

Anleitung zum Praktikumsversuch

Wärmestrahlung

Zusammenfassung

In diesem Versuch werden grundlegende Gesetzmäßigkeiten der Wärmestrahlung experimentell untersucht.

Mit einer Thermosäule als Sensor wird dazu die Strahlungsintensität in Abhängigkeit einerseits vom Abstand und andererseits von der Temperatur einer Wärmequelle gemessen. Um auch den Einfluss der strahlenden Oberfläche selbst zu erfassen, wird als Wärmequelle ein Leslie-Würfel mit Seitenflächen in unterschiedlichen Farben und Ausführungen verwendet. Mit diesem Würfel wird außerdem die Zuverlässigkeit der Anzeige eines kommerziellen Infrarot- (IR-) Handthermometers überprüft.

Im zweiten Teil des Versuchs wird die Wärmestrahlung technischer Lichtquellen – Glühlampe, LED - erfasst und außerdem die Durchlässigkeit verschiedener Materialien – Kunststoffolie, Wasserschicht - für Wärmestrahlung ermittelt.

In der Auswertung wird die Anwendbarkeit des Stefan-Boltzmann-Gesetzes und des Abstandsquadrat-Gesetzes unter den Versuchsbedingungen quantitativ überprüft.

Wichtige Begriffe

Elektromagnetische Wellen, Licht, Wärmestrahlung, Thermischer Strahler, Schwarzer und Grauer Strahler, Lumineszenzstrahler, LED, Strahlungsleistung, Stefan-Boltzmann-Gesetz, Spektrale Strahlungsdichte, Planck-Gesetz

Literatur

Hering, Martin, Stohrer: Physik für Ingenieure, Springer, 11. Auflage (2012)

Kuypers : Physik (Band 1), Wiley VCH, 2. Auflage (2002)

Müller : Thermodynamik, De Gruyter, 1. Auflage (2014)

1 Grundlagen

1.1 Sichtbare Strahlung und Wärmestrahlung

Das menschliche Auge kann elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen in einem Intervall von etwa 400 bis 750 nm detektieren. Abgesehen davon besteht kein prinzipieller Unterschied zwischen dieser sichtbaren (oder optischen) und andererseits der sogenannten Infrarot- oder Wärmestrahlung mit Wellenlängen außerhalb dieses Bereichs. Effekte wie Reflexion, Brechung und Beugung treten in jeweils ähnlicher Weise auf. Im sichtbaren Bereich sind sie lediglich einfacher zu untersuchen, da sie ohne aufwendige Hilfsmittel mit bloßem Auge direkt zu beobachten sind.

1.2 Klassischer thermischer (Wärme-) Strahler

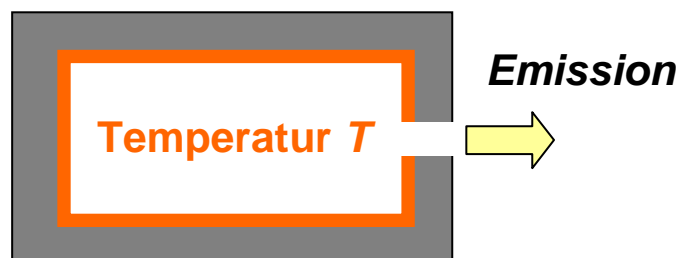
Das Modellsystem für einen thermischen Strahler ist der „schwarze Körper“, ein Objekt, das alle einfallende Strahlung absorbiert und nichts davon reflektiert. Dies kann experimentell durch einen Hohlkörper mit einer kleinen Öffnung vom Querschnitt A realisiert werden. Einfallende Lichtstrahlen werden von den Wänden des Hohlraums hin- und her reflektiert und geben dabei praktisch ihre gesamte Energie ab – einfallende Strahlung wird also absorbiert. Bringt man den Innenraum des Hohlkörpers auf die Temperatur T , wird aus der Öffnung Strahlung mit der Gesamtleistung Φ abgestrahlt.

$$\Phi = \sigma A T^4 \quad (1)$$

Dabei beträgt die **Stefan-Boltzmann** - Konstante $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

Abbildung 1 :

Schematischer Aufbau eines schwarzen Strahlers (= Hohlraumstrahler). Im Prinzip ist er ein Rohrofen. Die Temperatur im Innenraum beträgt T , die Emission erfolgt durch die Öffnung mit der Querschnittsfläche A .



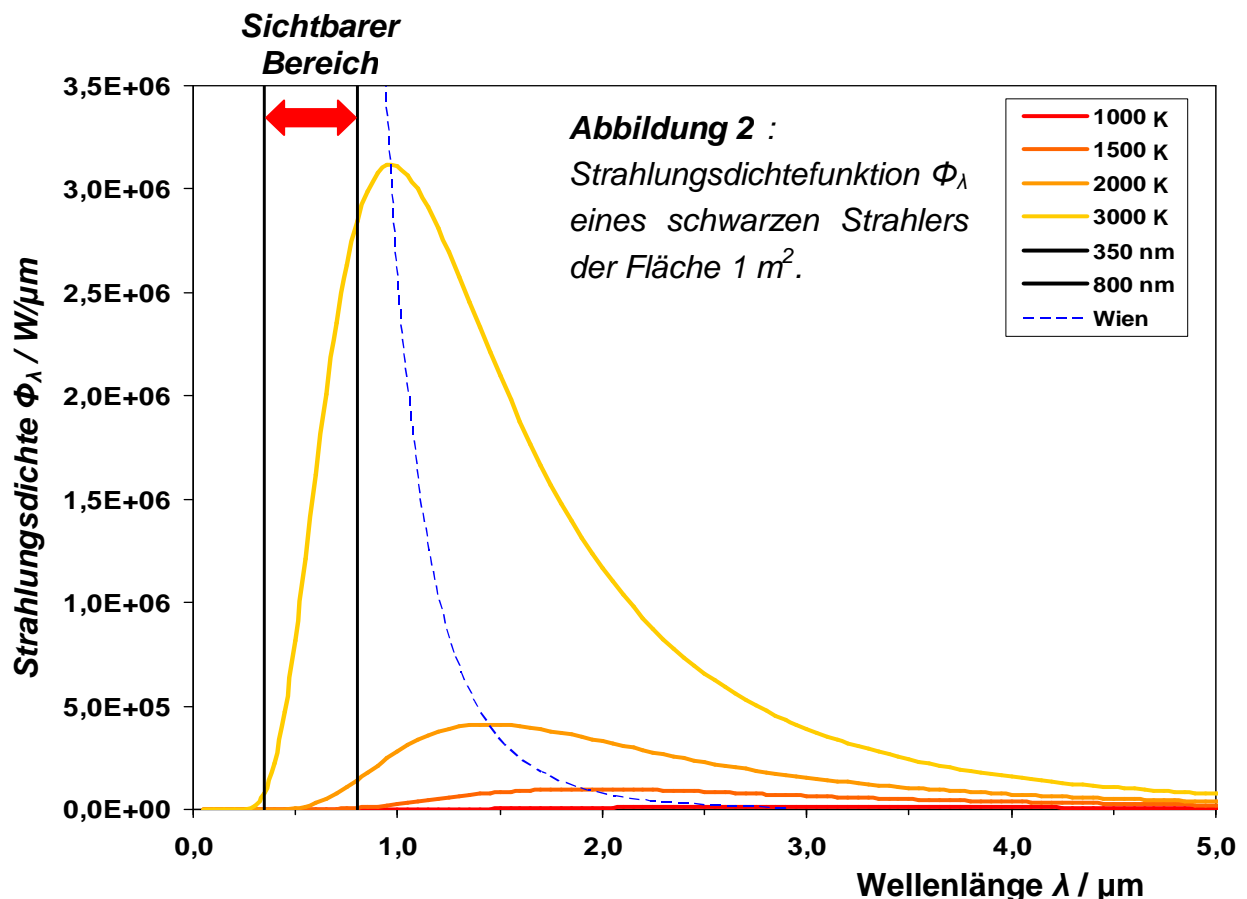
Eine Glühlampe ist zwar kein idealer schwarzer Strahler, ihre Abstrahlung wird jedoch ebenfalls in relativ guter Näherung durch die für ihn geltenden Gesetze beschrieben. Aber auch jeder beliebige andere Gegenstand gibt in Abhängigkeit von seiner Temperatur und Oberflächenbeschaffenheit Wärmestrahlung ab.

Die Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers ist nicht gleichmäßig über das Spektrum verteilt. **Max Planck** berechnete als erster die spektrale Dichtefunktion Φ_λ , welche die Abhängigkeit der Strahlungsleistung von der Wellenlänge λ beschreibt. Dazu musste er das heute nach ihm benannte Wirkungsquantum h einführen :

$$\Phi_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{\lambda kT}\right] - 1} \cdot A \quad \begin{array}{l} h = 6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \\ k = 1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \\ c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s} \end{array} \quad (2)$$

Das nach **Wilhelm Wien** benannte Verschiebungsgesetz beschreibt die Position λ_{\max} des Emissionsmaximums. In Abbildung 2 ist sie durch die gepunktete Linie angedeutet:

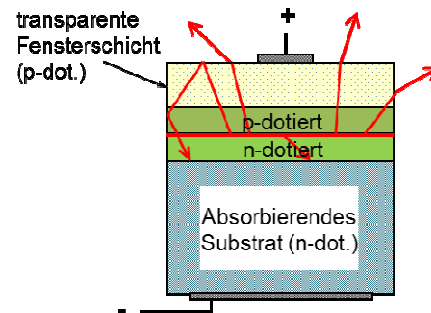
$$\lambda_{\max} T = 2898 \text{ } \mu\text{m K} = \text{const} \quad (3)$$



1.3 Leuchtdiode (LED = light emitting diode)

Leuchtdioden sind Halbleiterbauelemente. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem sogenannten pn-Übergang, ihre Emission erfolgt in Form einer schmalen Bande. Die Emissionswellenlänge wird vom energetischen Abstand von Valenz- und Leitungsband des Halbleiters am pn-Übergang bestimmt. Im Versuch wird ihr Abstrahlungsverhalten untersucht.

Abbildung 3:
Prinzipieller Aufbau einer LED.
Verschieden dotierte Schichten
aus Halbleitermaterial bilden
einen pn-Übergang



1.4 Abstandsgesetz für die Intensität

Als Intensität bezeichnet man die von einer Quelle emittierte Strahlungsleistung pro Flächeneinheit. Sie wird in der Einheit W/m^2 gemessen. Die Intensität einer in alle Raumrichtungen gleich stark (isotrop) strahlenden punktförmigen Quelle nimmt im Idealfall mit zunehmendem Abstand r entsprechend eines $1/r^2$ Gesetzes ab. Unter der Modellannahme, dass sich die Quelle im Mittelpunkt einer Kugel mit Radius r befindet, ist dies einfach zu verstehen. Die von der Quelle in einen bestimmten Raumwinkelbereich Ω abgestrahlte Strahlungsleistung Φ_e ist konstant und verteilt sich gleichmäßig auf den zugehörigen Ausschnitt dieser Kugeloberfläche (Abbildung 4). Mit zunehmendem Radius r_i wächst die Oberfläche dieser gedachten Kugel – und somit auch die Fläche A_i des Kugelausschnitts - proportional zu r^2 an, denn die Oberfläche einer Kugel beträgt $4/3\pi r^3$. Die Intensität I hängt somit vom Abstand r_i ab und berechnet sich zu:

$$I = I(r_i) = \frac{\Phi_e}{A_i} \sim \frac{1}{r_i^2} \quad (4)$$

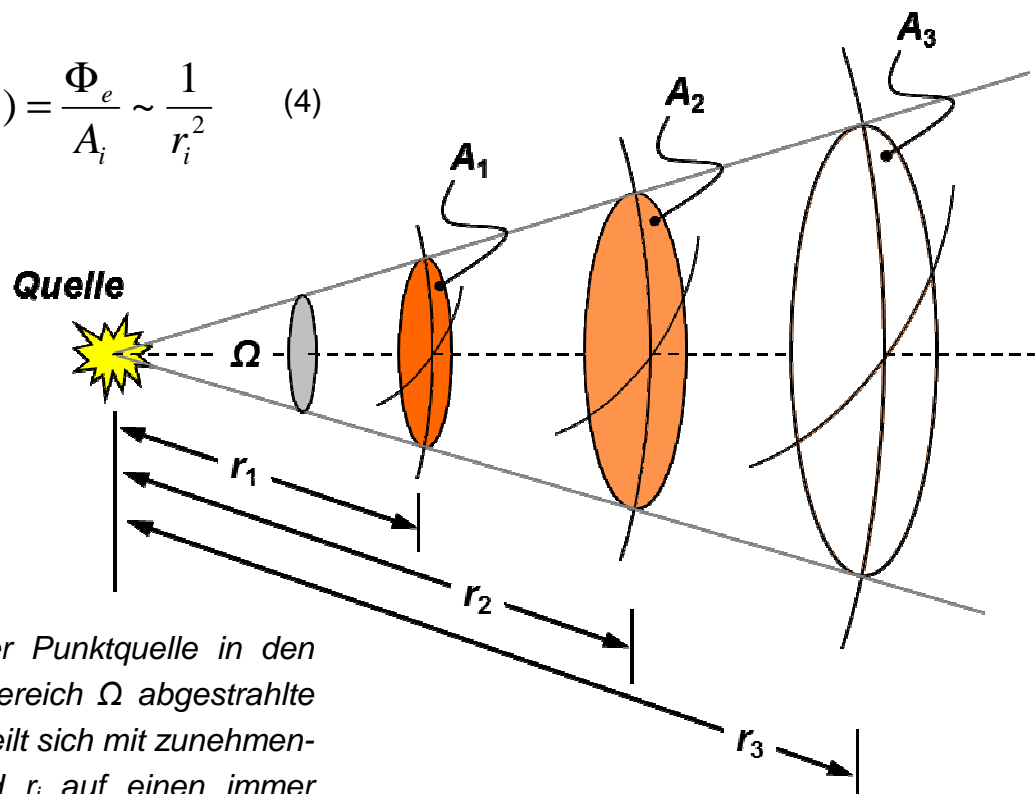


Abbildung 4:
Die von einer Punktquelle in den
Raumwinkelbereich Ω abgestrahlte
Leistung verteilt sich mit zunehmen-
dem Abstand r_i auf einen immer
größeren Kugelausschnitt A_i .

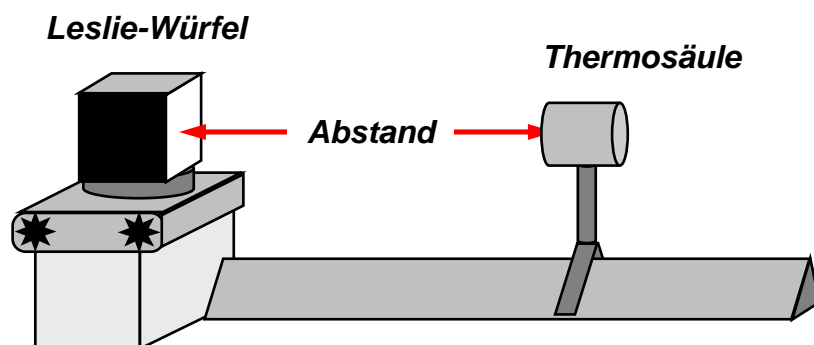
2 Messaufbau

2.1 Lesliewürfel und Thermosäule

Der mit Wasser gefüllte Leslie-Würfel steht auf einem heizbaren Magnetrührer, der sich wiederum auf einer Hebebühne vor dem einen Ende einer optischen Schiene befindet. Zur Detektion der Intensität dient eine Thermosäule, dies ist nichts anderes als eine Reihe von zusammenschalteten Thermoelementen. Im Experiment wird jeweils unter Verwendung eines Multimeters der sich bei Einstrahlung einstellende Thermostrom gemessen. Die Thermosäule kann auf der Schiene verschoben werden. Im Experiment sind damit Abstände zwischen Quelle und Detektor in einem Intervall von etwa 20 cm bis 2 m einstellbar.

Abbildung 5

*Aufbau auf optischer
Schiene*



Um den Durchtritt der Strahlung durch Materie zu untersuchen, werden ein Wasserfilter mit einer Schichtdicke von 10 cm sowie diverse, über einen Rahmen gespannte Kunststoff-Folien mit und ohne Metallisierung verwendet.

Genereller Hinweis:

Nach jeder Änderung der Einstrahlung benötigt die Thermosäule eine Einstellzeit, bis sie sich wieder im thermischen Gleichgewicht befindet. Während dieser Zeitspanne – die je nach Temperaturverhältnissen bis zu einer Minute betragen kann – ändert sich der Thermostrom noch kontinuierlich. Ein sinnvoller Messwert liegt erst dann vor, wenn die Anzeige sich stabilisiert hat und um einen konstanten Mittelwert schwankt.

2.2 Übersicht über die verwendeten Geräte

- Optische Schiene
- Leslie-Würfel auf Heizplatte
- Digitalthermometer
- LötKolben
- Halogenlampe
- Weiße Leuchtdiode (LED)
- Gleichspannungsnetzgerät
- Wasserfilter
- Metallisierte Kunststoffolie
- Thermosäule und Multimeter
- IR-Handthermometer

3 Aufgaben

3.1 Abhängigkeit der Strahlungsintensität von der Temperatur der Quelle

Ein mit Wasser gefüllter Leslie-Würfel auf einer Heizplatte wird ausgehend von der Raumtemperatur allmählich bis auf 70°C erwärmt. Die Temperatur des Wassers wird dabei mit einem Digitalthermometer gemessen. Zur Detektion der von dem Würfel emittierten Strahlung dient eine Thermosäule, die auf die schwarze Fläche des Würfels gerichtet ist und deren Abstand zum Würfel während dieses Versuchsteils konstant 50 cm beträgt. Der von der Säule abgegebene Thermostrom hängt linear von der Gesamtintensität ab. Seine Abhängigkeit von der Temperatur des Würfels wird ermittelt.

3.2 Abhängigkeit der Strahlungsintensität von der Oberfläche der Quelle

Die bei Abschluss der Messreihe aus Teil 3.1 erreichte Temperatur des Würfels wird konstant gehalten. Durch Drehen werden seine vier verschiedenen Seiten auf die Thermosäule ausgerichtet. Der sich dabei jeweils ergebende Thermostrom wird gemessen.

Die Oberflächentemperaturen der vier verschiedenen Seiten werden außerdem mit dem IR-Handthermometer bestimmt.

3.3 Abhängigkeit der Strahlungsintensität vom Abstand zur Quelle

Die zu Abschluss von Teil 3.2 erreichte Temperatur des Würfels wird konstant gehalten. Der Abstand der Thermosäule von der schwarzen Würfeloberfläche wird zwischen etwa 20 cm und 2 m variiert und der sich jeweils dabei ergebende Thermostrom gemessen.

Außer der ausgedehnten Würfelfläche wird auch eine in guter Näherung punktförmige Quelle untersucht. Dafür wird der Würfel durch eine Halogenlampe (50 W) ersetzt.

In beiden Fällen sind mindestens 10 Wertepaare zu messen.

3.4 Intensität verschiedener Strahlungsquellen

Die Thermosäule wird nun in einem Abstand von 50 cm zu verschiedenen technischen Strahlungsquellen aufgebaut und der sich nach Inbetriebnahme der Quellen ergebende Thermostrom gemessen. Es stehen zur Verfügung: Halogenlampe (12 V, 50 W), LED (12 V, 1,2 W), regelbarer Lötkolben. Lampe und LED werden jeweils bei der Nennspannung betrieben. Der Lötkolben wird bei mindestens 5 verschiedenen Stellungen des Reglers betrieben.

3.5 Durchgang von Strahlung durch Materie

Im Aufbau nach Teil 3.4 kann zwischen Quelle (Lampe, LED) und Thermosäule noch ein Wasserfilter beziehungsweise eine metallisierte Kunststoffolie angebracht werden. Die Veränderung des Thermostroms durch Einbringen der Materialien ist für beide Quellen zu messen

4 Auswertung

4.1 Abhängigkeit der Strahlungsintensität von der Temperatur der Quelle

Die Gültigkeit des T^4 -Gesetzes ist durch eine geeignete grafische Auftragung zu überprüfen. Dazu wird in einem Diagramm der Thermostrom in Abhängigkeit von der vierten Potenz der absoluten Temperatur des Würfels aufgetragen. Gilt das Gesetz ?

4.2 Abhängigkeit der Strahlungsintensität von der Oberfläche der Quelle

Wie hängt der im Experiment gemessene Thermostrom von der Oberfläche der Strahlungsquelle ab ? Welche Messwerte liefert das IR-Handthermometer ?

Die Resultate für Thermosäule und Thermometer sind in Form einer gemeinsamen Tabelle darzustellen. Wie sind sie zu interpretieren ?

4.3 Abhängigkeit der Strahlungsintensität vom Abstand zur Quelle

Die Strahlungsintensität einer Quelle sollte mit zunehmendem Abstand r proportional zu $1/r^2$ abnehmen. Dies ist durch eine geeignete graphische Auftragung zu überprüfen. Dazu wird in einem Diagramm der Thermostrom in Abhängigkeit vom umgekehrten Quadrat des Abstands Quelle - Thermosäule aufgetragen.

Für beide im Versuch verwendete Quellen – Lesliewürfel und Halogenlampe – sind entsprechende Diagramme zu erstellen. Gilt das Gesetz in beiden Fällen ?

4.4 und 4.5 Temperatur, Intensität und Strahlungsdurchgang

Berechnen Sie, welcher relative Anteil der Gesamtstrahlungsintensität der einzelnen Quellen (Lampe, LED) durch die verschiedenen Materialien durchtritt.

Schätzen Sie mit Hilfe des Diagramms aus 4.1 die Temperatur des Lötkolbens für die einzelnen Reglerstellungen ab. Wie groß ist die jeweilige Unsicherheit ? Sind die erhaltenen Werte realistisch ?

Generelle Bemerkung zu den grafischen Auswertungen:

Die Diagramme mit Ausgleichs- und Fehlergeraden können direkt von Hand erstellt werden. Alternativ kann ein grafikfähiges PC-Programm mit linearer Regression wie etwa EXCEL verwendet werden.

In allen Diagrammen ist die Unsicherheit für die Steigung der Ausgleichsgeraden zu bestimmen, und – soweit sinnvoll - eine Abschätzung für den erwarteten Wert der relativen Unsicherheit durchzuführen.