

| Schwierigkeitsgrad | Vorbereitungszeit | Durchführungszeit | empfohlene Gruppengröße |
|---|---|---|-------------------------|
|  leicht |  10 Minuten |  100 Minuten | 2 |

Prinzip

Wärmestrahlung ist an allen Flächen messbar, solange sich ihre Temperatur von der ihrer Umgebung unterscheidet. Hierbei gilt: Je heißer ein Objekt ist, desto mehr strahlt es ab. Zudem spielt auch die Farbe der Oberfläche eine Rolle; dunkle Flächen können mehr Wärme abstrahlen als helle. Eine Anwendung findet sich beispielsweise bei passiven Kühlkörpern (siehe Abb. 1), die oft mit einer schwarzen Schicht überzogen sind, damit sie so mehr Wärme abstrahlen können.

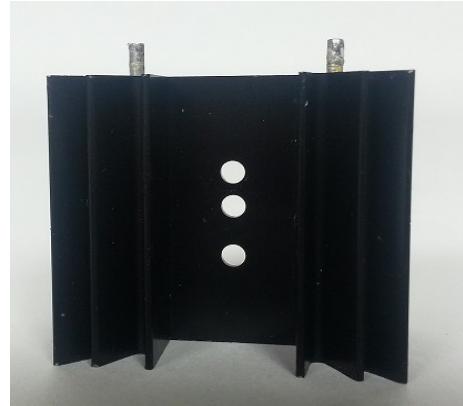


Abb. 1: Passiver Kühlkörper

Verwandte Begriffe

Wärmestrahlung und Emissionsvermögen, Strahlungsgesetz nach Kirchhoff, Strahlungswürfel nach Leslie, schwarzer und grauer Körper.



Abbildung 2: Experimenteller Aufbau (Variante P2350400)

Material

Menge Material

| | | Bestellnr. | Pos. in Abb. 3 |
|---|--|------------|----------------|
| 1 | Messverstärker universal | 13626-93 | 1 |
| 1 | Thermosäule nach Moll | 08479-00 | 2 |
| 1 | Schutzrohr für Thermosäule | 08479-01 | 3 |
| 1 | Tonnenfuß PHYWE | 02006-55 | 4 |
| 1 | Strahlungswürfel nach Leslie | 04555-00 | 5 |
| 1 | Rührer zum Strahlungswürfel nach Leslie | 04555-01 | 6 |
| 1 | Schülerthermometer, $-10\dots+110\text{ }^\circ\text{C}$, $l = 180\text{ mm}$ | 38005-02 | 7 |
| 1 | Tischchen auf Stiel | 08060-00 | 8 |
| 1 | Dreifuß PHYWE | 02002-55 | 9 |
| 2 | Verbindungsleitung, 32 A, 750 mm, rot | 07362-01 | 10 |
| 2 | Verbindungsleitung, 32 A, 750 mm, blau | 07362-04 | 11 |
| 1 | Tauchsieder, 1 000 W, 220...250 V | 04020-93 | 12 |
| 1 | Becherglas DURAN, hohe Form, 2000 ml | 36010-00 | 13 |
| 1 | Trichter, $d_{\text{oben}} = 50\text{ mm}$, Glas | 34457-00 | 14 |
| 1 | Voltmeter* | 07129-00 | 15 |
| * | Variante P2350400: Digitalmultimeter 2005 | 13820-01 | 16 |
| * | Variante P0454351: Analog-Demo-Multimeter ADM 2 | | |



Abbildung 3: Versuchsmaterial (Variante P2350400)

Lernziele

1. Durch den Versuch soll herausgefunden werden, dass jeder Körper Wärmestrahlung emittiert und die Strahlungsintensität abhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche ist. Hierbei soll gezeigt werden, dass mehr Wärmestrahlung emittiert wird, je matter die Würfeloberfläche ist.
2. Weiterhin soll experimentell ermittelt werden, dass die Intensität der Wärmestrahlung nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur ist.

Aufgaben

1. Messung der Raumtemperatur T_0 (in Kelvin) vor der Versuchsdurchführung.
2. Bestimmung und Vergleich der Emissionsvermögen aller vier Seiten des Strahlungswürfels bei konstant hoher Temperatur. Dazu wird die Wärmestrahlung des mit kochendem Wasser gefüllten Würfels mit einer Thermosäule nach Moll gemessen.
3. Bestimmung und Vergleich der Emissionsvermögen aller vier Seiten des Strahlungswürfels in Abhängigkeit der Temperatur.
4. Auftragung der gemessenen Thermospannung U als Funktion der absoluten Temperatur T bzw. $T^4 - T_0^4$ für jede Seite des Strahlungswürfels und Überprüfung der Gültigkeit des Strahlungsgesetzes von Kirchhoff für den verwendeten Strahlungswürfel anhand der gemessenen Daten.

Aufbau

Den Versuch wie in Abb. 2 aufbauen:

- Die Thermosäule nach Moll an den Eingang des Messverstärkers anschließen und das Voltmeter mit dem Ausgang des Messverstärkers verbinden.
- Am Messverstärker die Betriebsart „low drift“ auswählen. Dabei wird ein niedriger Eingangswiderstand verwendet, sodass das temperaturabhängige Driften des Verstärkers so gering ist, dass Spannungen im Mikrovolt-Bereich bestimmt werden können.
- Den Verstärkungsfaktor am Messverstärker groß genug einstellen, dass diese in einem passenden Messbereich des Voltmeters dargestellt werden können (10–1 000 µV sind als Eingangssignal zu erwarten, ein Verstärkungsfaktor von z. B. 10^3 führt zu Ausgangsspannungen zwischen 10 mV und 1 V).
- In einem geeigneten Abstand (3–10 cm) zur Thermosäule den Strahlungswürfel positionieren. Der Würfel wird dabei mittig auf dem Tischchen, das auf einem Dreifuß montiert ist, platziert. Das Thermometer und der Rührer werden anschließend durch die jeweilige Öffnung an der oberen Würfelabdeckung gesteckt.

Hinweise zum Aufbau:

Ziel des Versuches ist die Bestimmung des Emissionsvermögens heißer Körper. Dazu wird an vier verschiedenen Würfeloberflächen die Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Temperatur der untersuchten Oberfläche gemessen. Da die zu erwartende Thermospannung relativ gering ist, sollten folgende Hinweise beachtet werden:

- Störstrahlungen (z. B. von Lichtquellen) sollten vermieden werden. Hierzu empfiehlt es sich, den Messraum abzudunkeln. Alternativ lässt sich das Schutzrohr (Art.-Nr. 08479-01) auf die Thermosäule aufstecken, um Störstrahlung zu unterdrücken.
- Der Abstand zwischen Thermosäule und Würfeloberfläche sollte bei den einzelnen Messungen konstant gehalten werden. Abb. 4 zeigt exemplarisch die gemessene Thermospannung U in Abhängigkeit des Abstandes für die schwarz lackierte Oberfläche.
- Da die Strahlungsintensität von der Temperatur der Würfeloberfläche abhängig ist, sollte vor jeder Aufnahme einer Messreihe durch Rühren des Wassers im Würfelinneren mit dem Rührer ein optimales Temperaturreichgewicht erreicht werden.
- Die Öffnung der Thermosäule sollte sich senkrecht zur untersuchenden Würfeloberfläche befinden, während der Messung aber nicht mehr mit der Hand berührt werden, um die Messwerte nicht zu verfälschen.

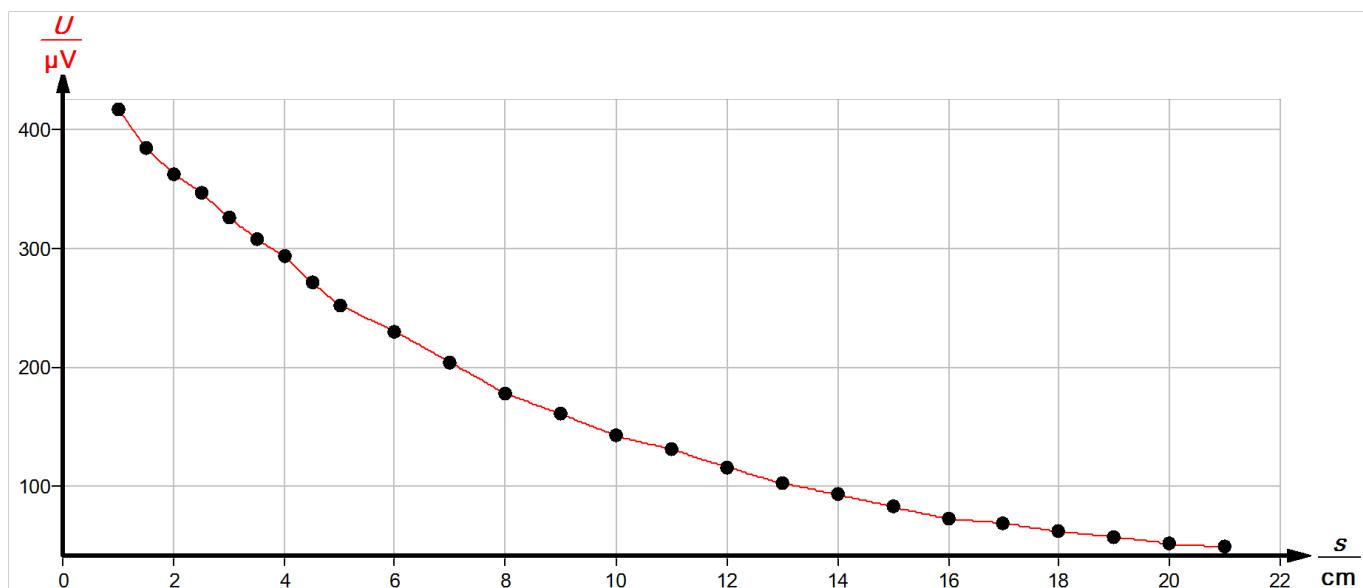


Abbildung 4: Abstandsabhängigkeit des Emissionsvermögens der schwarzen Oberfläche bei einer Temperatur von $\vartheta = 93^\circ\text{C}$.

Durchführung

In diesem Versuch wird die thermische Strahlung (in Abhängigkeit der Temperatur) für jede der vier unterschiedlich beschaffenen Würfelflächen bestimmt.

1) Bestimmung der Thermospannung bei konstanter Temperatur:

- Vor Beginn der Versuchsdurchführung ist die Raumtemperatur T_0 zu bestimmen, die für die spätere Auswertung des Versuches benötigt wird.
- Anschließend wird der Würfel mit kochendem Wasser gefüllt. Dazu in einem großen Becherglas Wasser mithilfe des Tauchsieders zum Kochen bringen und über einen Trichter in den Strahlungswürfel überführen (Volumen ca. 1,4 l). Das kochende Wasser kann auch nach Entfernen der oberen Würfelabdeckung direkt in den Würfel gegossen werden.

- Nun wird für jede der vier Oberflächen die jeweilige Thermospannung U in konstantem Abstand bei gleicher Temperatur bestimmt. Dazu wird am Voltmeter die (verstärkte) Spannung für die erste Oberfläche abgelesen und notiert. Danach muss das Tischchen vorsichtig um 90° gedreht und die nächste Fläche vermessen werden. VORSICHT: Den heißen Würfel nicht mit bloßen Händen berühren! Auch hier wieder auf eine senkrechte Ausrichtung des Würfels zur Thermosäule achten. Es ist wichtig, dass die vier Messungen in kurzer Zeit aufeinander folgen, damit der Würfel eine annähernd konstante Temperatur hält.

2) Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der Thermospannung:

- Falls die Temperatur zu stark abgenommen haben sollte (unter 90°C), das Wasser aus dem Strahlungswürfel ausgießen und diesen erneut mit kochendem Wasser befüllen und die Seite des Würfels, deren Emissionsvermögen zuerst bestimmt werden soll, senkrecht zur Thermosäule ausrichten.
- Während des Abkühlens wird die Spannung am Voltmeter und die Temperatur am Thermometer für die untersuchte Würfeloberfläche in geeigneten Intervallen (z. B. alle 5°C oder alle 30 s) abgelesen. Damit die Wassertemperatur im Würfel im Gleichgewicht bleibt, sollte in regelmäßigen Abständen das Wasser mit dem Rührer umgerührt werden.
- Nachdem das Emissionsvermögen der ersten Oberfläche (z. B. der schwarzen Würfeloberfläche) untersucht wurde, wird das abgekühlte Wasser durch Ausgießen aus dem Strahlungswürfel entfernt. Der Strahlungswürfel wird nun auf dem Tischchen so positioniert, dass die nächste Oberfläche (z. B. die weiße Würfeloberfläche) vermessen werden kann. Hierbei sollte wiederum darauf geachtet werden, dass sich die Würfeloberfläche mittig auf dem Tischchen und senkrecht zur Thermosäule befindet.
- Die Messung der Thermospannung und der Temperatur für die drei anderen Würfeloberflächen erfolgt in gleicher Weise wie für die bereits untersuchte Würfeloberfläche. Empfehlenswert ist eine Messreihe bis zu einer Wassertemperatur von 50°C (Wärmeabstrahlung der glänzenden Oberfläche ist sehr gering).
- Es empfiehlt sich, die Raumtemperatur T_0 vor jeder Messreihe erneut zu prüfen.

Hinweis:

Um die Messwerterfassung der Temperaturabhängigkeit zu beschleunigen, können alle vier Messreihen auch gleichzeitig aufgenommen werden. Dazu wie im ersten Versuchsteil das Tischchen mit dem Strahlungswürfel nach jedem Messpunkt um 90° zur nächsten Oberfläche weiterdrehen; so ist lediglich ein Abkühlvorgang notwendig. Aufgrund der häufigen Neuausrichtung zur Thermosäule kann die Messgenauigkeit jedoch nachlassen.

Theorie

Jeder warme Körper emittiert Wärmestrahlung. Das Emissionsvermögen heißer Körper hängt dabei nicht nur von der Temperatur ab, sondern auch von der Oberflächenbeschaffenheit. So gilt nach dem Strahlungsgesetz von Kirchhoff, je mehr ein Körper bzw. eine Fläche Wärmestrahlung absorbieren kann, desto mehr kann emittiert werden.

In diesem Versuch wird ein Strahlungswürfel mit vier unterschiedlich beschaffenen Seitenflächen verwendet. Jede Fläche A des Würfels (mit der absoluten Temperatur T) emittiert dabei Strahlung der Leistung

$$P_{\text{Würfel}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 ,$$

wobei der Gewichtungsfaktor ϵ für den Emissionsgrad der jeweiligen Oberfläche steht ($0 \leq \epsilon \leq 1$) und σ die Stefan-Boltzmann-Konstante ist. Ferner gilt zu berücksichtigen, dass der Würfel auch von der Umgebung (mit der Temperatur T_0) Strahlung der Leistung

$$P_{\text{Umgebung}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_0^4$$

absorbiert. Aus diesem Grund wird bei diesem Versuch nicht das gesamte Emissionsvermögen gemessen, sondern die Differenz aus ausgestrahlter Leistung $P_{\text{Würfel}}$ und eingestrahlter Leistung P_{Umgebung} bestimmt. Für die Differenz ΔP gilt:

$$\Delta P = P_{\text{Würfel}} - P_{\text{Umgebung}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_0^4) .$$

Diese Differenz ΔP entspricht der Leistung, die ein Körper mit der Temperatur T durch Wärmestrahlung an die Umgebung mit der Temperatur T_0 abgibt.

Mithilfe einer Thermosäule nach Moll kann diese Wärmestrahlung nachgewiesen werden, indem man die dort abfallende Thermospannung U misst, welche proportional zur Strahlungsleistung ΔP des Würfels und somit auch proportional zu $T^4 - T_0^4$ ist:

$$U \propto T^4 - T_0^4 .$$

Auswertung und Ergebnisse

Im Versuch zeigt sich bereits im ersten Teil, dass die vier verschiedenen Würfeloberflächen verschiedene Emissionsvermögen aufweisen, obwohl sie aus demselben Material bestehen (Messing). Während die schwarze und die weiß lackierte Oberfläche eine ähnlich hohe Thermospannung liefern, ist diese bei den unlackierten Seiten (matt und glänzend) deutlich niedriger (siehe Tab. 1). Die Beschaffenheit der Oberfläche hat also auch unabhängig von der Temperatur einen wesentlichen Einfluss auf die emittierte Strahlung. Der Emissionsgrad ϵ ist folglich eine Materialeigenschaft.

Tabelle 1: Vergleich der Messdaten im Abstand von 5 cm bei $T = 366$ K und $T_0 = 293$ K.

| Oberfläche | Thermospannung $U / \mu\text{V}$ |
|------------|----------------------------------|
| schwarz | 254 |
| weiß | 226 |
| matt | 42 |
| glänzend | 26 |

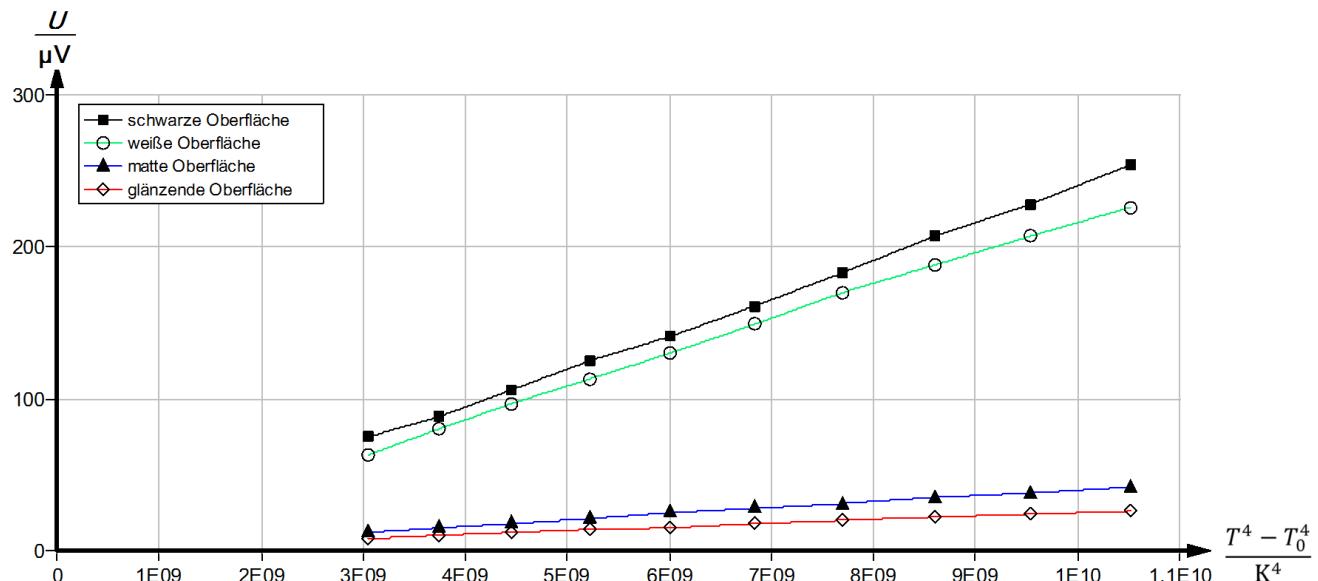


Abbildung 5: Darstellung der gemessenen Thermospannung U in Abhängigkeit von $T^4 - T_0^4$ für alle vier Oberflächen in einem Abstand von 5 cm.

Für eine grafische Auswertung der Messergebnisse soll die Thermospannung für jede Würfeloberfläche jeweils gegen $T^4 - T_0^4$ aufgetragen und die Messungen untereinander verglichen werden. Diese Auftragung zeigt, dass bei konstanter Umgebungstemperatur T_0 die emittierte Strahlung für alle Flächen linear zur vierten Potenz der absoluten Temperatur T der Oberfläche steigt. D.h. je höher die Temperatur der Oberfläche ist, desto mehr Spannung kann mithilfe der Thermosäule gemessen werden. Abb. 5 verdeutlicht diese Abhängigkeit für alle vier Würfeloberflächen, die Erkenntnisse aus dem ersten Versuchsteil werden hier bestätigt.

Vergleicht man die Messungen an der schwarzen und der weißen Oberfläche (schwarze und grüne Linie in Abb. 5), so sieht man, dass das Emissionsvermögen neben der Temperatur auch von der Beschaffenheit der Würfeloberfläche abhängig ist. Aus den Messergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass eine dunklere Würfeloberfläche auch mit einer höheren Leistung als eine hellere strahlt. Dieses Messergebnis bestätigt das Strahlungsgesetz von Kirchhoff, da eine schwarze Oberfläche mehr Wärmestrahlung als eine weiße Oberfläche absorbiert.

Es wird jedoch auch ersichtlich, dass das Emissionsvermögen der schwarzen und weißen Würfeloberfläche im untersuchten Temperaturbereich sehr ähnlich ist und sich nur unwesentlich unterscheidet. Zurückführen lässt sich dies darauf, dass Körper im vermessenen Temperaturbereich Wärmestrahlung emittieren, deren Wellenlänge im Infrarot-Bereich liegt. Daher ist die Farbe der Würfeloberfläche (welche im sichtbaren Wellenlängenbereich liegt) im vorliegenden Temperatur-Bereich von geringer Bedeutung – es ist kein signifikanter Unterschied zwischen der schwarzen und der weißen Oberfläche messbar. Dennoch zeigt die schwarz lackierte Oberfläche ein leicht erhöhtes Emissionsvermögen, da sie im Gegensatz zu der weißen Oberfläche zusätzlich sichtbares Licht absorbieren und somit auch wieder emittieren kann.

Untersucht und vergleicht man die matte und die glänzende Oberfläche (blaue und rote Linie in Abb. 5), so lässt sich ableiten: Je glänzender die Würfeloberfläche ist, desto weniger Wärme wird abgestrahlt.

Diese Ergebnisse lassen sich mit dem Strahlungsgesetz von Kirchhoff in Einklang bringen. Hieraus lässt sich ableiten, dass das Emissionsvermögen der Würfeloberfläche das Produkt aus dem spezifischen Emissionsverhältnis des Materials und dem spektralen Emissionsvermögen des schwarzen Körpers ist. Aus diesem Grund sind Emissionsvermögen und Absorptionsvermögen eines Körpers gleich. Da die matte Oberfläche mehr absorbiert, emittiert sie auch mehr Strahlung als die glänzende.

Aus den Messergebnissen kann geschlossen werden, dass es sich bei allen der vier Würfeloberflächen im untersuchten Temperaturbereich um sogenannte graue Körper handelt. Graue Körper bzw. Strahler lassen sich daran erkennen, dass lediglich ihr Emissionsvermögen um einen bestimmten Faktor (Emissionsgrad ε) niedriger ist gegenüber einem schwarzen Körper ($\varepsilon = 1$). Da nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz das spektrale Emissionsvermögen eines schwarzen Körpers linear zur vierten Potenz der absoluten Temperatur ist und die Graphen in Abb. 5 ebenfalls eine Linearität der gemessenen Thermospannung U zur vierten Potenz der absoluten Temperatur zeigen, wird das Vorliegen von grauen Strahlern bestätigt.