

## Überprüfung der Strahlungsgesetze mit dem Strahlungswürfel nach Leslie

### Versuchsziele

- Relativmessung der Strahlungsintensität der verschiedenen Würfeloberflächen in Abhängigkeit von deren Temperatur mit einer Thermosäule nach Moll
- Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Strahlungsintensität und absoluter Temperatur für die verschiedenen Würfeloberflächen
- Überprüfung des Kirchhoffschen Strahlungsgesetzes
- Identifikation der einzelnen Würfeloberflächen als „Graue Körper“ zur Überprüfung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes im gemessenen Temperaturbereich

### Grundlagen

Jeder Körper emittiert Wärmestrahlung. Die Intensität dieser thermisch angeregten elektromagnetischen Strahlung hängt von der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers ab und nimmt mit steigender Temperatur des Körpers zu.

Außerdem absorbiert der Körper elektromagnetische Strahlung. Wieviel von der auftreffenden Strahlung absorbiert wird, hängt ebenfalls von der Oberflächenbeschaffenheit ab. Nach Kirchhoff emittiert ein Körper bei einer bestimmten Temperatur um so mehr Strahlung, je stärker er Strahlungsenergie absorbieren kann. Genauer ist

$$\varepsilon = \alpha \quad (I),$$

wobei der Emissionsgrad  $\varepsilon$  definiert ist als das Verhältnis

$$\varepsilon = \frac{M}{M_B} \quad (II)$$

( $M$ : spezifische Ausstrahlung des Körpers,  
 $M_B$ : spezifische Ausstrahlung eines Schwarzen Körpers)

und der Absorptionsgrad  $\alpha$  als

$$\alpha = \frac{\Phi}{\Phi_0} \quad (III)$$

$\Phi$ : vom Körper absorbierte Strahlungsleistung,  
 $\Phi_0$ : gesamte auf den Körper einfallende Strahlungsleistung).  
Als Schwarzen Körper bezeichnet man einen Körper, der elektromagnetische Strahlung vollständig absorbiert. Er hat den höchsten Absorptionsgrad und damit bei gegebener Temperatur auch den höchsten Emissionsgrad. Alle anderen Körper absorbieren weniger und strahlen somit auch weniger ab als der Schwarze Körper.

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz besagt, daß die spezifische Ausstrahlung  $M_B$  eines Schwarzen Körpers gegeben ist durch

$$M_B = \sigma \cdot T^4 \quad (IV)$$

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

Die Strahlung eines Schwarzen Körpers ist nicht gleichmäßig über alle Wellenlängen verteilt, sondern hat eine charakteristische spektrale Verteilung. Bei sogenannten Grauen Körpern entspricht die spektrale Verteilung der eines Schwarzen Körpers, sie haben jedoch einen geringeren Emissionsgrad  $\varepsilon$  bzw. Absorptionsgrad  $\alpha$ . Ihre spezifische Ausstrahlung hängt ebenfalls linear von der vierten Potenz der absoluten Temperatur  $T$  ab, d.h. es gilt

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (V).$$

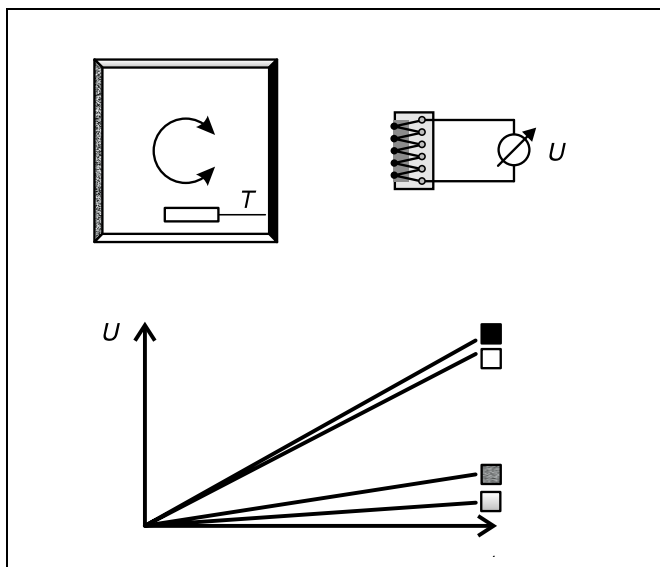
Der Körper absorbiert zugleich Strahlung aus der Umgebung. Gemessen wird daher nicht die gesamte abgestrahlte Leistung  $M$ , sondern die dem Körper durch Strahlung entzogene Leistung  $M'$ . Er absorbiert von der aus der Umgebung zugestrahlten Leistung den Anteil

$$M_0 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_0^4 \quad (VI).$$

Daher gilt

$$M' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \quad (VII).$$

Entspricht seine Temperatur der Umgebungstemperatur  $T_0$ , so ist also  $M' = 0$ .



**Geräte**

1 Strahlungswürfel nach <i>Leslie</i> . . . . .	389 26
1 Rührer zum Strahlungswürfel . . . . .	389 28
1 Rohrofentisch . . . . .	555 84
1 Digitales Temperaturmeßgerät . . . . .	666 190
1 Temperaturfühler NiCr-Ni . . . . .	666 193
1 Thermosäule nach <i>Moll</i> . . . . .	557 36
1 Mikrovoltmeter . . . . .	532 13
1 Kleine Optische Bank . . . . .	460 43
1 Großer Stativfuß . . . . .	300 01
3 Leybold-Muffen . . . . .	301 01
1 Sicherheits-Tauchsieder . . . . .	303 25
1 Kunststoffbecher . . . . .	590 06
1 Trichter, 75 mm Ø, Kunststoff . . . . .	665 009

*zusätzlich:*

1 Saugfähiges Tuch, 1 Dunkle Pappe

Der Strahlungswürfel nach *Leslie* hat vier Seitenflächen mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit und somit unterschiedlichem Emissionsgrad. Eine Oberfläche ist metallisch matt, eine metallisch glänzend, eine weiß lackiert und die letzte schwarz lackiert.

Im Versuch wird der Strahlungswürfel mit zunächst heißem Wasser gefüllt. Die von den Würfelflächen ausgehende Wärmestrahlung wird in Abhängigkeit von der sinkenden Temperatur mit einer Thermosäule nach *Moll* gemessen. In der Thermosäule sind mehrere Thermoelemente in Reihe geschaltet. Ihre Meßstellen absorbieren die auftreffende Strahlung fast vollständig, wogegen sich ihre Vergleichsstellen auf Umgebungstemperatur befinden. Die Ausgangsspannung der Thermosäule ist daher ein relatives Maß für die Strahlungsintensität  $M'$ .

**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.*

*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,*

*anderen Lichtquellen.*

Der Versuchsaufbau ist in Fig. 1 dargestellt. Der Strahlungswürfel steht auf dem drehbar befestigten Rohrofentisch, damit die einzelnen Würfeloberflächen leicht zur Thermosäule ge-

dreht werden können. Fig. 2 zeigt die Befestigung des Rohrofentisches. Durch leichtes Lösen des Stiels vom Rohrofentisch an der Leybold-Muffe (a) kann der Rohrofentisch gedreht werden. Die Leybold-Muffe (b) verhindert ein Absacken von Rohrofentisch und Würfel.

**Rohrofentisch und Strahlungswürfel:**

- Rohrofentisch montieren und Leybold-Muffe entsprechend Fig. 2 am Stiel des Rohrofentisches befestigen.
- Ggf. Strahlungswürfel mit feuchtem Tuch reinigen und Rührer in die mittlere Öffnung der oberen Würfelseite stecken.

*Hinweis: Die Intensität der Wärmestrahlung nimmt mit der Entfernung ab.*

- Strahlungswürfel mittig auf dem Rohrofentisch plazieren, damit während der Versuchsdurchführung bei Drehung des Rohrofentisches jede Würfelseite die gleiche Entfernung  $s$  zur Thermosäule hat (siehe Fig. 1).
- Schwarze Würfeloberfläche genau senkrecht zur späteren Position der Thermosäule ausrichten und Rohrofentisch fixieren.

**Meßgeräte:***Hinweise:*

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

*Das Mikrovoltmeter muß mindestens 10 min vor Versuchsbeginn warmlaufen:*

*Mikrovoltmeter am Netzschalter auf der Geräterückseite einschalten.*

- Thermosäule entsprechend Fig. 1 montieren, so daß die Entfernung  $s$  zwischen Thermosäulenstiel und Strahlungswürfel etwa 10 cm beträgt; Glasfenster von der Thermosäule entfernen.
- Einzelne Entfernungen der Würfeloberflächen zur Thermosäule jeweils bei festgeklammtem Stiel des Rohrofentisches kontrollieren.
- Thermosäule entsprechend Fig. 1 am Mikrovoltmeter anschließen (Meßbereich  $10^{-4}V$ ); 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).
- NiCr-Ni-Temperaturfühler am Digitalen Temperaturmeßgerät anschließen und einschalten (Meßbereich  $< 200\text{ }^{\circ}C$ ).

**Durchführung****Zunächst:**

- Spannung am Mikrovoltmeter und Raumtemperatur am Digitalen Temperaturmeßgerät ablesen und notieren.
- Kunststoffbecher mit ca. 0,9 l Wasser füllen und Wasser mit Sicherheits-Tauchsieder zum Kochen bringen.
- Heißes Wasser über Trichter in den Strahlungswürfel füllen. Evtl. verschüttetes Wasser mit saugfähigem Tuch beseitigen.
- Temperaturfühler in die Einfüllöffnung des Strahlungswürfels stecken.
- Heißen Tauchsieder und Meßbecher aus dem Experimentierbereich entfernen.

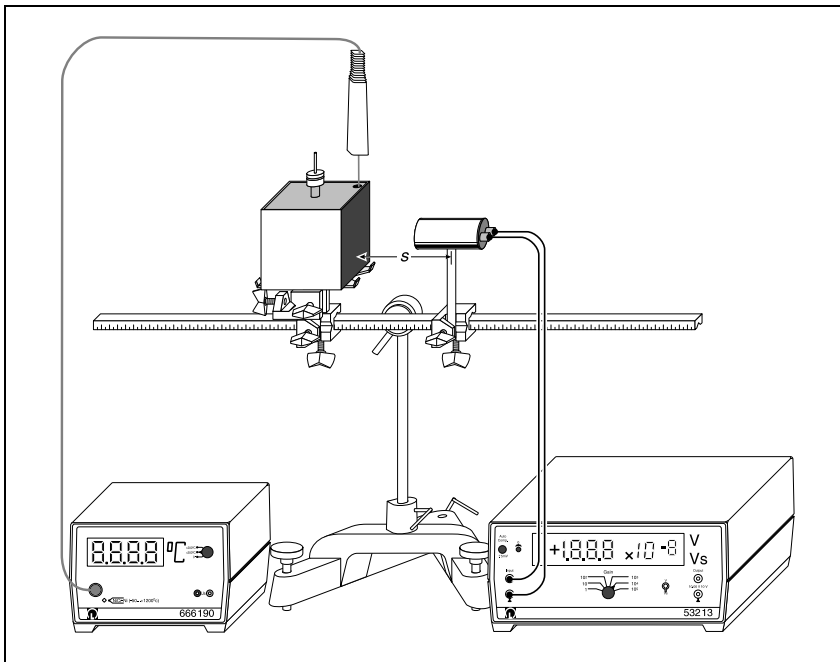


Fig. 1: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Strahlungsgesetze.

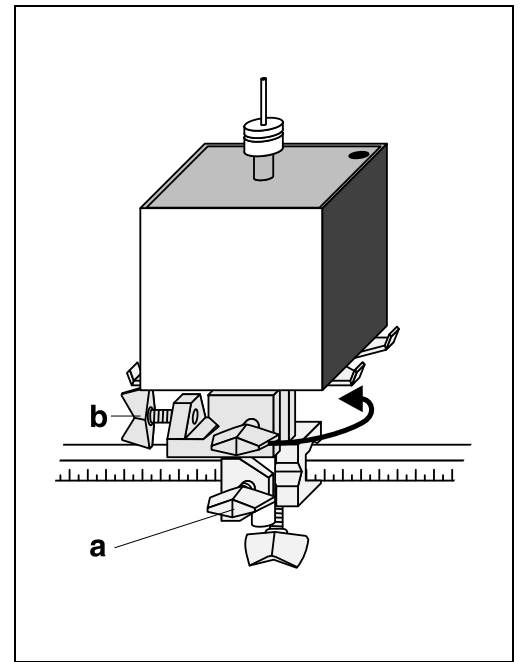


Fig. 2: Befestigung des Rohrofentisches zur drehbaren Lagerung des Strahlungswürfels.

**Hinweise:**

Weil es sehr auf das Temperaturgleichgewicht im Würfel ankommt, das Wasser vor jeder Messung mittels Rührer umrühren. Bei der anschließenden Messung die Spitze des Temperaturfühlers an die Innenwand der zur Thermosäule zeigenden Würfelfläche bringen, um deren Temperatur möglichst exakt zu bestimmen.

Der Würfel darf auf der Unterlage durch die Drehung nicht dezentriert werden und die jeweils zu untersuchende Würfelfläche sollte genau senkrecht zu Strahlrichtung stehen.

Vor dem Ablesen der Meßwerte die Einstellzeit der Thermosäule, die bis zu einer Minute dauern kann, beachten.

**Anschließend:**

- Wasser mit dem Rührer umrühren. Dann Thermospannung  $U$  und Temperatur  $\vartheta$  für die schwarze Würfelfläche ablesen (dazu Spitze des Temperaturfühlers an die entsprechende Innenwand halten) und notieren.
- Stiel des Rohrofentisches durch Öffnen der Leybold-Muffe (a) etwas lösen, weiße Würfelfläche zur Thermosäule drehen und Rohrofentisch wieder fixieren.
- Wasser mit dem Rührer umrühren. Dann Thermospannung  $U$  und Temperatur  $\vartheta$  für die weiße Würfelfläche ablesen (dazu Spitze des Temperaturfühlers an die entsprechende Innenwand halten) und notieren.
- In gleicher Weise glänzende und matte Würfelseiten messen.
- Messungen jeweils nach einer Temperaturabnahme von etwa 5 °C wiederholen.
- Bei einer Wassertemperatur zwischen 40 °C und 50 °C den Temperaturfühler aus dem Strahlungswürfel entfernen und abtrocknen. Anschließend Raumtemperatur messen und notieren.
- Thermosäule abschirmen (z.B. mit dunkler Pappe), Nullpunkt des Mikrovoltmeters kontrollieren und notieren.

**Meßbeispiel und Auswertung**

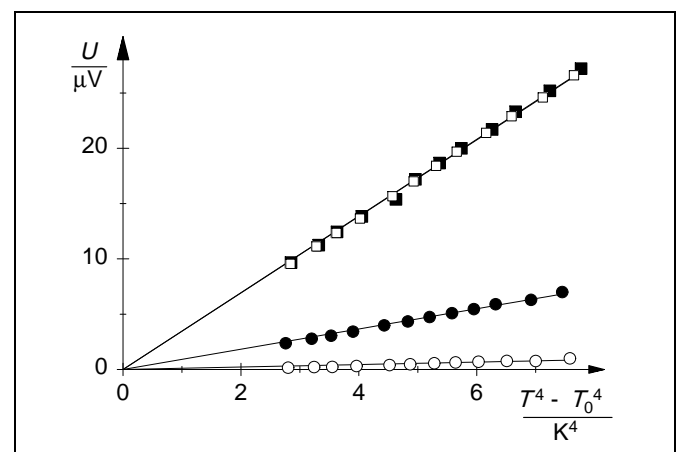
(s. Tabelle auf S. 4)

Fig. 3 zeigt die Ausgangsspannungen  $U$  der Thermosäule in Abhängigkeit von der vierten Potenz der absoluten Temperatur  $T$  für die einzelnen Würfelflächen. An die Meßwerte für die einzelnen Flächen ist jeweils eine Gerade angepaßt.

Falls bei der Kontrolle des Nullpunktes vom Mikrovoltmeter oder von der Zimmertemperatur größere Abweichungen festgestellt wurden, können die Meßwerte bei der Versuchsauswertung korrigiert werden.

Fig. 3: Darstellung der Ausgangsspannungen  $U$  in Abhängigkeit von  $T^4 - T_0^4$ .

- schwarze Quadrate: schwarz lackierte Fläche
- weiße Quadrate: weiß lackierte Fläche
- schwarze Kreise: matte Metallfläche
- weiße Kreise: glänzende Metallfläche



Tab. 1: Meßwerte (Raumtemperatur:  $\vartheta_0 = 26,4 \text{ }^\circ\text{C}$ )

## a) schwarz lackierte Oberfläche

$\vartheta$ $^\circ\text{C}$	$T$ K	$\frac{T^4 - T_0^4}{\text{K}^4}$	$\frac{U}{\mu\text{V}}$
81,5	354,7	7,77	27,2
78,5	351,7	7,24	25,2
75,1	348,3	6,66	23,3
72,7	345,9	6,26	21,7
69,5	342,7	5,74	20,0
67,2	340,4	5,37	18,67
64,6	337,8	4,96	17,20
62,4	335,6	4,63	15,38
58,5	331,7	4,05	13,84
55,6	328,8	3,63	12,44
53,4	326,6	3,32	11,24
50,0	323,2	2,85	9,67

## c) glänzende Metallfläche

$\vartheta$ $^\circ\text{C}$	$T$ K	$\frac{T^4 - T_0^4}{\text{K}^4}$	$\frac{U}{\mu\text{V}}$
80,4	353,6	7,58	1,00
77,1	350,3	7,00	0,76
74,2	347,4	6,51	0,77
71,3	344,5	6,03	0,70
68,9	342,1	5,64	0,64
66,6	339,8	5,28	0,56
64,0	337,2	4,87	0,47
61,7	334,9	4,52	0,40
57,9	331,1	3,96	0,31
55,0	328,2	3,55	0,23
52,8	326,0	3,24	0,22
49,6	322,8	2,80	0,16

## b) weiß lackierte Oberfläche

$\vartheta$ $^\circ\text{C}$	$T$ K	$\frac{T^4 - T_0^4}{\text{K}^4}$	$\frac{U}{\mu\text{V}}$
80,8	354,0	7,65	26,6
77,8	351,0	7,12	24,6
74,7	347,9	6,59	22,9
72,1	345,3	6,16	21,4
69,0	342,2	5,66	19,7
66,8	340,0	5,31	18,42
64,4	337,6	4,93	17,00
62,0	335,2	4,57	15,66
58,3	331,5	4,02	13,65
55,5	328,7	3,62	12,34
53,1	326,3	3,28	11,13
49,9	323,1	2,84	9,55

## d) matte Metallfläche

$\vartheta$ $^\circ\text{C}$	$T$ K	$\frac{T^4 - T_0^4}{\text{K}^4}$	$\frac{U}{\mu\text{V}}$
79,7	352,9	7,45	7,00
76,6	349,8	6,92	6,29
73,1	346,3	6,32	5,90
70,8	344,0	5,95	5,46
68,5	341,7	5,58	5,09
66,1	339,3	5,20	4,74
63,7	336,9	4,83	4,34
61,1	334,3	4,43	3,99
57,5	330,7	3,90	3,42
54,9	328,1	3,53	3,05
52,5	325,7	3,20	2,78
49,3	322,5	2,76	2,37

## Ergebnis

Die Wärmeabstrahlung eines Körpers ist von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig.

Die glänzende Metallfläche emittiert weniger als die matte. Das steht in Einklang mit dem Strahlungsgesetz von *Kirchhoff*, da die glänzende Oberfläche auch weniger absorbiert.

Die schwarz lackierte und die weiß lackierte Oberfläche strahlen am meisten ab. Obwohl man unterschiedlichen Absorptionsgrad vermutet, unterscheidet sich ihr Emissionsvermögen im scheinbaren Widerspruch zum *Kirchhoffschen* Gesetz kaum. Allerdings beziehen sich die Bezeichnungen *weiß* und *schwarz* auf den sichtbaren Spektralbereich, also auf Wellen-

längen zwischen 400 und 700 nm. Dagegen liegt das Intensitätsmaximum der emittierten Wärmestrahlung im Wellenlängenbereich von etwa  $7 \mu\text{m}$ , also in einem völlig anderen Spektralbereich. Hier ist das Absorptionsvermögen der weiß lackierten und der schwarz lackierten Oberfläche nahezu gleich.

Fig. 3 zeigt, daß die gemessene Strahlungsleistung linear mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur wächst. Die einzelnen Würfeloberflächen verhalten sich im gemessenen Temperaturbereich also als Graue Körper.