

Versuch W9 für Physiker

Strahlungsgesetze

I. Physikalisches Institut, Raum 106
Stand: 17. April 2014



generelle Bemerkungen

- bitte Versuchspartner angeben
- bitte Versuchsbetreuer angeben
- bitte nur handschriftliche Auswertung

1 Einleitung

In diesem Versuch soll das Strahlungsgesetz der beiden Physiker Josef Stefan und Ludwig Boltzmann mit einem Leslie-Würfel-Experiment überprüft werden. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz besagt, dass die gesamte von einem Körper abgestrahlte Leistung proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur ist, also $P \sim T^4$.

2 Vorbereitung (zu Hause)

Die folgenden Stichpunkte und theoretischen Überlegungen sollen in Ihrem Heft schriftlich bearbeitet werden. Außerdem sollten Sie in der Lage sein, sie am Versuchstag im Antestat selbstständig wiederzugeben. Literaturhinweise gibt es in Abschnitt 7.

1. Machen Sie sich mit folgenden Begriffen und Zusammenhängen vertraut:
 - absolute Temperatur eines Körpers; Wie kann man die absolute Temperatur bestimmen?
 - Funktionsweise eines Thermoelements (Hinweis: Seebeck-Effekt)
 - Was ist eine Thermosäule, und wozu wird sie in diesem Experiment benutzt?
 - physikalische Beschreibung der elektromagnetischen Strahlung
 - Welches sind die Kenngrößen einer elektromagnetischen Welle, und wie hängen diese zusammen?
 - Fertigen Sie eine tabellarische Einteilung des elektromagnetischen Spektrums anhand der Frequenzen an.
 - schwarzer Strahler; Wie kann man einen schwarzen Strahler im Experiment realisieren?
 - Beschreibung und Erläuterung des Kirchhoff'schen Strahlungsgesetzes
 - Planck'sches Strahlungsgesetz (frequenzabhängige Darstellung)
 - Wien'sches Verschiebungsgesetz
 - Stefan-Boltzmann-Gesetz; Wie hängt dieses Gesetz mit dem Planck'schen Strahlungsgesetz zusammen?
 - Strahlungsgesetze von Rayleigh-Jeans und von Wien (frequenzabhängige Darstellung); Für welche Frequenzen gilt jeweils die Näherung? Was versteht man unter dem Begriff *Ultraviolett katastrophe*?
2. Skizzieren Sie die Graphen des Planck'schen-, Wien'schen- und des Rayleigh-Jeans-Strahlungsgesetzes für *eine* beliebige Temperatur, so dass zu erkennen ist, welches Strahlungsgesetz in welchem Frequenzbereich eine gute Näherung darstellt.

3. Skizzieren Sie den Graphen des Planck'schen Strahlungsgesetzes für *drei* verschiedene Temperaturen und verdeutlichen Sie damit das Wien'sche Verschiebungsgesetz.
4. Stellen Sie das Prinzip der Herleitungen der beiden Näherungen von Wien und Rayleigh & Jeans aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz kurz dar.
5. Mit welcher Leistung strahlt jede Seite eines schwarzen Würfels mit der Kantenlänge $d = 10$ cm in den Raum, wenn er mit kochendem Wasser gefüllt ist?
6. Fertigen Sie eine Skizze des Versuchsaufbaus an und beschreiben Sie die Durchführung der Messungen.

3 Versuchsaufbau und -beschreibung

Als strahlender Körper wird in diesem Experiment ein Leslie-Würfel verwendet, der mit heißem Wasser gefüllt ist. Die Seiten dieses Würfels besitzen unterschiedliche Oberflächen: Eine Seite ist schwarz, eine weiß, eine verspiegelt und eine matt. Aufgabe ist es, die Wärmestrahlung jeder dieser Würfelseiten für verschiedene Temperaturen zu messen.

Dazu verwenden wir folgende Anordnung (siehe Abb. 1): Der Leslie-Würfel wird mit kochendem Wasser gefüllt und mit einer Würfelseite senkrecht zur Thermosäule ausgerichtet. Die Thermosäule wandelt die auftreffende Wärmestrahlung in elektrische Spannung um, die verstärkt wird und am Voltmeter abgelesen werden kann. Die elektrische Spannung ist dabei proportional zur Wärmestrahlung. Zur Bestimmung der Wärmestrahlung des umgebenden Raumes dient eine Abschirmplatte, die zwischen Leslie-Würfel und Thermosäule positioniert wird. Die Temperatur des Leslie-Würfels wird am Thermometer abgelesen, das im Deckel des Würfels steckt.

Da die Thermosäule sehr empfindlich ist und auch kleinste Änderungen registriert, befindet sich der gesamte Aufbau in einer Kiste, die Störungen durch Bewegung, Zugluft und Wärmestrahlung der Praktikanten abmildern soll.

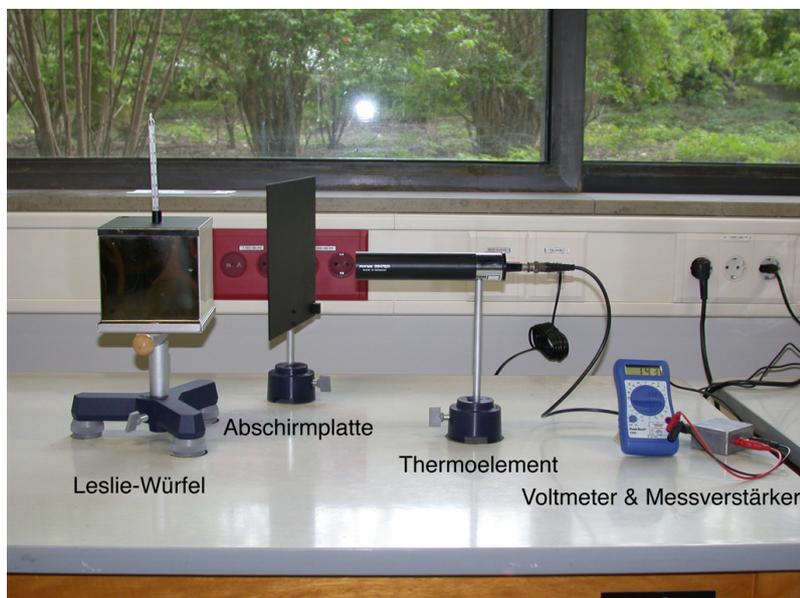


Abbildung 1: Foto des Versuchsaufbaus.

4 Benötigte Formeln

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz gibt die thermische Strahlungsleistung P eines schwarzen Körpers der Fläche A als Funktion seiner absoluten Temperatur T an. Es lautet:

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

mit der Stefan-Boltzmann-Konstanten σ . Die Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers ist somit proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur, $P \sim T^4$.

Emittiert ein Körper mehr Strahlung, als er absorbiert, dann kühlt er dadurch ab; absorbiert er mehr als er emittiert, dann wärmt er sich auf. Im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung absorbiert und emittiert der Körper im gleichen Ausmaß.

Um die Nettostrahlungsleistung eines Körpers der Temperatur T zu erhalten, muss demnach die Strahlung der Umgebung P_0 bei der Temperatur T_r mit berücksichtigt werden. Die Nettostrahlungsleistung ergibt sich durch:

$$P - P_0 = \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_r^4) \quad (2)$$

5 Durchführung (im Praktikum)

Allgemeine Hinweise:

Obwohl der Aufbau zur Abmilderung äußerer Störungen in eine Kiste eingebaut ist, ist er trotzdem noch sehr empfindlich. Halten Sie deshalb Fenster und Türen während der gesamten Messung geschlossen und vermeiden Sie jegliche Art von Zugluft.

Die schwarze Platte zur Bestimmung der Wärmestrahlung der Umgebung muss für die Messungen der Würfelseiten aus der Kiste entfernt werden.

Verwenden Sie das Thermometer mit der feineren Skala für die Bestimmung der Raumtemperatur T_r . Stecken Sie das Thermometer mit der gröberen Skala in den Leslie-Würfel zur Bestimmung der Wassertemperatur T_w .

Insgesamt sollen 10 Messreihen durchgeführt werden. Während jeder Messreihe werden jeweils die Spannung für die schwarze Platte (U_0), die Wassertemperatur (T_{wasser}) und die Spannungen für alle vier Würfelseiten (U_{schwarz} , $U_{\text{weiß}}$, U_{matt} und $U_{\text{spiegelnd}}$) gemessen und protokolliert. Die gesamte Durchführung des Versuchs lässt sich in zwei Teile gliedern. Im ersten Teil werden 5 Messreihen mit kochendem Wasser durchgeführt. Für den zweiten Teil kühlt man den Würfel durch Zugabe von kaltem Leitungswasser etwas ab. Danach werden die restlichen 5 Messreihen analog zum ersten Teil gemacht.

Teil 1:

1. Füllen Sie den Leslie-Würfel zu $3/4$ mit kochendem Wasser. Es muss dann etwa eine Minute gewartet werden, bis eventuelle Temperaturunterschiede ausgeglichen sind.
2. Schalten Sie das Voltmeter und den dazugehörigen elektronischen Verstärker ein, und stellen Sie die Thermosäule in etwa 15 cm Abstand vor den Würfel. Achten Sie darauf, dass die Würfelseite während der Messungen senkrecht zur Thermosäule ausgerichtet ist. Schätzen Sie den Messfehler ΔU ab und tragen Sie den Wert in Ihr Protokoll ein.
3. Lesen Sie zu Beginn der Messungen die Raumtemperatur T_r ab und notieren Sie diese.
4. Zur Nullpunktbestimmung (U_0) positionieren Sie die schwarze Abschirmplatte zwischen Leslie-Würfel und Thermosäule.
5. Bestimmen Sie nun nacheinander für alle vier Seiten des Würfels die Spannungen U_{schwarz} , $U_{\text{weiß}}$, U_{matt} und $U_{\text{spiegelnd}}$ über die Thermosäule. Protokollieren Sie die Wassertemperatur T_w für jede Würfelseite einzeln, da sich die Temperatur zu Anfang sehr schnell verändert. Beachten Sie außerdem, dass die Messelektronik eine Zeitkonstante besitzt, d.h. der Wert darf nach dem Drehen des Würfels erst nach ca. 20 sec. abgelesen werden.

- Warten Sie, bis sich die Wassertemperatur um 2 bis 3 K verringert hat. Dann wiederholen Sie die letzten beiden Arbeitsschritte (Bestimmung von U_0 und U_i für $i =$ alle Seiten des Würfels), insgesamt 5 mal.

Teil 2:

- Geben Sie so viel kaltes Wasser in den Leslie-Würfel, bis er komplett gefüllt ist.
- Warten Sie nach Zugabe des Wassers etwa 30 sec., und wiederholen Sie die Messung der verschiedenen Würfelseiten 5 mal. Auch hier sollten Sie zwischen den einzelnen Messreihen warten, bis sich das Wasser um etwa 2 bis 3 K abgekühlt hat.
- Lesen Sie am Ende der Messungen noch ein zweites Mal die Raumtemperatur ab. Verwenden Sie für die Auswertung dann den Mittelwert der beiden Werte.

Die Tabelle mit den Messwerten sollte diese Form besitzen:

Nr.	Raum		schwarz		weiß		matt		spiegelnd	
	U_0 [mV]	T_r [°C]	T_w^{schw} [°C]	U_{schw} [mV]	T_w^w [°C]	U_w [mV]	T_w^m [°C]	U_m [mV]	T_w^{sp} [°C]	U_{sp} [mV]
1										
⋮										
10										

Schalten Sie nach dem Versuch die Geräte ab und räumen Sie den Versuchsaufbau auf.

6 Auswertung und Diskussion (zu Hause)

Bitte führen Sie zu jedem Wert eine Fehlerrechnung durch. Geben Sie alle verwendeten Formeln an und erläutern Sie kurz, was Sie tun und warum. Zeichnen Sie Ihre Diagramme auf Millimeterpapier und beschriften Sie sie vollständig (Zu welcher Aufgabe gehört das Diagramm?, Was ist auf den Achsen aufgetragen?). Die korrekte Form zur Angabe von Ergebnissen, sowie Hinweise zur Fehlerrechnung und Geradenanpassung entnehmen Sie bitte der *Allgemeinen Praktikumsanleitung*.

6.1 Nachweis des Stefan-Boltzmann-Gesetzes

- Stellen Sie die Werte $(T_w^4 - T_r^4) \pm \Delta(T_w^4 - T_r^4)$ und $(U_i - U_0) \pm \Delta(U_i - U_0)$ in einer Tabelle zusammen.
- Tragen Sie die Spannung $U_i - U_0$ als Funktion der vierten Potenz der Temperatur $(T_w^4 - T_r^4)$ für alle vier Seiten des Würfels auf Millimeterpapier auf.
- Führen Sie eine graphische Geradenanpassung für drei der Würfelseiten durch; die vierte Seite soll mit Hilfe einer rechnerischen Geradenanpassung analysiert werden. Geben Sie als Endergebnis die Geradengleichungen in folgender Form an:

$$(U_i - U_0) = (a \pm \Delta a)(\pm \dots\%) \cdot (T_w^4 - T_r^4) + (b \pm \Delta b)(\pm \dots\%).$$

Die Steigung a und der y-Achsenabschnitt b besitzen physikalische Einheiten, die stets hinter dem Zahlenwert angegeben werden müssen.

- Aus der Steigung der Geraden lässt sich der Emissionskoeffizient berechnen. Setzen Sie dazu die Emissivität der am stärksten strahlende Würfelseite willkürlich auf 1,00. Man erhält die Emissivitäten der anderen Seiten dann durch Division der entsprechenden Steigungen. Achtung: Auch wenn die Emissivität der am stärksten strahlenden Seite auf 1,00 gesetzt wird, besitzt sie trotzdem einen Fehler!

6.2 Diskussion

Listen Sie alle Ergebnisse übersichtlich auf, d.h. die Geradengleichungen für alle vier Würfelseiten und die dazugehörigen Emissionskoeffizienten (inklusive Einheit und Fehler). Bewerten Sie ihre Ergebnisse. Wurde das Stefan-Boltzmann-Gesetz bestätigt? Entsprechen die Verläufe aller Graphen Ihren Erwartungen? Man würde erwarten, dass der y-Achsenabschnitt $b = 0$ wäre. Warum ist hier im Allgemeinen $b \neq 0$? Wie lassen sich die unterschiedlichen Emissionskoeffizienten erklären? Welche Fehlerquellen gibt es in diesem Versuch?

7 Literatur

- Fehlerrechnung:
http://www.astro.uni-koeln.de/teaching_seminars/AP/
<http://www.ph2.uni-koeln.de/fileadmin/Lehre/Anfaengerpraktikum/Fehler.pdf>
- Meschede und Gerthsen: Physik, Springer, Berlin, 24. Aufl., 2010
http://www.ub.uni-koeln.de/digital/e_books/index_ger.html
- Demtröder: Experimentalphysik 1, Springer, Berlin, 6. Auflage, 2013
http://www.ub.uni-koeln.de/digital/e_books/index_ger.html
- Tipler: Physik, Spektrum, Heidelberg, 3. Auflage, 2000
- Westphal: Physikalisches Praktikum, Vieweg+Teubner
- Walcher, Elbel und Fischer: Praktikum der Physik, Teubner Studienbücher Physik
- Wegener: Physik für Hochschulanfänger, Teubner Studienbücher Physik
- Java- Applet der University of Oregon zur Verdeutlichung des Planck-Gesetzes
<http://jersey.uoregon.edu/vlab/PlankRadiationFormula/index.html>
- Wikipedia - u.a. Stefan-Boltzmann Gesetz,
<http://de.wikipedia.org>

8 Sicherheitshinweise

Bitte beachten Sie die allgemeinen Sicherheitshinweise, die in der Praktikumsanleitung dargelegt wurden.

Insbesondere besteht Verbrennungsgefahr durch kochendes Wasser und den heißen Würfel.