

Versuch D 8: Temperaturstrahlung

1. Literatur: Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. III, Optik
 Pohl, Einführung in die Physik, Bd. III, Optik
 Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik
 Walcher, Praktikum der Physik

Stichworte: Schwarzer Körper, absolute Temperatur, Temperaturstrahlung, Emissions- und Absorptionsvermögen, Kirchhoffsches Gesetz, Plancksches Strahlungsgesetz, Wiensches Verschiebungsgesetz, Strahlungsgesetz von Stefan-Boltzmann, Strahlungsgesetz von Wien, grauer Strahler, Pyrometer, Thermosäule

2. Grundlagen

2.1 Temperaturstrahlung (Kirchhoffsches Gesetz)

Jeder auf einer absoluten Temperatur $T > 0$ (gemessen in *Kelvin*) befindliche Körper sendet in seine Umgebung Strahlung (elektromagnetische Wellen) aus, deren Energie und spektrale Intensität (Bandbreite) im wesentlichen von der Temperatur des Körpers abhängen (*Temperaturstrahlung*). Die spektrale Bandbreite verdeutlicht ein Vergleich der Sonne mit einem Heizkörper. Die Sonne (Oberflächentemperatur $T = 5700$ K) emittiert Strahlung sowohl im ultravioletten und sichtbaren Bereich (Wellenlänge $\lambda = 400-800$ nm) als auch im ultraroten Bereich (Wärmestrahlung), ein Heizkörper mit $T = 350$ K jedoch ausschließlich Strahlung im UR-Bereich und diese, erfahrungsgemäß, auch mit wesentlich geringerer Strahlungsleistung. Während 1 m^2 Oberfläche der Sonne in den Halbraum eine über die spektrale Bandbreite integrierte Strahlungsleistung bzw. einen Strahlungsfluss $\Phi = 6,1 \times 10^7 \text{ W}$ aussendet, strahlt 1 m^2 Fläche des Heizkörpers mit $T = 350$ K einen um den Faktor 10^5 kleineren Fluss in den Halbraum ab.

Der Strahlungsfluss $d\Phi$, der von einem Flächenelement dF eines auf der Temperatur T befindlichen Temperaturstrahlers in den Halbraum vor seiner Oberfläche im Wellenlängenintervall zwischen λ und $\lambda + d\lambda$ ausgesandt wird, ist gegeben durch:

$$d\Phi = E(\lambda, T) dF d\lambda \quad (1)$$

Die Größe $E(\lambda, T)$ wird *Emissionsvermögen* genannt. Sonne und Heizkörper unterscheiden sich also, wie oben verdeutlicht, in ihrem Emissionsvermögen - sowohl in dessen spektraler Verteilung als auch in dessen Integral über alle Wellenlängen.

Strahlung wird von Körpern nicht nur emittiert sondern auch absorbiert bzw. reflektiert (Durchlässigkeit wird hier nicht beachtet). Entsprechend definiert man das *Absorptionsvermögen* A eines Körpers als das Verhältnis von absorbiertem zu auftreffendem Strahlungsfluss bzw. das *Reflexionsvermögen* R als das Verhältnis von reflektiertem zu auftreffendem Strahlungsfluss. A und R sind ihrer Definition nach dimensionslose Größen. Es gilt:

$$R = 1 - A \quad (2)$$

wenn die Durchlässigkeit $D = 0$ ist. Die Größen A und R hängen von der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung, der Temperatur des Körpers sowie - und das ist nachteilig - von seinen physikalischen Eigenschaften wie z.B. seiner Oberflächenbeschaffenheit ab ($A(\lambda, T, \dots)$, $R(\lambda, T, \dots)$).

Um von diesen Materialeigenschaften unabhängig zu werden, betrachte man zwei beliebige Körper 1 und 2 in festem Abstand (klein relativ zu ihren Abmessungen) gegenübergestellt. Im stationären Zustand (beide Körper auf gleicher Temperatur) strahlt Körper 1 nach 2 den Fluss Φ_1 , außerdem reflektiert er den nicht absorbierten Bruchteil $(1 - A_1)$, des von 2 zurückgestrahlten Flusses Φ_2 . Entsprechendes gilt für die von 2 nach 1 gesandte Strahlung. Im Gleichgewicht ist:

$$\Phi_1 + (1 - A_1)\Phi_2 = \Phi_2 + (1 - A_2)\Phi_1$$

bzw.
$$\frac{\Phi_1}{A_1} = \frac{\Phi_2}{A_2} \quad (3)$$

Dem folgt mit Gl. (1) das *Gesetz von Kirchhoff*:

$$\frac{E_1(\lambda, T)}{A_1(\lambda, T)} = \frac{E_2(\lambda, T)}{A_2(\lambda, T)} = f(\lambda, T) \quad (4)$$

Diese Beziehung gilt für zwei ganz beliebige Körper. Daher muss das Verhältnis $E(\lambda, T)/A(\lambda, T)$ von allen Materialeigenschaften unabhängig sein und kann nur von λ und T abhängen. Diese Aussage heißt *Kirchhoffsches Gesetz*.

Eine Sonderstellung bei der physikalischen Beschreibung von Strahlungsvorgängen nimmt der sog. *schwarze Körper* ein. Ein schwarzer Körper absorbiert die gesamte auftreffende Strahlung, d.h. sein Absorptionsvermögen ist für alle Temperaturen und Wellenlängen gleich 1; $A_s = 1$. Dies bedeutet mit Gl. (4), dass auch das Emissionsvermögen eines schwarzen Körpers größer als das aller anderen nicht schwarzen Körper ist und dass die Funktion $f(\lambda, T)$ in Gl. (4) dem Emissionsvermögen des schwarzen Körpers $E_s(\lambda, T)$ entspricht. Damit erhält das Kirchhoffsche Gesetz, Gl. (4), die Form:

$$\frac{E(\lambda, T)}{A(\lambda, T)} = E_s(\lambda, T) \quad (5)$$

In der Natur kommt kein absolut schwarzer Körper vor. Er lässt sich jedoch experimentell in guter Näherung durch einen allseitig geschlossenen Hohlkörper (Ofen) mit einem kleinen Loch im Deckel realisieren. Die durch die Öffnung eintretende Strahlung wird durch Vielfachreflexion an den Innenwänden so stark geschwächt, dass näherungsweise kein Anteil durch die Öffnung wieder nach außen tritt, d.h. die auftreffende Strahlung vollständig absorbiert wird.

Als einen *grauen Strahler* bezeichnet man einen Körper, dessen Absorptionsvermögen von der Wellenlänge und Temperatur unabhängig ist und einen Wert $A < 1$ hat. Im Unterschied zum schwarzen Körper können viele in der Natur vorkommende Strahler (wie auch die im Versuch vorliegende Lampe) als graue Strahler bezeichnet werden, meist jedoch nur für einen beschränkten Spektralbereich.

2.2 Strahlungsgesetz des schwarzen Körpers

Für das Emissionsvermögen des schwarzen Körpers $E_s(\lambda, T)$ wurde 1900 von Max Planck eine die Quantenmechanik begründende Formel vorgeschlagen, deren Richtigkeit durch das Experiment und spätere quantenmechanische Ableitung bewiesen wurde. Wesentlich hierbei ist, dass das elektromagnetische Strahlungsfeld bei der Wechselwirkung mit dem schwarzen Körper Energie nur quantenhaft mit seinen Atomen austauschen kann. Dies bedeutet, dass die Aufnahme und Abgabe von Energie des Strahlungsfeldes nicht klassisch in beliebiger kleiner Menge sondern nur in einem Vielfachen der sog. *Photonenenergie* $\Delta E = h\nu = hc/\lambda$ erfolgen kann (ν = Strahlungsfrequenz, h = Plancksches Wirkungsquantum).

Die Oszillatoren, die im Hohlraum des schwarzen Körpers alle untereinander in

Wechselwirkung stehen, sind bei $T = 0$ in Ruhe (Nullpunktsenergie vernachlässigt) und werden mit steigender Temperatur bzw. thermischer Energie $k_B T$ immer mehr angeregt (k_B = Boltzmann-Konstante, $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K). Dabei wird Strahlung mit dem schwarzen Körper ausgetauscht.

Für das Emissionsvermögen $E_s(\lambda, T)$ des schwarzen Körpers ergibt sich das *Plancksche Strahlungsgesetz**:

$$E_s(\lambda, T) = 2\pi \frac{hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (6)$$

bzw.

$$E_s(\lambda, T) = 2\pi \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (7)$$

mit den Konstanten: $c_1 = hc^2 = 5,96 \times 10^{-17}$ W m²
 $c_2 = hc/k_B = 1,439 \times 10^{-2}$ m K.

Abb. 1 zeigt zwei Strahlungsisothermen $E_s(\lambda, T)$ des Planckschen Gesetzes (sichtbarer Bereich schraffiert). Man beachte die Einheiten von E_s !

Die historisch schon früher bekannten Strahlungsgesetze von Wien und Rayleigh-Jeans ergeben sich näherungsweise aus der Planckschen Formel, Gl. (6,7). Für den Grenzfall $hc/\lambda \gg k_B T$, d.h. $\lambda T \ll 1,4 \times 10^{-2}$ m K kann man die 1 im Nenner der Gl. (7) vernachlässigen, und es ergibt sich für den kurzwelligen Teil des Spektrums das *Strahlungsgesetz von Wien*:

$$E_s(\lambda, T) = 2\pi \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (8)$$

*) In der Literatur findet man die Plancksche Strahlungsformel, Gl.(6) u. (7), häufig für die *spektrale Strahlungsdichte* $S_s(\lambda, T)$ des schwarzen Körpers, die der (spektralen) Strahlungsleistung der Flächeneinheit in die Raumwinkelseinheit (Flächeneinheit auf der Einheitskugel) senkrecht zur Oberfläche entspricht und sich vom Emissionsvermögen $E_s(\lambda, T)$ lediglich um den Faktor π unterscheidet: $E_s(\lambda, T) = \pi S_s(\lambda, T)$. Den Faktor π erhält man durch Integration von S_s über den Halbraum (2π) unter Berücksichtigung aller Abstrahlungsrichtungen.

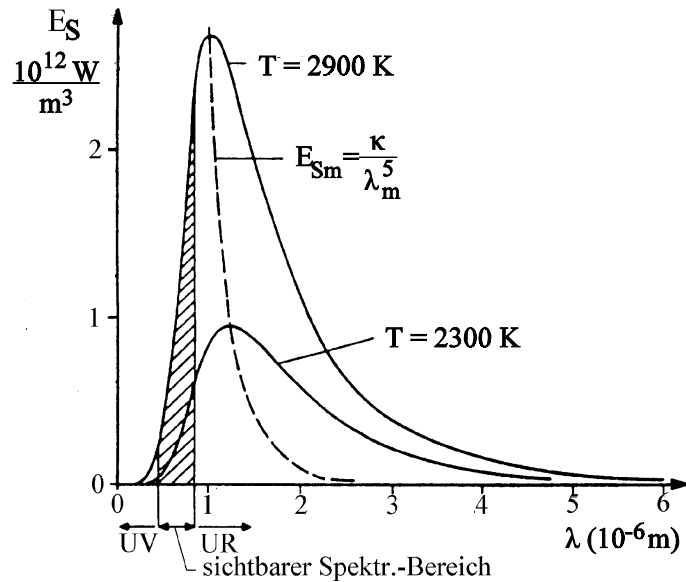


Abb.1: Strahlungsisothermen $E_S(\lambda, T_i)$ des Planckschen Gesetzes (—), Maxima $E_{Sm}(\lambda_m, T)$ (---)

Dieses Gesetz ist für die Pyrometrie wichtig, da es im sichtbaren Bereich für Temperaturen bis ca. 5000 K gilt und das spektrale Emissionsvermögen des schwarzen Körpers durch die Temperatur eindeutig bestimmbar ist (und umgekehrt!). Der andere Grenzfall $hc/\lambda \ll k_B T$ (große Wellenlängen, Strahlungsformel von Rayleigh-Jeans) soll hier nicht näher betrachtet werden.

Jede Plancksche Isotherme besitzt, wie Abb. 1 zeigt, ein Maximum bei einer bestimmten Wellenlänge λ_m . Mit der Bedingung $dE_S(\lambda, T)/d\lambda = 0$ folgt aus Gln. (7,8) das *Wiensche Verschiebungsgesetz*:

$$\lambda_m T = \text{const.} = w = 2,897 \times 10^{-3} \text{ mK} \quad (9)$$

Mit zunehmender Temperatur verschiebt sich also das Maximum zu kürzeren Wellenlängen (und umgekehrt). Die Maxima der Strahlungsisothermen liegen auf einer Hyperbel $E_{Sm}(\lambda_m)$ (in Abb.1 gestrichelt gezeichnet), die sich aus der Gl. (7) ergibt, wenn man dort aus Gl. (9) w/λ_m für T einsetzt:

$$E_{Sm}(\lambda_m) = \frac{\kappa}{\lambda_m^5} \quad \text{mit } \kappa = 2,63 \times 10^{-18} \text{ W m}^2 \quad (10)$$

Entsprechend ergibt sich das Emissionsvermögen im Strahlungsmaximum als Funktion der Temperatur zu

$$E_{Sm}(T) = \tau T^5 \quad \text{mit } \tau = 1,29 \times 10^{-5} \text{ W m}^{-3} \text{ K}^{-5} \quad (11)$$

Dies bedeutet, dass bei der Temperatur $T_2 = T_1/2$ einer vorgegebenen Temperatur T_1 das Emissionsvermögen im Maximum nur noch 1/32 des Wertes bei T_1 beträgt. Im Sonnenspektrum beobachtet man den Höchstwert E_{Sm} bei der Wellenlänge $\lambda_m = 480 \text{ nm}$ (grün). Dem entspricht ein schwarzer Körper mit $T \approx 6000 \text{ K}$.

Der gesamte von einer (ebenen) Fläche F eines schwarzen Strahlers in den Halbraum ausgestrahlte Fluss (Leistung) pro Flächeneinheit (strahlender Fläche) Φ/F ergibt sich aus den Gleichungen (1) und (6) durch Integration über die Wellenlänge zu:

$$\frac{\Phi}{F} = \int_{\lambda=0}^{\infty} E_S(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{Stefan-Boltzmann-Gesetz} \quad (12)$$

mit $\sigma = 2\pi^5 k_B^4 / 15 c^2 h^3 = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

2.3 Pyrometrie

Pyrometer sind Geräte zur berührungslosen Messung hoher Temperaturen ($T > 1000 \text{ K}$), z.B. metallischer Schmelzen (Hochofen) und werden bevorzugt in Bereichen eingesetzt, wo die Anwendung von Thermoelementen nicht mehr möglich ist. Ein Pyrometer (s. Abb. 2) besteht aus einem Fernrohr, in dessen Zwischenebene ein gebogener Glühfaden einer Wolframlampe angebracht ist. Durch einen regelbaren Widerstand R im Lampenkreis lässt sich der Strom durch die Wolframlampe - und damit deren Helligkeit - variieren. Mit dem Objektiv wird der zu untersuchende Strahler (Schmelze, glühender Körper, Lampe) in die Glühfadenebene abgebildet und der Regelwiderstand so eingestellt, dass die Helligkeit des Glühfadens gerade mit der des Messobjektes übereinstimmt. Diese entspricht einem ganz bestimmten Wert des Stromes I durch den Wolframfaden.

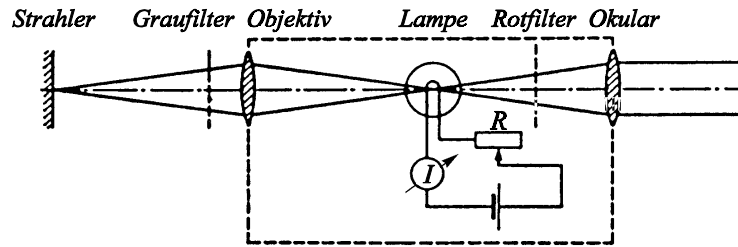


Abb.2: Pyrometer, schematisch

Durch ein in den Strahlengang des Pyrometers eingeschobenes Rotfilter ist man bei der Beobachtung auf einen kleinen Spektralbereich $\Delta\lambda$ um 660 nm beschränkt (Teilstrahlprometer).

Die vom menschlichen Auge registrierte Helligkeit eines Temperaturstrahlers ist proportional zu seinem Emissionsvermögen im betrachteten Spektralbereich. Bei gleicher Helligkeit der Pyrometerlampe und des Messobjektes haben zwar beide das gleiche Emissionsvermögen jedoch i.a. nicht die gleiche Temperatur, da - wie die Diskussion in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt hat - selbst für einen vorgegebenen (engen) Spektralbereich das Emissionsvermögen nicht nur von der Temperatur sondern auch von der Art des Strahlers abhängt. Zur Kalibrierung eines Pyrometers, dessen Lampenstrom nach dem Abgleich eine eindeutige Funktion der Temperatur des Messobjektes ist, verwendet man die Strahlung eines schwarzen Körpers. Die abgelesene Temperatur nennt man *schwarze Temperatur* T_s . Sie ist für das untersuchte Messobjekt nur gleich seiner wahren Temperatur T , wenn dieses auch wie ein schwarzer Körper strahlt. Dies ist - wie schon erwähnt - in der Praxis nicht der Fall, da man es (für einen engen Spektralbereich) i.a. mit grauen Strahlern ($A = \text{const} < 1$) zu tun hat.

Befinden sich ein schwarzer und ein grauer Strahler auf gleicher Temperatur, so ist (mit Gl. (4)) das Emissionsvermögen (d.h. die Helligkeit) des grauen Strahlers um sein Absorptionsvermögen ($A < 1$) geringer als das des schwarzen Strahlers. Wenn ein schwarzer und ein grauer Strahler in einem bestimmten Spektralbereich die gleiche Helligkeit zeigen, muss deshalb die (wahre) Temperatur T des grauen Strahlers stets größer als seine schwarze Temperatur T_s sein, welche zugleich die (wahre) Temperatur des schwarzen Strahlers ist.

Um eine Beziehung zwischen T und T_s herzustellen, reicht es für die praktische Anwendung aus, das Wiensche Strahlungsgesetz (Gl.(8)) anzuwenden, da λT

genügend klein ist. Mit Gl. (5) gilt bei gleicher Helligkeit (Emissionsvermögen) von Messobjekt (E) und Wolframfaden des Pyrometers (E_s):

$$E(\lambda, T) = AE_s(\lambda, T) = E_s(\lambda, T_s) \quad (13)$$

Durch Verhältnisbildung folgt mit Gl. (8):

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} = \frac{\lambda}{c_2} \ln A \quad (14)$$

Diese Gleichung gilt exakt für einen grauen Strahler, kann jedoch mit hinreichender Genauigkeit auch auf Metalle angewendet werden, bei denen die Temperaturabhängigkeit des Absorptionsvermögens nur gering ist. Da Metalle jedoch i.a. ein großes Reflexionsvermögen R und damit kleines Absorptionsvermögen A besitzen, kann die Abweichung zwischen T und T_s beträchtlich sein.

Aus Gleichung (14) folgt durch Umformen:

$$T = T_s \frac{1}{1 + T_s \frac{\lambda}{c_2} \ln A} = T_s k(T_s) \quad (15)$$

Der Korrekturfaktor $k(T_s)$ ist für die im Versuch verwendete Wolframglühlampe in Abschnitt 4 angegeben.

2.4 Thermosäule

Abb. 3 zeigt schematisch den Aufbau einer Thermosäule zur Bestimmung der Gesamtstrahlungsleistung eines Temperaturstrahlers. Sie besteht aus einem hohlen Metallzylinder H mit einer Öffnung an einem Ende, in den die Strahlung R eintritt. Sie wird an der konischen Innenwand des Zylinders reflektiert und auf die geschwärzte Oberfläche eines Sensorelements S geleitet, wo sie absorbiert wird. Dadurch erhöht sich die Temperatur des Sensors um einen kleinen Betrag ΔT über die Temperatur des Gehäuses H . Die Temperaturdifferenz ΔT zwischen H und S erzeugt in mehreren in Reihe geschalteten Thermoelement-Paaren A, B eine Thermospannung U_{Th} , die mit einem Millivoltmeter gemessen wird. Für kleine Temperaturunterschiede ist U_{Th} proportional zu ΔT und proportional zur absorbierten Strahlungsleistung (Strahlungsfluss Φ) so dass

$$U_{Th} = c \Phi, \quad c = 0.16 \frac{\text{mV}}{\text{mW}} \quad (\text{Herstellerangabe}) \quad (16)$$

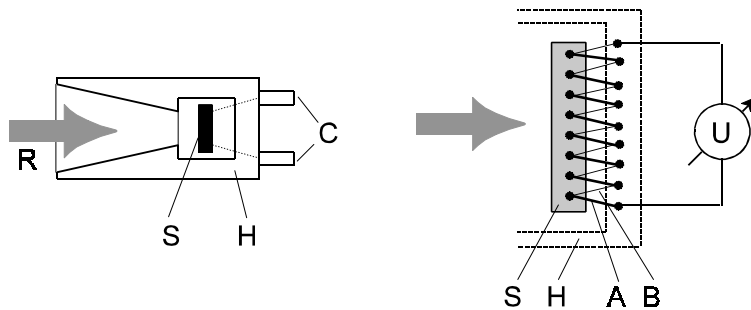


Abb. 3: Thermosäule schematisch: Links: Längsschnitt mit einfallender Strahlung R, Sensorelement S, Gehäuse H, elektrischem Anschluss C; rechts: Anschluss des Millivoltmeters U an die in Reihe geschalteten Thermoelement-Paare A, B

3. Aufgabenstellung

- 1. Aufgabe:** Der von einer Thermosäule registrierte Strahlungsfluss einer Wolframglühlampe ist als Funktion ihrer Wendeltemperatur zu bestimmen, die mit einem Teilstrahlpyrometer gemessen wird. Die Temperaturabhängigkeit des Strahlungsflusses ist mit der Temperaturabhängigkeit der von der Lampe aufgenommenen elektrischen Leistung zu vergleichen.
- 2. Aufgabe:** Der von der Öffnung eines geheizten Graphit-Hohlkörpers auf eine Thermosäule treffende Strahlungsfluss ist für verschiedene Temperaturen des Körpers zu bestimmen und mit der Strahlungsleistung eines schwarzen bzw. idealen grauen Strahlers zu vergleichen.

Für beide Teilversuche ist die Gültigkeit des Stefan-Boltzmann-Gesetzes zu überprüfen.

4. Versuchsdurchführung und Auswertung

4.1 Strahlung der Glühlampe

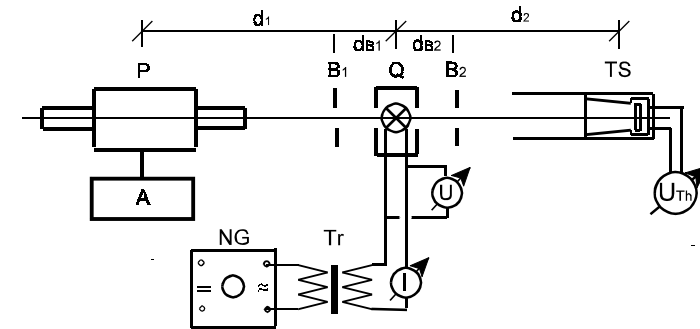


Abb.4: Versuchsaufbau zur Temperatur- und Strahlungsleistungsmessung der Glühlampe: Q Glühlampe; P Teilstrahlpyrometer mit Anzeigeeinheit A; TS Thermosäule mit Spannungsmesser U_{Th} ; NG Wechselspannungsnetzgerät mit Transformator Tr und Strom-, Spannungsmessern I, U; $B_{1,2}$ Blenden; Abstände $d_{1,2}$ bzw $d_{B1, B2}$ siehe Text

Den Versuchsaufbau zeigt Abb. 4 schematisch: Die zu untersuchende Wolframglühlampe Q wird an ein variables Wechselspannungsnetzgerät NG mit nachgeschaltetem Transformator Tr angeschlossen. Ihre aufgenommene elektr. Leistung P_{el} wird mit Strom- und Spannungsmessgeräten I und U bestimmt. Die an der Lampe anliegende Spannung U wird zwischen 1 und 5 V in Schritten von ca. 0,5 V in auf- und absteigender Folge variiert. Mit dem Teilstrahlpyrometer P ist die (schwarze) Temperatur $t_s(U)$ der Glühlampenwendel, mit der Thermosäule TS die Thermospannung $U_{Th}(U)$ entsprechend dem absorbierten Strahlungsfluss $\Phi(U)$ zu bestimmen.

4.1.1 Teilstrahlpyrometer

Die Messung der Glühlampenwendeltemperatur t_s erfolgt mit dem Teilstrahlpyrometer P. Vor Beginn der Messungen ist die Blende B_1 (eine verstellbare Irisblende im Abstand $d_{B1} \approx 15$ cm) so einzustellen, dass die Objektivöffnung des Pyrometers gerade ausgeleuchtet ist, d.h. die andere Experimente störende Streustrahlung minimiert wird. Dann wird das Pyrometer durch zwei Stellräder am Stativ auf die Glühlampenwendel gerichtet. Das dem Betrachter zugewandte Okular des

Pyrometers ist zunächst (am Stellring vor der Augenklappe) so einzustellen, dass der leuchtende Glühfaden der Pyrometerlampe scharf sichtbar ist. Darauf wird die Wendel der zu untersuchenden Glühlampe in der Ebene des Glühfadens der Pyrometerlampe abgebildet (fokussiert). Dies geschieht durch Variation der Position der Objektivlinse durch ein Stellrad am Pyrometer. Voraussetzung für eine ausreichende Fokussierung ist ein genügend großer Abstand $d_1 \geq 160$ cm zwischen Pyrometer und Glühlampe. Nach Einschalten des Rotfilters (an der dem Betrachter zugewandten Seite des Pyrometers) wird die Pyrometerlampe durch die Grob- und Feinregelung (an der linken und rechten Seite des Pyrometers) auf gleiche Helligkeit mit der Glühlampenwendel gebracht. Zur Erweiterung des Messbereiches kann am Pyrometer (ebenfalls an der Rückseite) ein Graufilter vorgeschaltet werden. Für die Schalterstellung am Pyrometer und entsprechend an der Anzeigeeinheit gelten folgende Temperaturbereiche:

Temperaturbereich t_s (°C)	Schalterstellung	
	Anzeigeeinheit	Pyrometer
650 - 1450	I	1 (ohne Graufilter)
1450 - 3000	II	2 (mit Graufilter)

Für jede Betriebsspannung der Glühlampe ist aus jeweils drei Pyrometerabgleichungen der Mittelwert für die angezeigte *schwarze Temperatur* t_s (in °C) zu bestimmen.

4.1.2 Thermosäule

Auf der dem Teilstrahlpyrometer gegenüber liegenden Seite der Glühlampe ist im Abstand $d_2 = 50$ cm die Thermosäule TS mit dem Spannungsmesser der Thermospannung U_{Th} aufgestellt. Ein auf die Thermosäule aufgesteckter Tubus minimiert den Eintritt von Streustrahlung in die Thermosäule. Die im Abstand $d_{B2} = 10$ cm aufgestellte Blende B_2 (12 mm Ø) verhindert den Eintritt der Wärmestrahlung des Lampengehäuses in die Thermosäule.

Der Spannungsmesser U_{Th} ist mindestens 10 min. vor Beginn der Messungen mit der Glühlampe einzuschalten (Digitalvoltmeter: 20mV-Bereich; 1µV Auflösung). Danach ist (bei ausgeschalteter Lampe) die Anzeige möglichst genau auf Null (± 2 Digits) einzustellen.

Warten Sie nach jeder Neueinstellung der Betriebsspannung U für die Glühlampe, bis sich die Anzeige U_{Th} (einigermaßen) stabilisiert hat. Geringe Änderungen von U_{th} sind auch durch Schwankungen der Betriebsspannung U bedingt.

4.1.3 Auswertung

In der Auswertung der Messungen wird aus der schwarzen Temperatur t_s (in °C) die (wahre) Temperatur T (in K) des grauen Strahlers (Wolfram) ermittelt, indem die (schwarze) Kelvin-Temperatur T_s mit dem temperaturabhängigen Faktor $k(T_s)$ korrigiert wird (vergl. Gl. (15)):

$$T = k(T_s)T_s \quad \text{mit} \quad T_s = t_s + 273 \text{ K}$$

Die Werte für $k(T_s)$ im betrachteten Spektralbereich (Rotfilter) entnehme man der nachfolgenden Tabelle durch Interpolation.

T_s (K)	k	T_s (K)	k
800	1,028	2000	1,083
1000	1,036	2200	1,092
1200	1,045	2400	1,103
1400	1,054	2600	1,114
1600	1,063	2800	1,125
1800	1,073	3000	1,136

Tabelle: Korrekturfaktor $k(T_s)$ für Wolfram

Aus den gemessenen Thermospannungen $U_{th}(U)$ sind mittels Gl.(16) die Strahlungsleistungen $\Phi(U)$ zu berechnen.

Für die weitere Auswertung wird angenommen, dass die Wolframwendel einen angenähert idealen grauen Strahler darstellt und die vierte Potenz der Kelvin-Temperatur der Thermosäule im Vergleich zur vierten Potenz der Kelvin-Temperatur der Glühwendel zu vernachlässigen ist. Ebenfalls angenommen wird, dass die von der Lampe aufgenommene elektr. Leistung $P_{el} = IU$ zum größten Teil

in Form von Strahlung abgegeben wird. Man prüfe die Gültigkeit des Stefan-Boltzmann-Gesetzes, Gl.(12), mit den Ansätzen

$$\Phi = aT^n \quad \text{bzw.} \quad P_{el} = bT^m$$

Zur Bestimmung der Potenzen n bzw. m der Temperaturabhängigkeiten von Φ bzw. P_{el} sind $\Phi(T)$ sowie $P_{el}(T)$ doppelt logarithmisch auf Millimeterpapier (bzw. mit dem PC) in geeignetem Maßstab aufzutragen, also $\ln(\Phi/\Phi_1)$ sowie $\ln(P_{el}/P_1)$ als Funktion von $\ln(T/T_1)$ darzustellen. Φ_1 , P_1 und T_1 sind hierbei willkürlich festzulegende Einheitsgrößen.

$$\ln\left(\frac{\Phi}{\Phi_1}\right) = n \ln\left(\frac{T}{T_1}\right) + \ln a \quad \text{bzw.} \quad \ln\left(\frac{P_{el}}{P_1}\right) = m \ln\left(\frac{T}{T_1}\right) + \ln b$$

Aus den Steigungen n bzw. m von Ausgleichsgeraden durch die Messpunkte sind die Exponenten n und m bestimmen.

Diskutieren Sie zunächst das Ergebnis für n und m hinsichtlich der Auswirkung möglicher systematischer Abweichungen vom geradlinigen Verlauf der Messpunkte in den obigen Auftragsungen (Potenzgesetze). Betrachten Sie zur Diskussion (bzw. Korrektur) einzelner möglicher Mess- oder Ablesefehler insbesondere bei der Temperaturbestimmung den elektrischen Widerstand $R(T)$ der Glühlampe, indem Sie R über T auftragen. Der elektrische Widerstand R sollte nahezu linear mit der Wendeltemperatur T ansteigen.

Diskutieren Sie danach mögliche Ursachen für Abweichungen für n vom Stefan-Boltzmann-Gesetz ($n = 4$) für die von der Thermosäule aufgenommene Strahlungsleistung sowie für Abweichungen m vom Energiesatz, d.h. der angenommenen Energiedissipation der Lampe lediglich durch Strahlung ($m = 4$).

4.2 Strahlung des Graphit-Hohlkörpers

Den Versuchsaufbau zur Messung der Gesamtstrahlungsleistung eines Graphit-Hohlkörpers zeigt Abb. 5. Der Hohlkörper wird mit Gleichstrom beheizt. Der Strommesser I dient zur Kontrolle der Heizleistung und zur Einstellung der Aufwärmgeschwindigkeit. Die Temperatur t wird mit einem Thermoelement mit digitaler Temperaturanzeige bestimmt. Der Abstand der Stative von Hohlkörper HK und Thermosäule TS sollte $d_3 = 40$ cm betragen. Die Blende B_3 (1,6 cm \varnothing , $F = 2,01$ cm²) im Abstand $d_{B3} = 8$ cm verhindert, dass Strahlung des Hohlkörper-

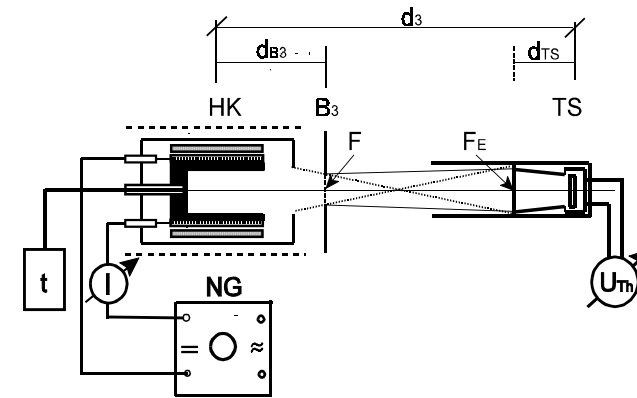


Abb. 5: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Strahlungsleistung des Graphit-Hohlkörpers HK ; NG DC-Netzgerät zur Heizung mit Strommesser I ; t Temperaturmessgerät; B_3 Blende; TS Thermosäule mit Spannungsmesser U_{Th}

gehäuses von der Thermosäule erfasst wird. Sie begrenzt zugleich die strahlende Fläche auf $\approx F$. Die Fläche der Eintrittsöffnung der Thermosäule beträgt $F_E = 4,52$ cm² und liegt um $d_{TS} = 4$ cm vor dem Stativ von TS .

Es sind Messungen von Temperatur t und Thermospannung U_{Th} bei steigender Temperatur zwischen Raumtemperatur und 500°C in Schritten von ca. 20°C durchzuführen. Stellen Sie vor Beginn der Messungen das Millivoltmeter U_{Th} wie zuvor bei der Glühlampenstrahlung auf Null.

Beginnen Sie das Aufheizen des Hohlkörpers zunächst mit geringem Heizstrom (ca. 2 A). Die Aufheizrate sollte ungefähr 20°C / min betragen. Dies wird mit folgenden Strömen erreicht:

>60°C: 3 A; >140°C: 3,5 A; >180°C: 4 A; >300°C: 4,5A; >400°C: 5A

Nach der letzten Messung bei ca. 500°C ist die Heizung sofort auszuschalten, so dass die Temperatur nicht weiter ansteigt.

In der Auswertung ist die von der Thermosäule registrierte Thermospannung U_{Th} über der Kelvintemperatur T^4 des Hohlkörpers aufzutragen und eine Ausgleichsgerade durch die Messpunkte zu zeichnen.

$$U_{Th} = s T^4 - \text{const.}$$

Die Konstante berücksichtigt, dass die Thermospannung bei Raumtemperatur gleich Null gesetzt wurde. Der Vergleich der Steigung s der Geraden mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz, Gl. (12) sowie mit Gl. (16) ergibt:

$$s = \frac{\Delta U_{\text{Th}}}{\Delta T^4} = c A F \frac{\Omega}{\pi} \sigma \quad (17)$$

Hierbei sind c die Konstante aus Gl. (16), A das Absorptionsvermögen des Hohlkörpers, F seine strahlende Fläche, $\Omega = F_E / (d_3 - d_{B3} - d_{TS})^2$ der Raumwinkel der von der Thermosäule erfassten Strahlung und σ die Stefan-Boltzmann-Konstante. Der Faktor π berücksichtigt den Raumwinkel 2π des Halbraums in Gl. (12) sowie einen Faktor 2 infolge (nahezu) senkrechter Abstrahlung des Hohlkörpers.

Bestimmen Sie aus dem Messergebnis über Gleichung (17) das Absorptionsvermögen A des Hohlkörpers. Da der Hohlkörper kein perfekter schwarzer Strahler ist, sollte $A < 1$ sein. Diskutieren Sie Ihr Ergebnis für A und mögliche systematische Fehlerquellen des Experiments

5. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) Was versteht man unter *Temperaturstrahlung*?
- 2) Wie lautet das *Kirchhoffsche Gesetz*?
- 3) Wie hängen die Absorption und Reflexion zusammen, wenn die Durchlässigkeit Null ist?
- 4) Was versteht man unter einem *Schwarzen Körper*?
- 5) Wie lautet das *Kirchhoffsche Gesetz*, wenn man das Emissionsvermögen des schwarzen Strahlers berücksichtigt?
- 6) Was ist ein *Grauer Strahler*?
- 7) Wie lautet die *Plancksche Strahlungsformel*?
- 8) Unter welcher Grenzbedingung erhält man daraus das *Strahlungsgesetz von Wien* und wie lautet es?
- 9) Wie lautet das *Wiensche Verschiebungsgesetz*?
- 10) Wie lautet das *Strahlungsgesetz von Stefan-Boltzmann* und wie erhält man es aus dem Plancksches Strahlungsgesetz?

- 11) Wie arbeitet ein *Pyrometer*?
- 12) Was versteht man unter der *Schwarzen Temperatur* eines Grauen Strahlers?
- 13) Ist die wahre Temperatur größer oder kleiner als die schwarze Temperatur?
- 14) Wie funktioniert ein Strahlungsempfänger mit einer *Thermosäule*?