturmessung mit der Wärmebildkamera. Hierbei wurde angenommen, dass der Emissionsgrad der schwarzen Fläche $\epsilon_S = 1$ ist.
- (A8) Führen Sie eine lineare Regression durch. Ermitteln Sie aus der Steigung den in der Kamera hinterlegten Emissionsgrad.

5.1 Absorption

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

- (M6) Untersuchen Sie die Abschirmung von Wärmestrahlung mit Hilfe der Wärmebildkamera und des Infrarotsensors. Sie finden verschiedene Materialien am Arbeitsplatz.
- (M7) 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.

5.2 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.

- (M8) Fotografieren Sie mit der Wärmebildkamera einen Prozess bei dem Reibungsverluste sichtbar werden.
- (M9) 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

