

Versuch 207 - Das Stefan-Boltzmann Gesetz

**TU Dortmund, Fakultät Physik
Anfänger-Praktikum**

Jan Adam

jan.adam@tu-dortmund.de

Dimitrios Skodras

dimitrios.skodras@tu-dortmund.de

21.Dezember 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
2	Durchführung	4
3	Auswertung	5
3.1	Bestimmung der Ansprechzeit	5
3.2	Bestimmung des Emissionsvermögens ϵ	6
3.3	Strahlintensität als Funktion des Abstandes	9
4	Diskussion	9

1 Theorie

Jedes System im Universum mit einer Temperatur $T > 0\text{K}$ strahlt Wärmestrahlung aus, da einige seiner Elektronen sich in angeregtem Zustand befinden und von dort in den Grundzustand zurückkehren. Ein Körper, der ein breites Spektrum von Wellenlängen absorbiert, kann auch gut emittieren. Laut dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz sind Absorption und Emission äquivalent und über das Reflexionsvermögen verknüpft.

$$\epsilon(\lambda, T) = A(\lambda, T) = 1 - R(\lambda, T) \quad (1)$$

Schwarze Körper (mit $\epsilon = 1$) weisen eine Strahlungsleistung auf, die lediglich von der Wellenlänge λ der Strahlung sowie seiner absoluten Temperatur T abhängt. Ein Hohlraum mit einer kleinen Öffnung kommt dem Bild des idealen schwarzen Körpers am nächsten, da die eintretende Strahlung darin mehrfach reflektiert und schließlich endgültig absorbiert wird (Hohlraumstrahlung). Die emittierte Strahlung wird gemäß dem Planckschen Strahlungsgesetz ausgedrückt durch

$$P(\lambda, T) = \frac{dP}{d\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\Omega_0 \lambda^5} \left[\exp\left(\frac{c h}{k_b \lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}. \quad (2)$$

(c = Lichtgeschwindigkeit, h = Plancksches Wirkungsquantum, k_b = Boltzmann-Konstante)

Ω_0 ist hierbei der Raumwinkel der abgestrahlten Wärme. Das Wiensche Verschiebungsgesetz besagt eine Verschiebung des Strahlungsleistungsmaximum zu kleineren Wellenlängen bei höheren Temperaturen, wie in Abbildung 1 dargestellt.

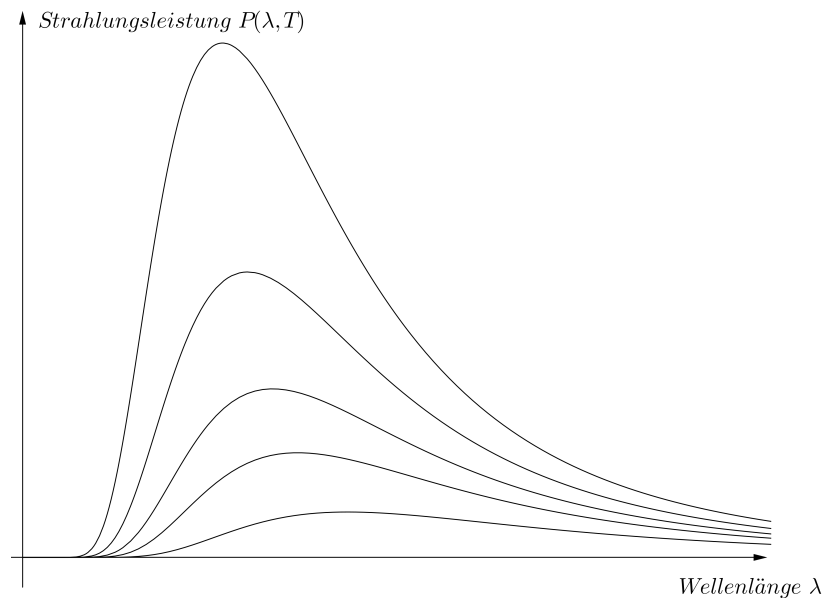


Abbildung 1: Plancksches Strahlungsspektrum zu verschiedenen Temperaturen

Das in diesem Versuch zu untersuchende Stefan-Boltzmann-Gesetz beschreibt die Strahlungsdichte $P(T)$ eines schwarzen Körpers und wird dargestellt durch

$$P(T) = \epsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

(σ = Stefan-Boltzmann-Konstante)

2 Durchführung

Der Leslie-Würfel ist ein Würfel mit einer öffenbaren Deckelfläche mit einem Loch zur Temperaturmessung und vier verschiedenen Seitenflächen. Eine schwarz lackierte, eine weiß lackierte, eine matt und eine glänzend metallische Fläche. Je nach Absorptionsvermögen wird die Wärme des Wassers aufgenommen und in Form von Wärmestrahlung wieder emittiert. Gemessen wird sie durch die Thermosäule nach Moll. Die eintretende Strahlung wird von in Reihe geschalteten Thermoelementen erfasst, die thermisch mit dem Gehäuse verbunden sind. So wird eine relativ zur Gehäusetemperatur T_0 ermittelte Temperatur angegeben. Der Wellenlängenbereich, für den die Thermosäule empfindlich ist, bewegt sich zwischen $\lambda = 0,2 - 50 \mu\text{m}$ und mit Schutzfenster bei $\lambda = 0,3 - 2,8 \mu\text{m}$.

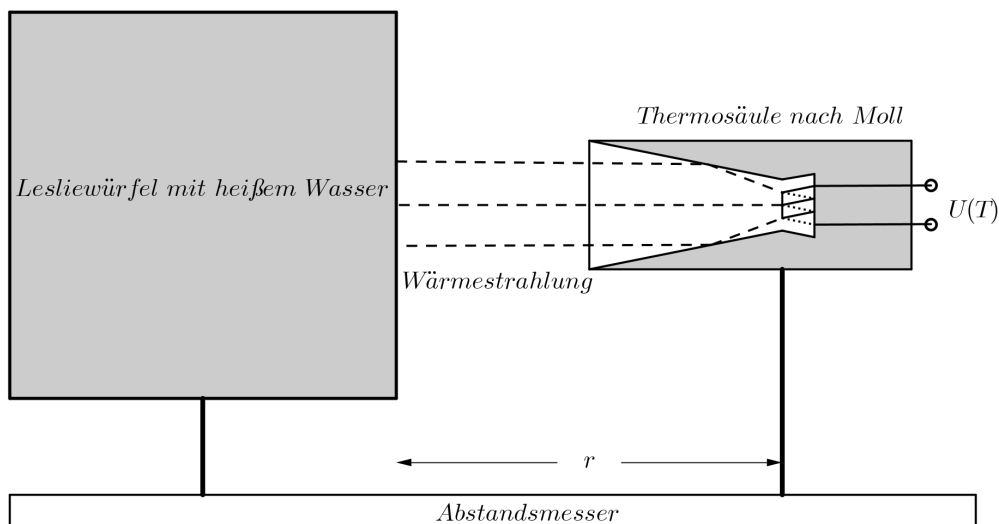


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau

Nachdem ein Abstand von 10 cm zwischen der Thermosäule und der frontal gerichteten Würfelseitenfläche eingestellt worden ist, wird Wasser im Wasserkocher auf ungefähr 95 °C erhitzt und in den Lesliewürfel gefüllt. Die Temperatur wird unterdessen permanent gemessen. Über einen Zeitraum von $t = 5 \text{ min}$ wird im Zeitintervall $\Delta t = 10 \text{ s}$ die Thermospannung am Messgerät abgetragen. Das nun für weitere Messungen zu kühle

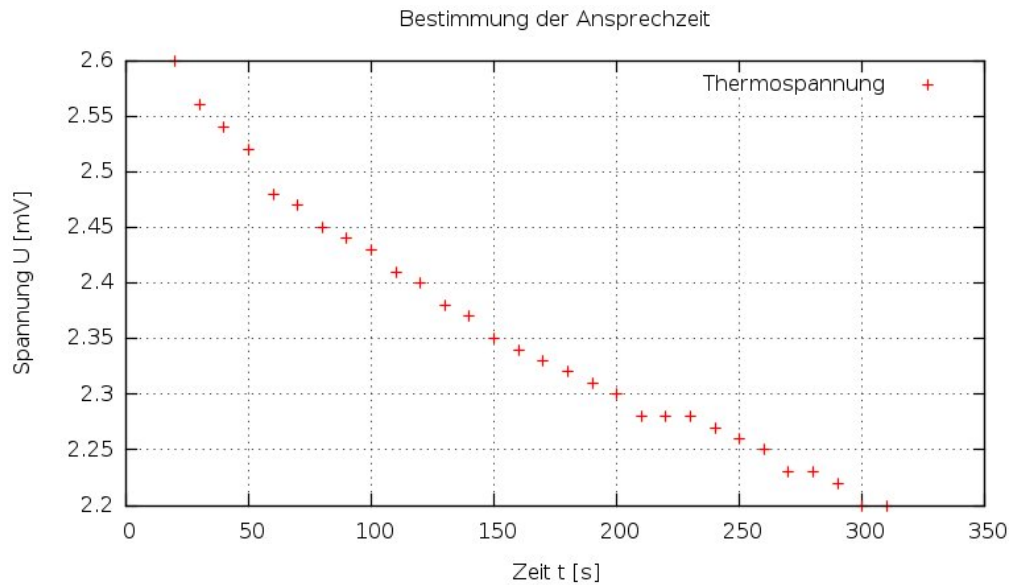


Abbildung 3: Von der Thermosäule erzeugte Thermospannung gegen die Zeit aufgetragen

Wasser wird ausgeschüttet und durch neu erhitztes ersetzt. Ziel dieses Versuchsteils ist es, ausgehend von $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Temperaturintervall $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Thermospannung aller vier Seitenflächen zu messen und durch den linearen Fit das Emissionsvermögen ϵ zu bestimmen. Die Offsetspannung, also jene Spannung, die die Temperatur der Luft erzeugt, wird allenthalben vor und nach jeder Messung erfasst.

3 Auswertung

3.1 Bestimmung der Ansprechzeit

Zunächst soll die Ansprechzeit der Thermosäule bestimmt werden. Das ist die Zeit, die die Thermosäule benötigt, um die einfallende Wärme vollständig zu erfassen. Die Ansprechzeit ist daher für den weiteren Verlauf des Versuchs wichtig, denn man muss, nachdem man die Thermosäule auf eine andere Fläche des Würfels richtet, mindestens die Ansprechzeit abwarten, bevor Werte abgelesen werden dürfen.

Nachdem siedendes Wasser in den Würfel gefüllt wurde, wird die Thermospannung alle 10s abgelesen.

Gesucht wird nach einem Maximum des Graphens, da dies der Zeitpunkt ist, zu dem die Thermosäule die Wärme komplett anzeigt. Dieses lokale Maximum gibt es jedoch nicht, da die Spannung bereits innerhalb der ersten 5s ihren Endwert erreicht hat. Folglich ist bei den folgenden Messungen darauf zu achten, mindestens 5 Sekunden zu warten, bevor ein Wert abgelesen wird.

$$\text{Ansprechzeit} \approx 5[s] \quad (4)$$

3.2 Bestimmung des Emissionsvermögens ϵ

Um das Emissionsvermögen zu bestimmen wird der Würfel erneut mit siedendem Wassergefüllt und in jeweils 5° Schritten die Thermospannung für alle 4 Würfelseiten notiert.

Temperatur	Schimmernd [mV]	Schwarz [mV]	Matt [mV]	Weiß [mV]
$82^\circ C$	-0.058	1.842	0.192	1.802
$77^\circ C$	-0.078	1.622	0.132	1.592
$72^\circ C$	0.612	1.432	0.082	1.382
$67^\circ C$	-0.128	1.232	0.032	1.202
$62^\circ C$	-0.137	1.042	0.002	1.022
$57^\circ C$	-0.151	0.852	-0.030	0.822
$52^\circ C$	-0.155	0.672	-0.058	0.662
$47^\circ C$	-0.133	0.530	-0.068	0.508

Bei der schimmernden Oberfläche wurden die Werte bei $72^\circ C$ und $47^\circ C$ nicht in die Rechnung mit einbezogen, da sie zu stark von den anderen Abweichen. Möglicherweise hat sich das Gehäuse der Thermosäule zu diesen Zeitpunkten erwärmt, so dass die Messung verfälscht wurde.

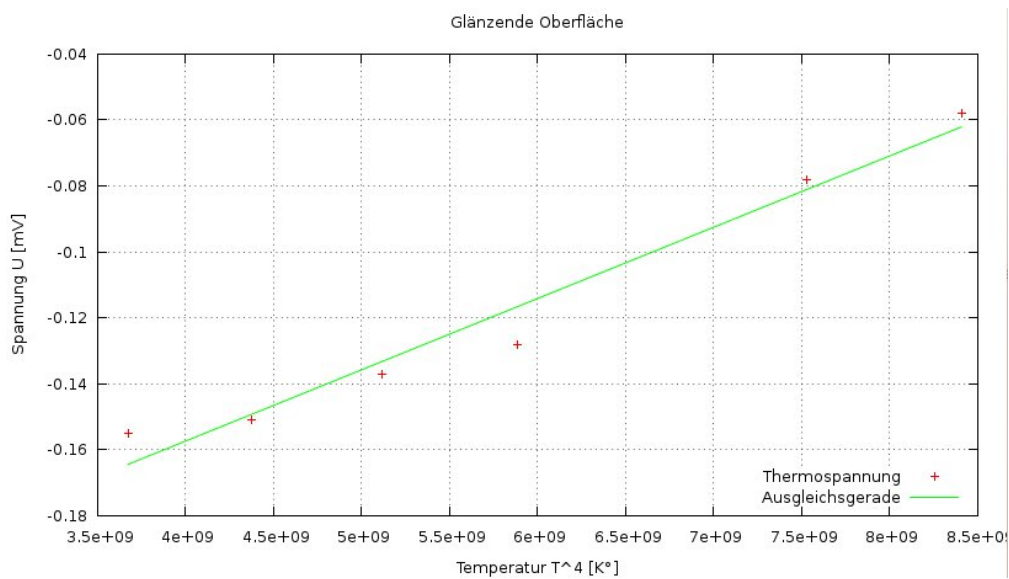


Abbildung 4: Thermospannung an der schillernden Würfelseite

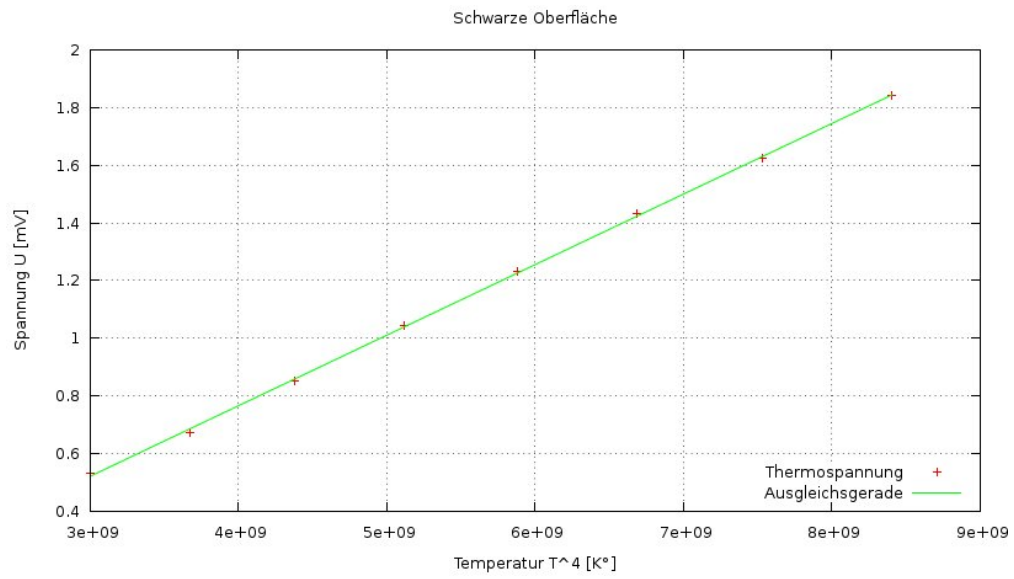


Abbildung 5: Thermospannung an der schwarzen Würfelseite

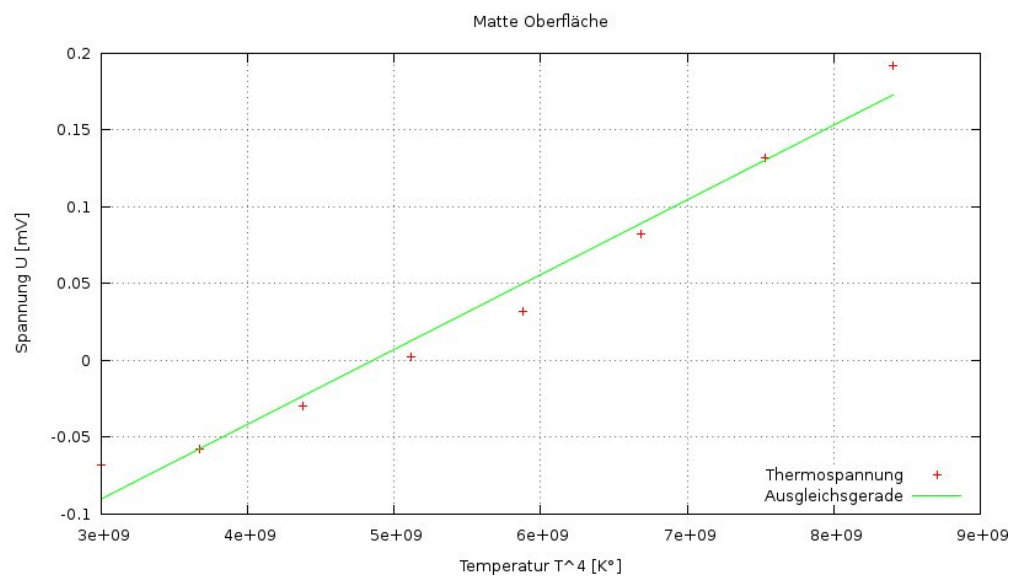


Abbildung 6: Thermospannung an der matten Würfelseite

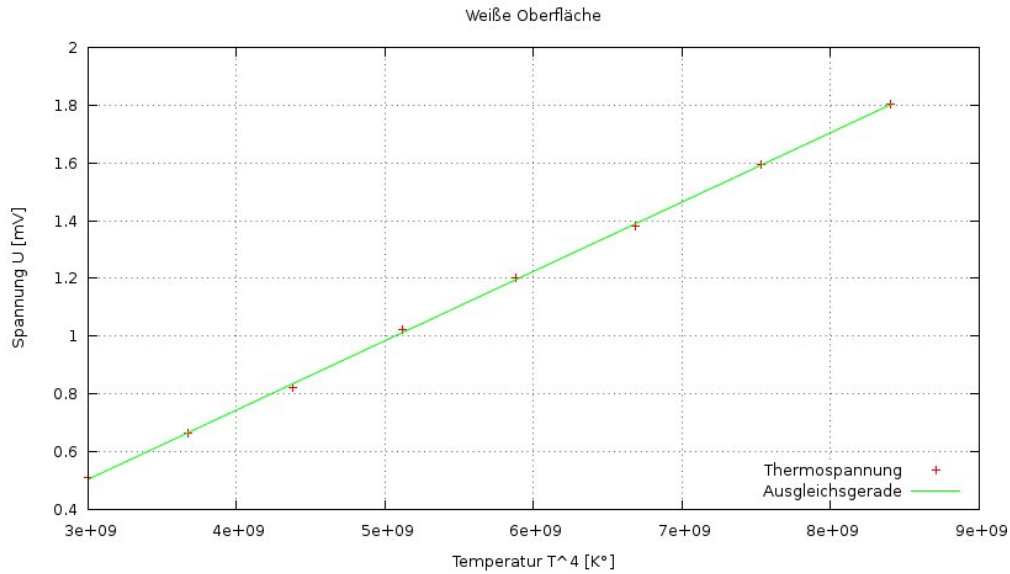


Abbildung 7: Thermospannung an der weißen Würfelseite

Trägt man die gemessenen Spannungen gegen $T^4 - T_0^4$ auf

(mit $T_0 = 21,2^\circ C$)

und zeichnet eine Ausgleichsgerade ein, so hat diese nach Gleichung (3) die Steigung $\epsilon\sigma$.

Nach einer Umrechnung der Daten der vier Oberflächen auf Volt errechnet man die Steigungen der Ausgleichsgeraden und dividiert diesen Wert nochmals durch $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ um das Emissionsvermögen σ zu erhalten.

$\epsilon_{schillernd} = 0,38 \cdot 10^{-6}$	$\pm 0,04 \cdot 10^{-6}$
$\epsilon_{schwarz} = 4,31 \cdot 10^{-6}$	$\pm 0,03 \cdot 10^{-6}$
$\epsilon_{matt} = 0,86 \cdot 10^{-6}$	$\pm 0,05 \cdot 10^{-6}$
$\epsilon_{weiss} = 4,24 \cdot 10^{-6}$	$\pm 0,03 \cdot 10^{-6}$

Die schwarze Fläche soll nun als Schwarzer Strahler betrachtet werden. Dazu werden alle Werte so normiert, dass $\epsilon_{schwarz} = 1$ ist. Die Werte ändern sich dann zu:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{schillernd} &= 0,09 \\
 \epsilon_{schwarz} &= 1 \\
 \epsilon_{matt} &= 0,20 \\
 \epsilon_{weiss} &= 0,98
 \end{aligned}$$

3.3 Strahlintensität als Funktion des Abstandes

Zum Schluss wird die Thermospannung für verschiedene Abstände von der schwarzen Würfelseite gemessen.

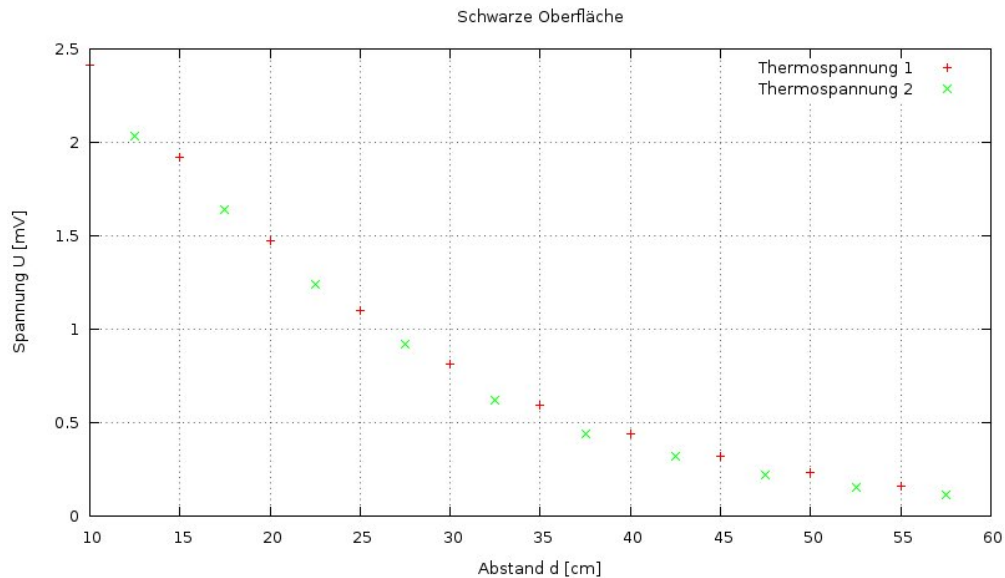


Abbildung 8: Thermospannung gegen den Abstand zum Würfel aufgetragen

Zur Erhöhung der Genauigkeit wurde im Abstand von etwa zwei Minuten eine zweite Messreihe aufgenommen. Da der Würfel in der Zwischenzeit etwas ausgekühlt ist, werden die Messreihen farblich unterschieden.

4 Diskussion

Das Emissionsvermögen der vier Seiten ist äußerst gering. Alle ϵ liegen in einer Größenordnung von 10^{-6} . Interessant ist dabei, dass die weiße und die schwarze Fläche sehr ähnliche Werte haben. Es ist also unerheblich welche Farbe die Oberfläche hat, es kommt mehr auf die Beschaffenheit des Materials an. Die metallenen Flächen haben die Wärme deutlich schlechter abgegeben als die mit Farbe bestrichenen. Dennoch kam keine der Flächen einem schwarzen Strahler nah, da die $\epsilon \ll 1$ sind.

Die Abgestrahlte Leistung nimmt wie zu erwarten mit dem Abstand vom Würfel ab. Die bestrahlte Fläche nimmt bei gleichbleibendem Raumwinkel mit R^2 zu, so dass die Strahlungsintensität an der Thermosäule mit $\frac{1}{R^2}$ abnimmt. Die aufgetragenen Werte im Graphen (8) belegen dies.