

Stefan-Boltzmann-Gesetz: Temperaturabhängige Messung der Strahlungsintensität eines „Schwarzen Körpers“

Versuchsziele

- Relativmessung der Strahlungsintensität eines Rohrofens mit Schwarzkörperzusatz im Temperaturbereich von 300–750 K mit einer Thermosäule nach *Moll*
- Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Strahlungsintensität und absoluter Temperatur zur Bestätigung des *Stefan-Boltzmann-Gesetzes*

Grundlagen

Jeder Körper emittiert Temperatur- bzw. Wärmestrahlung. Die Intensität dieser thermisch angeregten elektromagnetischen Strahlung nimmt mit steigender Temperatur des Körpers zu und hängt außerdem von der Oberfläche des Körpers ab. Bei einer bestimmten Wellenlänge emittiert der Körper um so mehr Wärmestrahlung, je besser er diese Strahlung absorbieren kann.

Als *Schwarzen Körper* bezeichnet man einen Körper, der Wärmestrahlung sämtlicher Wellenlängen vollständig absorbiert. Auf *Kirchhoff* geht der Vorschlag zurück, als nahezu ideal Schwarzen Körper einen Hohlraum zu verwenden. Der Schwarze Körper hat den höchsten Absorptionsgrad und damit bei gegebener Temperatur und Wellenlänge auch den höchsten Emissionsgrad.

Das *Stefan-Boltzmann-Gesetz* besagt, daß die gesamte abgestrahlte Leistung eines Schwarzen Körpers proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur T zunimmt. Genauer ist die spezifische Ausstrahlung M , also die gesamte auf die strahlende Fläche bezogene, auf einer Seite der Fläche abgestrahlte Leistung, gegeben durch

$$M = \sigma T^4 \quad (I)$$

$$(\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \text{ Stefan-Boltzmann-Konstante})$$

Der Schwarze Körper absorbiert zugleich Strahlung aus der Umgebung. Gemessen wird daher nicht die gesamte abgestrahlte Leistung, sondern die dem Schwarzen Körper durch Strahlung *entzogene* Leistung M' . Die aus der Umgebung zugestrahlte Leistung ist

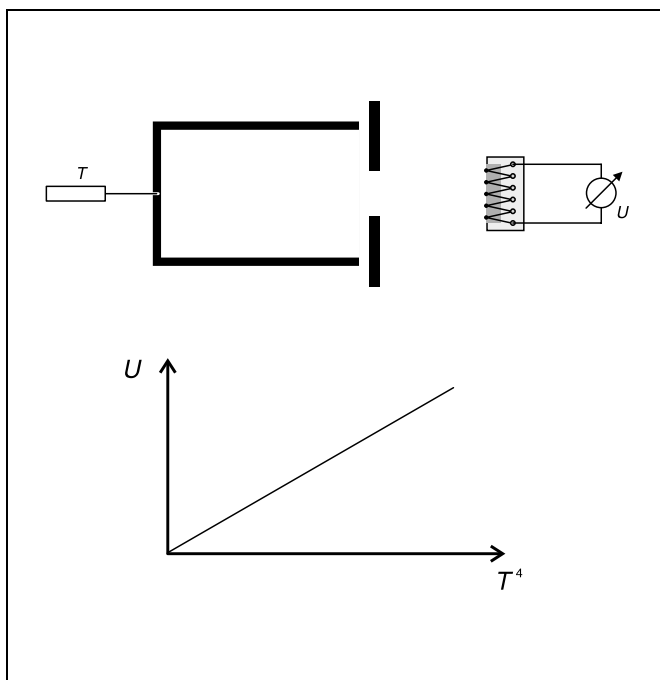
$$M_0 = \sigma T_0^4 \quad (II)$$

Daher gilt

$$M' = \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (III)$$

Im Versuch wird als „Schwarzer Körper“ ein Rohrofen mit Schwarzkörperzusatz verwendet. Der Schwarzkörperzusatz besteht aus einem brünierten Messingzylinder und einer Blende. Der einseitig geschlossene Messingzylinder wird in den Rohrofen geschoben und dort auf die gewünschte Temperatur geheizt. Die bei Bedarf mit Wasser kühlbare Blende ist vor dem Rohrofen angeordnet, so daß im wesentlichen nur die Wärmestrahlung des brünierten Messingzylinders und nicht die der Außenwand des heißen Ofens gemessen wird. Zur Temperaturmessung am Messingzylinder dient ein NiCr-Ni-Temperaturfühler.

Die Wärmestrahlung wird mit einer Thermosäule nach *Moll* gemessen, an die ein Mikrovoltmeter angeschlossen ist. In der Thermosäule sind mehrere Thermoelemente in Reihe geschaltet. Ihre Meßstellen absorbieren die auftreffende Strahlung fast vollständig, wogegen ihre Vergleichsstellen auf Umgebungstemperatur gehalten werden. Die Ausgangsspannung der Thermosäule ist daher ein relatives Maß für die Strahlungsintensität M' .



Geräte

1 Elektrischer Rohrofen, 230 V	555 81
1 Schwarzkörperzusatz	389 43
1 Rohrofentisch	555 84
1 Digitales Temperaturmeßgerät	666 190
1 Temperaturfühler NiCr-Ni	666 193
1 Thermosäule nach Moll	557 36
1 Mikrovoltmeter	532 13
1 Kleine Optische Bank	460 43
1 Großer Stativfuß, V-förmig	300 01
4 Leybold-Muffen	301 01
1 Universal-Stativklemme S	666 555

Experimentierkabel

zusätzlich empfohlen:

1 Eintauchpumpe für Flüssigkeiten	306 98
2 Silikonschläuche, i. Ø 7 × 1,5 mm, 1 m	667 194

1 Wasserbehälter, ca. 10 l

Störstrahlungen können entstehen durch:

Direkte Einstrahlung von Körperwärme in die Thermosäule, Reflexion von Strahlung an gut reflektierenden Flächen (z. B. an hellen Kleidungsstücken), Heizkörper, Sonne, andere Lichtquellen.

Das Mikrovoltmeter muß mindestens 10 min vor Versuchsbeginn warmlaufen:

Mikrovoltmeter am Netzschalter auf der Geräterückseite einschalten.

Der Versuchsaufbau ist in Fig. 2 dargestellt.

Bei Verwendung der Wasserkühlung:

- Silikonschläuche an der Eintauchpumpe und an der Blende des Schwarzkörperzusatzes so befestigen, daß die Zuflußseite an der unteren Schlauchwelle und die Abflußseite an der oberen Schlauchwelle der Blende sitzt.
- Wasserbehälter mit Wasser füllen und Eintauchpumpe z. B. mit der Montagemuffe am Rand des Flüssigkeitsbehälters lotrecht so befestigen, daß die Ansaugöffnung vollständig eintaucht und die max. zulässige Eintauchtiefe von 17 cm nicht überschritten wird (siehe Fig. 2; weitere Befestigungsmöglichkeit kann der Gebrauchsanweisung zur Eintauchpumpe entnommen werden).

Aufbau

Hinweise:

Die zu messende Intensität ist sehr klein und die Messung daher anfällig gegenüber störenden Umgebungseinflüssen: Thermosäule während der Messung auf keinen Fall mit der Hand berühren.

Nicht in der Nähe und insbesondere nicht vor der Thermosäule hantieren.

Zugluft und wechselnde Raumtemperaturen während der Messung vermeiden.

Störstrahlungen vermeiden, evtl. mit Pappe abschirmen. Evtl. Raum abdunkeln.

Sicherheitshinweise

Verbrennungsgefahr: Die Außenwand des Rohrofens kann Temperaturen über 200 °C erreichen.

- Verbrennungen am heißen Rohrofen vermeiden.
- Rohrofen nur auf dem Rohrofentisch betreiben.
- Gebrauchsanweisung zum Rohrofen beachten.

Bei der Eintauchpumpe kann Eindringen von Wasser in den Motor zu Kurzschluß führen.

- Eintauchtiefe von 17 cm nicht überschreiten.
- Nach dem Betrieb die nasse Eintauchpumpe nicht auf den Kopf stellen.
- Gebrauchsanweisung zur Eintauchpumpe beachten.

Anschließend:

- Rohrofen, Blende des Schwarzkörperzusatzes und Thermosäule entsprechend Fig. 1 so montieren, daß sich der Stiel der Thermosäule etwa 15 cm vor der Öffnung des Rohrofens befindet. Die Blende des Schwarzkörperzusatzes soll sich etwa 5 – 10 mm vor dem Rohrofen befinden und mit ihrer metallischen Seite zur Thermosäule zeigen.

Hinweis: Das Glasfenster absorbiert langwellige Strahlung stärker als kurzwellige und verfälscht daher die temperaturabhängige Messung der Strahlungsintensität systematisch.

- Glasfenster von der Thermosäule entfernen.
- NiCr-Ni-Temperaturfühler am Digitalen Temperaturmeßgerät anschließen und bis zum Anschlag in die kleine zentrale Bohrung des brünierten Messingzylinders stecken.
- Temperaturfühler mit der Universal-Stativklemme S fixieren und Digitales Temperaturmeßgerät einschalten (Meßbereich >200 °C).
- Öffnungen von Rohrofen, Blende des Schwarzkörperzusatzes und Thermosäule so ausrichten, daß die Wärmestrahlung direkt in die Öffnung der Thermosäule fallen kann.
- Ggf. Wasserpumpe einschalten.
- Thermosäule entsprechend Fig. 1 am Mikrovoltmeter anschließen (Meßbereich 10⁻⁴V); dabei rote Buchse der Thermosäule mit roter Buchse des Mikrovoltmeters verbinden.
- Offset durch Drücken des Tasters „Auto Comp“ kompensieren, evtl. Feineinstellung am Potentiometer vornehmen, um die Digitalanzeige auf Null zu bringen (siehe Gebrauchsanweisung zum Mikrovoltmeter).

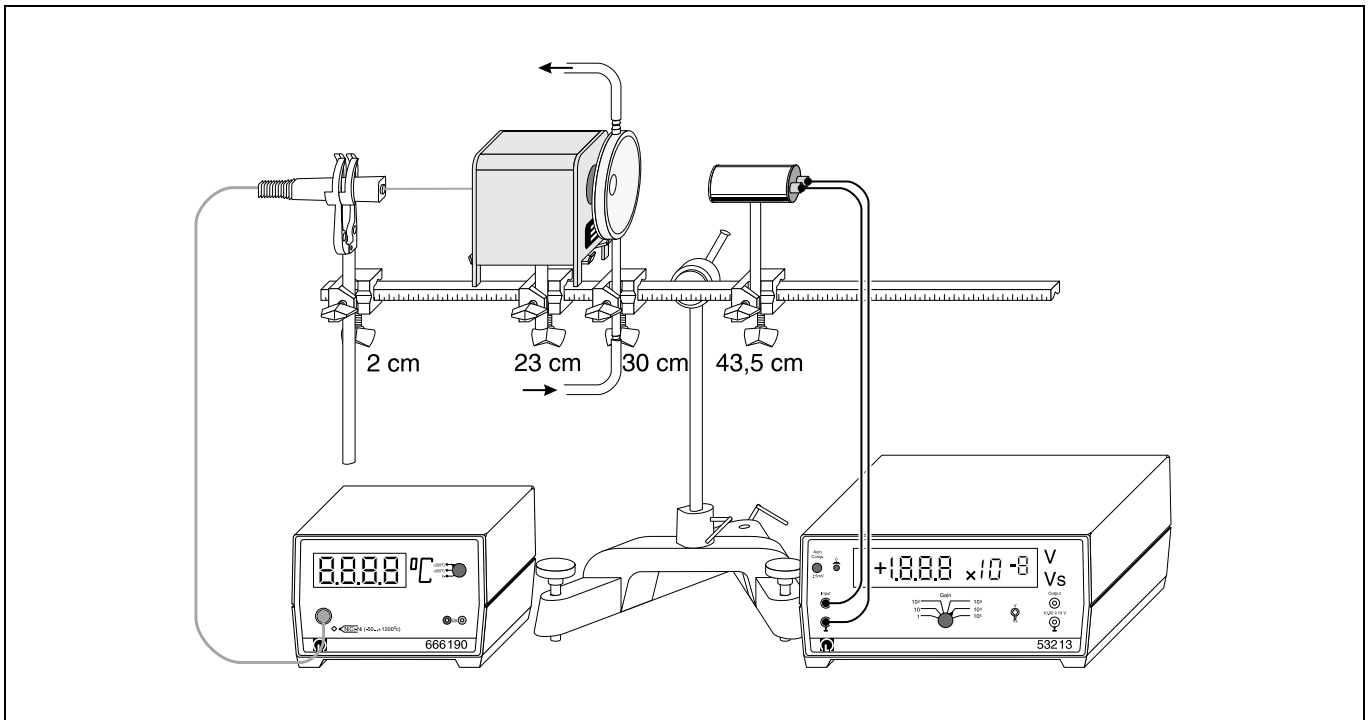
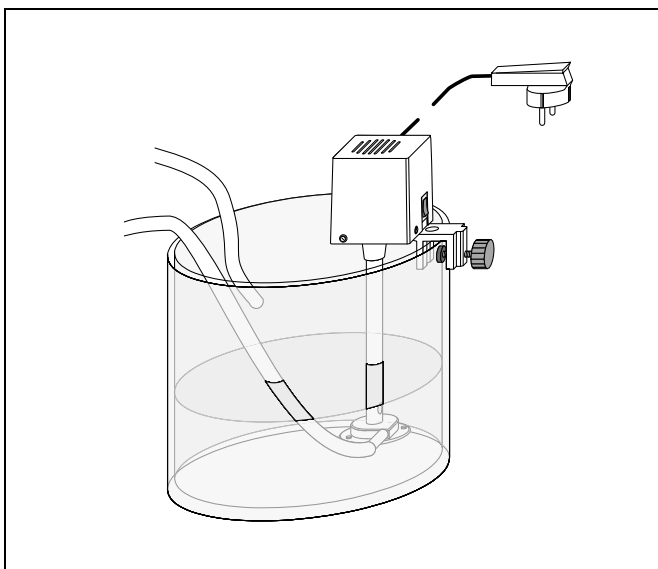


Fig. 1: Versuchsaufbau zur Bestätigung des Strahlungsgesetzes nach Stefan und Boltzmann.
Die Positionsangaben beziehen sich auf die linke Seite der Leybold-Muffen auf der Kleinen Optischen Bank.

Fig. 2: Aufbaubeispiel zur Befestigung der Eintauchpumpe am Wasserbehälter



Durchführung

Zunächst:

- Temperatur ϑ des Messingzylinders sowie die Ausgangsspannung U der Thermosäule messen und notieren.

Anschließend:

- Rohrfen einschalten, jeweils Temperaturzunahme von etwa 25 °C abwarten und Meßwerte ϑ und U notieren.

Bei einer Temperatur zwischen 400 °C und 500 °C:

- Rohrfen ausschalten, jeweils Temperaturabnahme von etwa 25 °C abwarten und Meßwerte ϑ und U notieren.
- Bei einer Temperatur zwischen 100 °C und Raumtemperatur den Temperaturfühler aus dem Rohrfen entfernen, Raumtemperatur messen und notieren.
- Thermosäule mit dunkler Pappe abschirmen, Nullpunkt des Mikrovoltmeters kontrollieren und notieren.

Meßbeispiel und Auswertung

Tab. 1: Meßwerte bei Beheizung und Abkühlung

ϑ °C	T K	$\frac{T^4 - T_0^4}{K^4}$	$\frac{U_{\uparrow}}{mV}$	$\frac{U_{\downarrow}}{mV}$
24	297	0	0	0
50	323	0,31	0,06	0,06
75	348	0,69	0,14	0,14
100	373	1,16	0,24	0,24
125	398	1,73	0,36	0,36
150	423	2,42	0,52	0,51
175	448	3,25	0,70	0,68
200	473	4,23	0,91	0,89
225	498	5,37	1,16	1,13
250	523	6,70	1,43	1,41
275	548	8,24	1,75	1,72
300	573	10,00	2,11	2,07
325	598	12,01	2,50	2,46
350	623	14,29	2,93	2,90
375	648	16,85	3,42	3,38
400	673	19,74	3,95	3,92
425	698	22,96	4,53	4,50
450	723	26,55	5,17	5,17

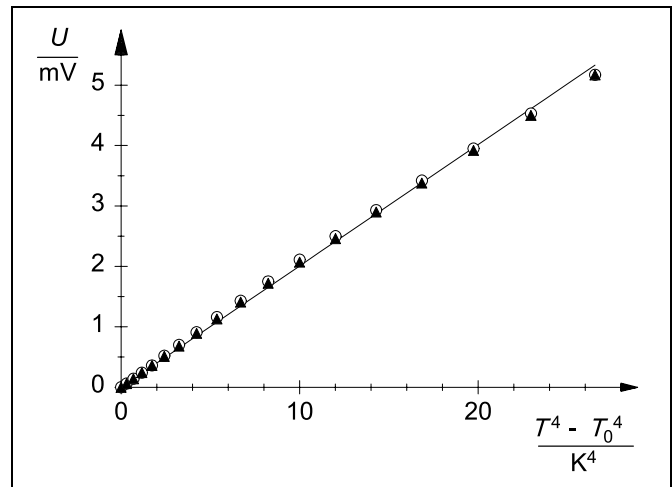


Fig. 3: Darstellung der Ausgangsspannung U in Abhängigkeit von $T^4 - T_0^4$. Die Kreise entsprechen der Beheizung und die Dreiecke der Abkühlung.

Fig. 3 zeigt die Ausgangsspannung U der Thermosäule in Abhängigkeit von der Differenz der vierten Potenzen der absoluten Ofentemperatur T und der absoluten Raumtemperatur T_0 . Entsprechend dem *Stefan-Boltzmann-Gesetz* ergibt sich in guter Näherung eine Gerade. Bei genauerer Betrachtung ist eine Abweichung von der angepaßten Geraden erkennbar, zu der folgende Effekte beitragen: Die Messung mit der Thermosäule wird insbesondere bei entferntem Glasfenster durch Konvektion und durch Strahlungsverluste an die Umgebung beeinflusst. Nicht völlig auszuschließen ist außerdem eine mit höherer Ofentemperatur zunehmende Erwärmung der Vergleichsstellen der Thermosäule.