Praktikumsprotokoll

Versuch Nr. 207
Temperaturstrahlung

Frank Hommes
und
Kilian Klug

Durchgeführt am:
28 Oktober 2003

Inhaltsverzeichnis

1 Theorie **3**
1.1 verwendete Zeichen 3
1.2 Theoretische Hintergründe und Grundlagen 3
1.3 Physikalische Gesetze 4

2 Versuchsaufbau **5**

3 Versuchsdurchführung **6**
3.1 Eichung der Thermosäule 6
3.2 Thermospannung in Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur . 6
3.3 Thermospannung in Abhängigkeit von der Distanz r zwischen den Blenden 7
3.4 Aufnahme der spektralen Verteilung der Temperaturstrahlung bei Tmax = 1200°C 7

4 Auswertung **8**
4.1 Eichfaktor f 8
4.2 Bestimmung des Exponenten von T 8
4.3 Bestimmung des Koeffizienten von T^4 9
4.4 Bestimmung des Exponenten von r 9
4.5 Bestimmung des Koeffizienten von r 9
4.6 Spektrale Verteilung der Temperaturstrahlung 10

1 Theorie

1.1 verwendete Zeichen

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}[J \cdot s]$, Planckscher Wirkungsquantum
$c = 2,9979 \cdot 10^{8}[\frac{m}{s}]$, Lichtgeschwindigkeit
υ, Frequenz
$k = 1,38 \cdot 10^{-23}[\frac{J}{K}]$, Boltzmann Konstante
T, Temperatur
T_E, Umgebungstemperatur
$\Delta F_S = 4,418 \cdot 10^{-5}[m^2]$, Fläche der Kühlungsblendenöffnung
$\Delta F_E = 8,332 \cdot 10^{-5}[m^2]$, Fläche der Detektorblendenöffnung
r, Abstand der Blenden

1.2 Theoretische Hintergründe und Grundlagen

Dieses Experiment befasst sich mit der Untersuchung der Temperatur- bzw. Wärmestrahlung.

Als Wärmestrahlung bezeichnet man die Strahlung die jeder Körper bei einer Temperatur größer null Kelvin in Form von Strahlungsquanten abgibt. Hervorgerufen wird dieses Phänomen dadurch, dass sich immer einige Elektronen in einem angeregten Zustand befinden und beim Zurückfallen auf energetisch niedrigere Zustände Energie abstrahlen.

Idealerweise müsste man zur Messung dieser Strahlung und ihrer Eigenschaften einen sogenannten Schwarzen Körper verwenden. Ein solcher Schwarzer Körper absorbiert sämtliche einfallende Strahlung komplett und somit ist die von ihm emittierte Strahlung seine reine Temperaturstrahlung ohne das Reflexionseffekte auftreten.

Da jedoch in der Natur eine solche ideale Situation nicht auftritt, muss eine möglichst gute Näherung gefunden werden. Die beste Möglichkeit stellt ein Hohlraum dar, dessen innere Wände aus Strahlungsdichtem Material bestehen und der eine (insbesondere im Verhältnis zur inneren Oberfläche) kleine Öffnung aufweist. Dieser Hohlkörper kann erhitzt werden und die aus der kleinen Öffnung austretende, messbare Strahlung stellt dann mit guter Näherung die Temperaturstrahlung eines Schwarzen Körpers da.

Zur Bestimmung der Temperatur- und Entfernungsabhängigkeit der Strahlung, sowie der spektralen Verteilung wird eine sogenannte Thermosäule verwendet. An

dieser Thermosäule kann eine Spannung abgegriffen werden aus der man dann Rückschlüsse ziehen kann auf die Größen die bestimmt werden sollen.

Eine Thermosäule ist eine Reihe hintereinandergeschalteter Themoelemente. Diese bestehen aus miteinander verlöteten Stücken unterschiedlicher Metalle. Dabei tritt eine Kontaktspannung zwischen den zwei Metallarten auf,die von der Temperatur der Lötstellen abhängt. Die eine Lötstelle wird dabei geschwärzt und der Temperaturstrahlung ausgesetzt, während die andere geschützt im hinteren Bereich liegt. In der Thermosäule sind nun diese hinteren Lötstellen thermisch leitend durch einen Kupferblock verbunden, der dazu dient eine konstante und niedrige Temperatur zu gewährleisten.

Die Kontaktspannung wird durch folgenden Effekt hervorgerufen:
Um frei bewegliche Elektronen aus einem Metall herauszuschlagen, muss eine gewisse vom Material abhängige Austrittsarbeit geleistet werden, da die Elektronen von den positiv geladenen Metallionen zurückgehalten werden. Werden nun zwei Metalle mit unterschiedllichen Austrittsarbeiten in Kontakt gebracht (wie hier an den Lötstellen) so wandern Elektronen vom Metall mit der geringeren Austrittsarbeit zum anderen. Dadurch entstehen Raumladungen, so dass sich die Potentiale in den beiden Metallstücken verschieben und eine Spannug entsteht.
An den Austrittskontakten der Thermosäule misst man die Differenz der Kontakspannungen als Thermospannung U_{th}, die über weite Temperaturbereiche proportional zu Temperaturdifferenz ist.

1.3 Physikalische Gesetze

Wir haben folgende Physikalischen Gesetze benutzt:
Um das Stefan-Boltzmannsche Gesetz zu erhalten, müssen wir die Plancksche Strahlungsformel Integrieren:

$$\int_0^\infty dN(v,T) = \int_0^\infty 2 \cdot \frac{h}{c^2} \cdot \frac{v^3}{e^{h \cdot \frac{v}{k} \cdot T} - 1} dv \tag{1}$$

Nach Integration und weiterer Umformung erhalten wir das Stefan-Boltzmannsche Gesetz:

$$S(T) = \frac{2}{15} \cdot \pi^4 \cdot \frac{k^4}{c^2 \cdot h^3} \cdot T^4 \tag{2}$$

Um dieses experimentell überprüfen zu können wird die Strahlungsleistung pro Fläche und Raumwinkel gemessen:

$$S(T)_{\Delta F_S \Delta\Omega} = \frac{2}{15} \cdot \pi^4 \cdot \frac{k^4}{c^2 \cdot h^3} \cdot T^4 \cdot \Delta F_S \Delta\Omega \tag{3}$$

Ist nun auch ein Empfänger im Abstand r vorhanden gilt mit $r^2 >> \Delta F_E$:

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta F_E}{r^2}$$

und für die Gesamtstrahlungsbilanz:

$$S(T)_{ges} = \frac{2}{15} \cdot \pi^4 \cdot \frac{k^4}{c^2 \cdot h^3} \cdot (T^4 - T_E^4) \cdot \frac{\Delta F_S \cdot \Delta F_E}{r^2} \tag{4}$$

Zweckmäßigerweise führt man die Stefan-Boltzmann-Konstante σ ein

$$\sigma := \pi \cdot \frac{2}{15} \cdot \pi^4 \cdot \frac{k^4}{c^2 \cdot h^3} \tag{5}$$

mit der sich die Gesamtstrahlungsleistung vereinfacht zu:

$$S(T)_{ges} = \frac{\sigma}{\pi} \cdot (T^4 - T_E^4) \cdot \frac{\Delta F_S \cdot \Delta F_E}{r^2} \tag{6}$$

Um die Leistung des anfangs zur Eichung verwendeten Wechselstroms zu erhalten, benutzen wir folgende Formel:

$$N_e l = \frac{U_{eff}^2}{R_{ges}^2} R_{th} \tag{7}$$

2 Versuchsaufbau

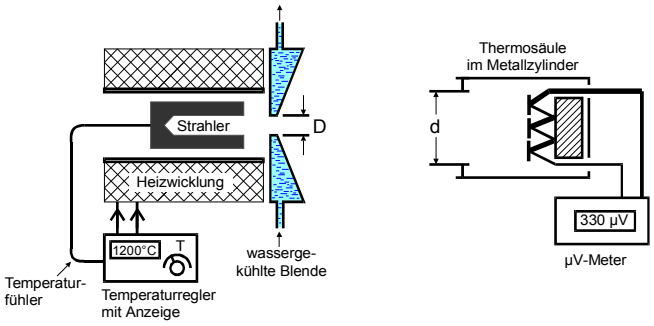


Abbildung 1: Versuchsaufbau

Die Apparatur besteht aus einem zylindrischen Hohlkörper, welcher durch einen elektrischen Rohrofen aufgeheizt wird. Dieser gibt nun Wärmestrahlung

ab, welche durch eine wassergekühlte Blende tritt und auf eine Thermosäule trifft.

Um die Spannung an der Thermosäule zu messen, wird an dieser ein Voltmeter angeschlossen.

Vor der Thermosäule befindet sich eine weitere Halterung für den zweiten Teil des Versuchs, bei dem dort Interferenzbandfilter eingesetzt werden. Damit diese sich nicht aufheizen und dadurch das Messergebniss verfälschen, müssen sie mit Stickstoff gekühlt werden.

3 Versuchsdurchführung

Alle Messreihen werden bei Raumtemperatur durchgeführt. Der Innenurchmesser der Blende vor der Thermosäule beträgt 10,3mm, derjenige der Kühlungsblende 7,5mm. Daraus ergeben sich die Flächen der Blendenöffnungen:

$$\Delta F_S = 83,32mm^2$$

und

$$\Delta F_E = 44,17mm^2$$

Vor und zwischen einzelnen Messungen wird am μV-Meter nachjustiert um z.b. Aufheizeffekte zu kompensieren. Zwischen den Messungen während die zu variierenden Größen auf einen neuen Wert eingestellt werden wird die Thermosäule mittels einer beschichteten Pappscheibe vor der Strahlung abgeschirmt.

3.1 Eichung der Thermosäule

Zunächst muss die verwendete Thermosäule geeicht werden. Dazu wird mit einer gesonderten Messreihe die Thermospannung in Abhängigkeit von der Effektivspannung eines angeschlossenen Wechselstromgenerators ermittelt. Die auftretende Thermospannung wird dann mit einem μV-Meter gemessen, wobei die Effektivspannung in 1 Volt Schritten von 0 bis 10 Volt erhöht wird. Der für die Ermittlung des Eichfaktors notwendige Innenwiderstand des Generators kann am Gerät abgelesen werden und beträgt 683Ω.

3.2 Thermospannung in Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur

Die Strahlungstemperatur läuft von 200°C bis Tmax = 1200°C. Um die Abhängigkeit der Thermospannung von der Temperatur zur ermitteln, wird die Thermosäule

in einen konstant gehaltenen Abstand (20cm) zur Austrittsöffnung des Rohroffens (bzw. der Kühlungsblende) gebracht. Dann wird die Temperatur am Ofen von 200°C bis 1200°C in Schritten von 100°C erhöht (ab 1000°C in 50°C-Schritten) und mit dem μV-Meter die korrespondierende Thermospannung gemessen. Dabei wird die angezeigte Spannung erst nach ca. einer Minute abgelesen um die Trägheit der Thermosäule auszugleichen.

3.3 Thermospannung in Abhängigkeit von der Distanz r zwischen den Blenden

Um die Abhängigkeit der Thermospannung vom Abstand zwischen der Thermosäule und der Öffnung des die Wärmestrahlung emitierenden Körpers zu bestimmen wird der Ofen auf einer konstanten Temperatur von 1200°C gehalten. Dann wird der Abstand beginnend bei 17,5cm zwischen der Blende vor der Thermosäule und der Kühlungsblende vor dem Ofen in Schritten von je 2,5cm erhöht und nach einer Anpassungszeit die entsprechende Thermospannung mit dem μV-Meter erfasst. Die Messreihe wird fortgesetzt bis zu einem Abstand der Blenden von 50,0cm.

3.4 Aufnahme der spektralen Verteilung der Temperaturstrahlung bei Tmax = 1200°C

Bei dieser Messreihe wird der Abstand der Blenden konstant bei 20,0cm, die Temperatur des Ofens konstant bei 1200°C gehalten. Um die spektrale Verteilung der Strahlung zu ermitteln werden sogenannte Interferenzbandfilter verwendet. Diese Filter können nur jeweils von einem schmalen Frequenzbereich von Strahlung passiert werden. Mithilfe einer Reihe unterschiedlicher Filter, die in den Strahlengang eingebracht werden, kann die Thermospannung einzeln für relativ schmale Frequenzbereiche bestimmt werden. Um eine Verfälschung durch Aufheizung der Filter zu vermeiden (die dadurch selbst zu Strahlern würden) und eine Beschädigung auszuschließen werden diese mittels Stickstoff gekühlt.

4 Auswertung

4.1 Eichfaktor f

Den Eichfaktor f haben wir folgendermaßen berechnet:

$$f = \frac{U_{th}}{N_{el}}$$

$$N_{el} = \frac{U_{eff}^2 * R_{th}}{R_{ges}^2}$$

$U_{eff} in [V]$	$U_{th} in [mV]$	$N_{el} in [W]$	Eichfaktor in [V/W]
1	0,005	$2{,}75114 \cdot 10^5$	0,18174
2	0,015	$1{,}10046 \cdot 10^4$	0,13631
3	0,037	$2{,}47603 \cdot 10^4$	0,14943
4	0,064	$4{,}40183 \cdot 10^4$	0,14539
5	0,102	$6{,}87786 \cdot 10^4$	0,1483
6	0,144	$9{,}90411 \cdot 10^4$	0,14539
7	0,200	0,00135	0,14836
8	0,259	0,00176	0,1471
9	0,340	0,00223	0,15257
10	0,410	0,00275	0,14903

Somit lautet unser Eichfaktor $f = 0,14993(\pm 0,00103)\frac{V}{W}$.
Dabei ist der Widerstand der Thermosäule $R_{th} = 13,34\Omega$, der Innenwiderstand des Generators beträgt 683Ω; der Gesamtwiderstand ist damit $R_{ges} = 696,34\Omega$.
U_{th} ist gegen N_{el} in Abb. 2 aufgetragen.

4.2 Bestimmung des Exponenten von T

Zur Berechnung des Exponenten von T tragen wir logarithmisch U_{th} gegen T auf und erhalten diesen so als Steigung der Ausgleichsgeraden (Abb. 3). Da der letzte Messwert stark abweicht, haben wir ihn zur Berechnung der Ausgleichgeradens außer acht gelassen! Dadurch haben wir statt einem Wert von $4,7(\pm 0,2)$ einen Wert von $4,25(\pm 0,06)$ erhalten, welcher dem Literaturwert von 4 recht nahe kommt!

4.3 Bestimmung des Koeffizienten von T^4

Zur Berechnung des Koeffizienten von T^4, den man als Stefan-Boltzmann-Konstante bezeichnet, wird die folgende bereits umgestellte Gleichung benutzt:

$$\sigma = \frac{S(T)}{(T^4 - T_E^4)} \cdot \frac{\pi \cdot r^2}{\Delta F_E \cdot \Delta F_S}$$

Nun tragen wir $S(T_i)$ gegen $(T_i^4 - T_E^4)$ auf (Abb. 4) und erhalten σ mittels der Steigung der Ausgleichsgeraden. Aus unseren Messwerten ergibt sich σ zu $5,24 \cdot 10^{-8}(\pm 4,09 \cdot 10^{-10}) \frac{W}{K^4 \cdot m^2}$, was dem Literaturwert von $\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8} \frac{W}{K^4 \cdot m^2}$ nahe kommt.

Den hier gemachten Berechnugen liegen folgende Werte und ein konstanter Blendenabstand von 20 cm zugrunde:

U_{th} in [mV]	T in [°C]
0,003	200
0,020	300
0,037	400
0,075	500
0,132	600
0,203	700
0,320	800
0,454	900
0,615	1000
0,708	1050
0,814	1100
0,94	1150
1,07	1200

4.4 Bestimmung des Exponenten von r

Hier beträgt die Temperatur des Ofens konstant 1200°C.
Der Exponent von r wird auf ähnliche Weise ermittelt wie zuvor derjenige von T^4; das heisst er stellt die Steigung der Ausgleichsgeraden in Abb. 5 dar und beträgt $-2,25(\pm 0,02)$.

4.5 Bestimmung des Koeffizienten von r

Für die Bestimmung des Koeffizienten von r wird folgende Formel benutzt - mit T = 1473 K und $T_E = 296,15K$:

$$\sigma = \frac{S(T)}{r^2} \cdot \frac{\pi}{\Delta F_E \cdot \Delta F_S (T^4 - T_E^4)}$$

In Abbildung 6 ist die Strahlungsleistung gegen den Abstand aufgetragen. Wir verwenden hier -2 als Exponent, um eine zu starke Abweichung des Wertes für σ vom Literaturwert zu vermeiden. Die Steigung der Ausgleichsgeraden in Abbildung 6 gibt den gesuchten Koeffizienten an und somit ergibt sich σ zu $5,34 \cdot 10^{-8} (\pm 4,85 \cdot 10^{-10}) \frac{W}{K^4 \cdot m^2}$.

Es wurden folgende Daten verwendet:

Abstand in [cm]	U_{th} in [mV]
17,5	1,4
20,0	1,06
22,5	0,79
25,0	0,634
27,5	0,518
30,0	0,425
32,5	0,355
35,0	0,304
37,5	0,261
40,0	0,224
42,5	0,199
45,0	0,167
47,5	0,142
50,0	0,133

4.6 Spektrale Verteilung der Temperaturstrahlung

Die Formel für die theoretische Berechnung der Plankschen Strahlungskurve lautet:

$$\frac{dP_{Theorie}(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$

Um aus unseren experimentell ermittelten Thermospannungswerten eine vergleichbare Kurve zu erhalten, wurden diese in Leistung umgerechnet und durch $\frac{\Delta F_S \cdot \Delta F_E}{r^2}$, sowie aufgrund des schmalen Frequenzbandes durch die Durchlassbreite $\Delta\lambda$ der jeweils verwendeten Filter dividiert. Auf diese Weise erhält man in beiden

Fällen die Einheit W/m^3. Aufgetragen gegen die mittlere Wellenlänge ist das Ergebnis in Abbildung 7 zu finden.
Die verwendeten Daten sind:

$\lambda_{Filter} in []$	$\Delta\lambda in [nm]$	$U_{th} in [mV]$
1,29	12,7	0,002
1,45	27	0,007
1,72	64,6	0,025
1,96	60	0,025
2,34	116	0,047
2,51	53	0,026
2,65	83,8	0,03
2,9	44	0,021
3,18	65	0,022
3,385	96	0,023
5,3	158	0,017

Man sieht in Abbildung 7, dass die auf Messdaten beruhenden Punkte fast durchgehend oberhalb der nach der theoretischen Formel berechneten Punkte liegen. Dies sollte eigentlich unmöglich sein - eine Erklärung oder ein Fehler ist uns aber nicht aufgefallen.

Die bei unseren eigenen Werten für die Filter mit $\Delta\lambda = 2,51nm$ und $\Delta\lambda = 2,9nm$ auftretenden großen Abweichungen sind uns ebenfalls nicht plausibel erklärbar. Die restlichen Punkte liegen annähernd auf einer sinnvollen Kurve, so dass ein allgemeiner, größerer systematischer Fehler als Ursache ausgeschlossen werden kann. Eine zusätzliche Kontrolle der Werte für den Widerstand des Wechselstromgenerators, der Durchlassbreiten $\Delta\lambda$ der Filter, sowie der Größen der verwendeten Blende (und damit des ΔF_E) erbrachte ebenfalls keine Korrektur.

Der vorgesehene, zwölfte Filter wurde nicht benutzt, da er sich nicht sachgemäß in die Apparatur einsetzen ließ.

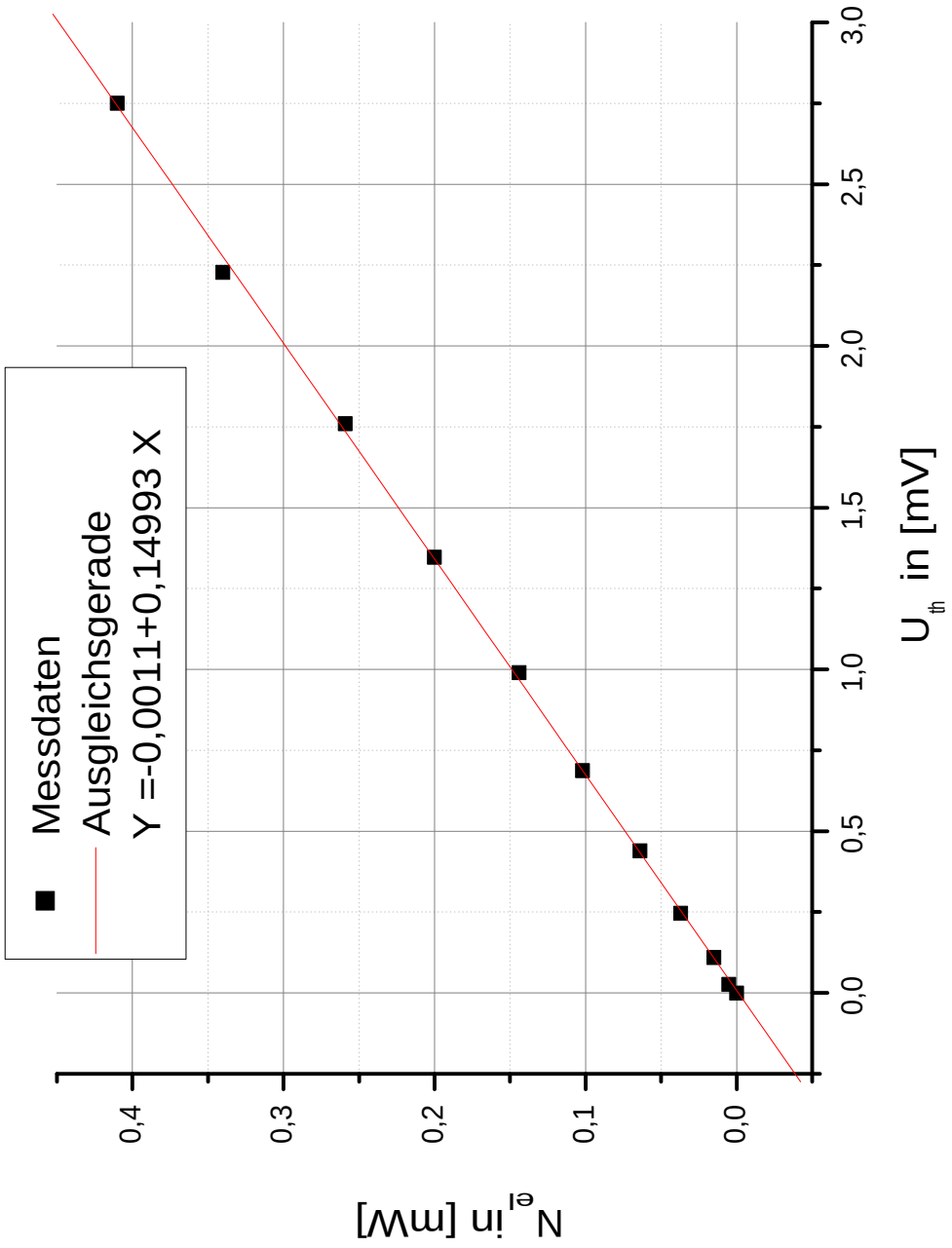


Abbildung 2: Thermospannung gegen Wechselstromleistung

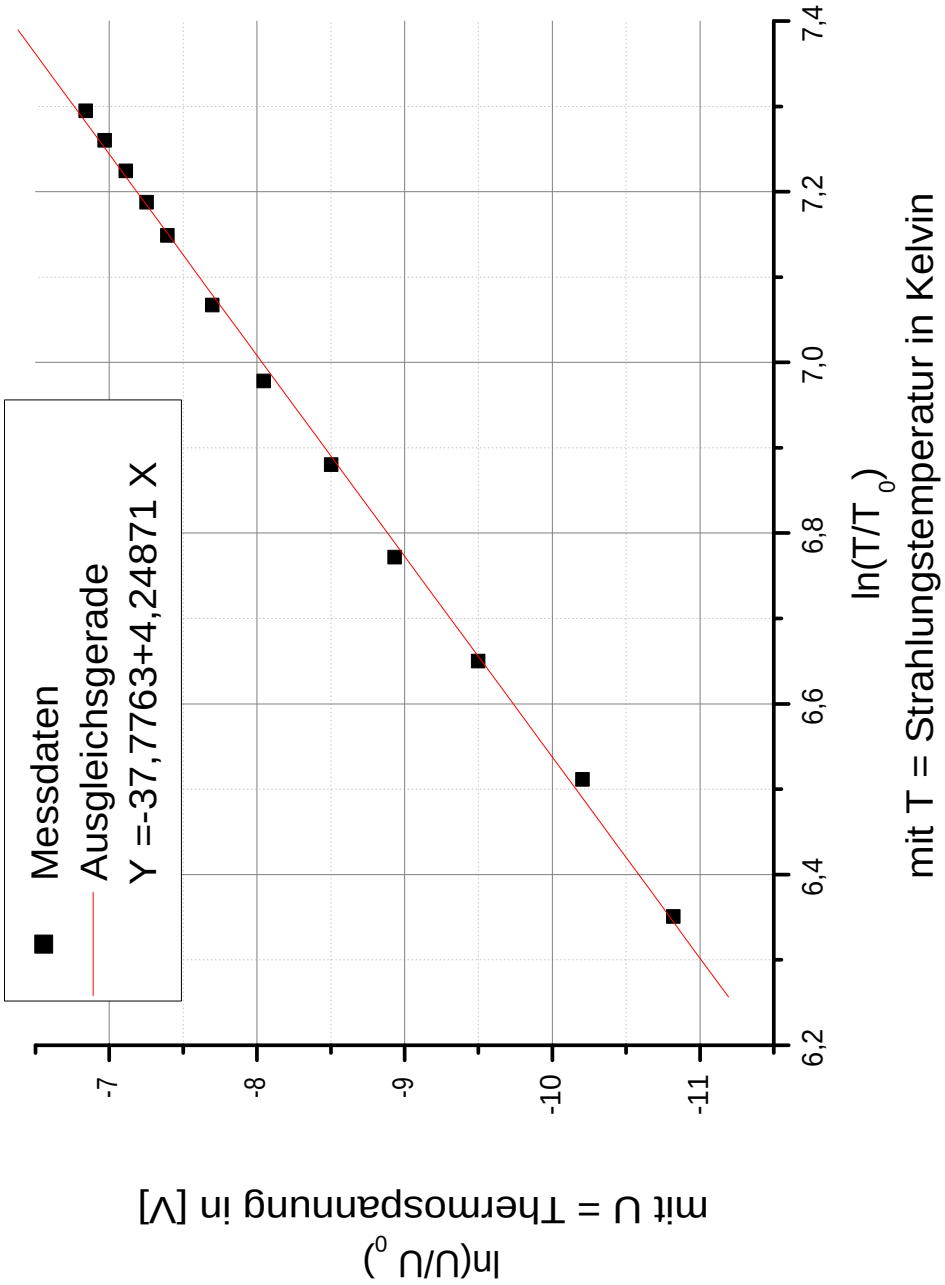


Abbildung 3: Bestimmung des Exponenten von T

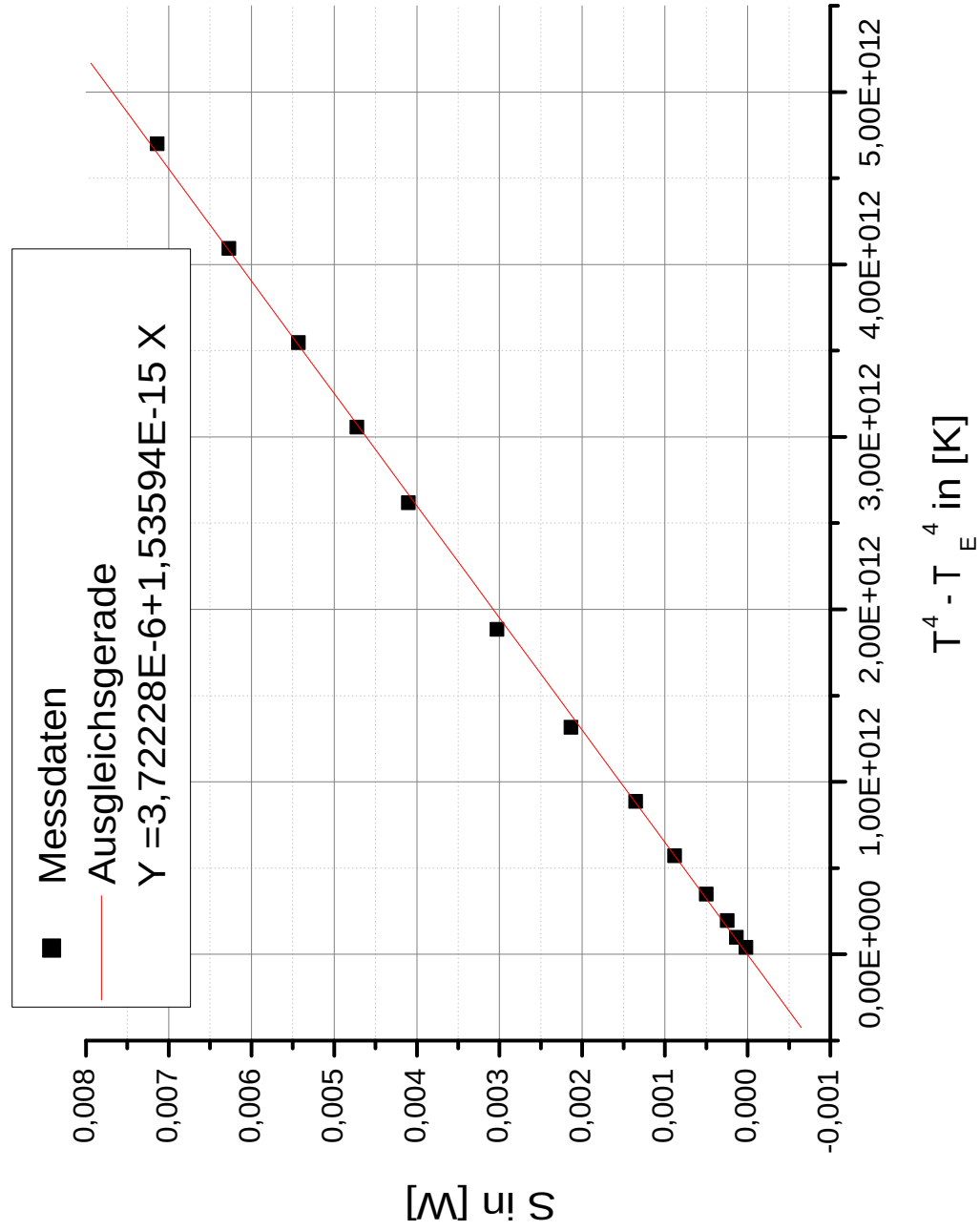


Abbildung 4: Strahlungsleistung gegen Temperatur

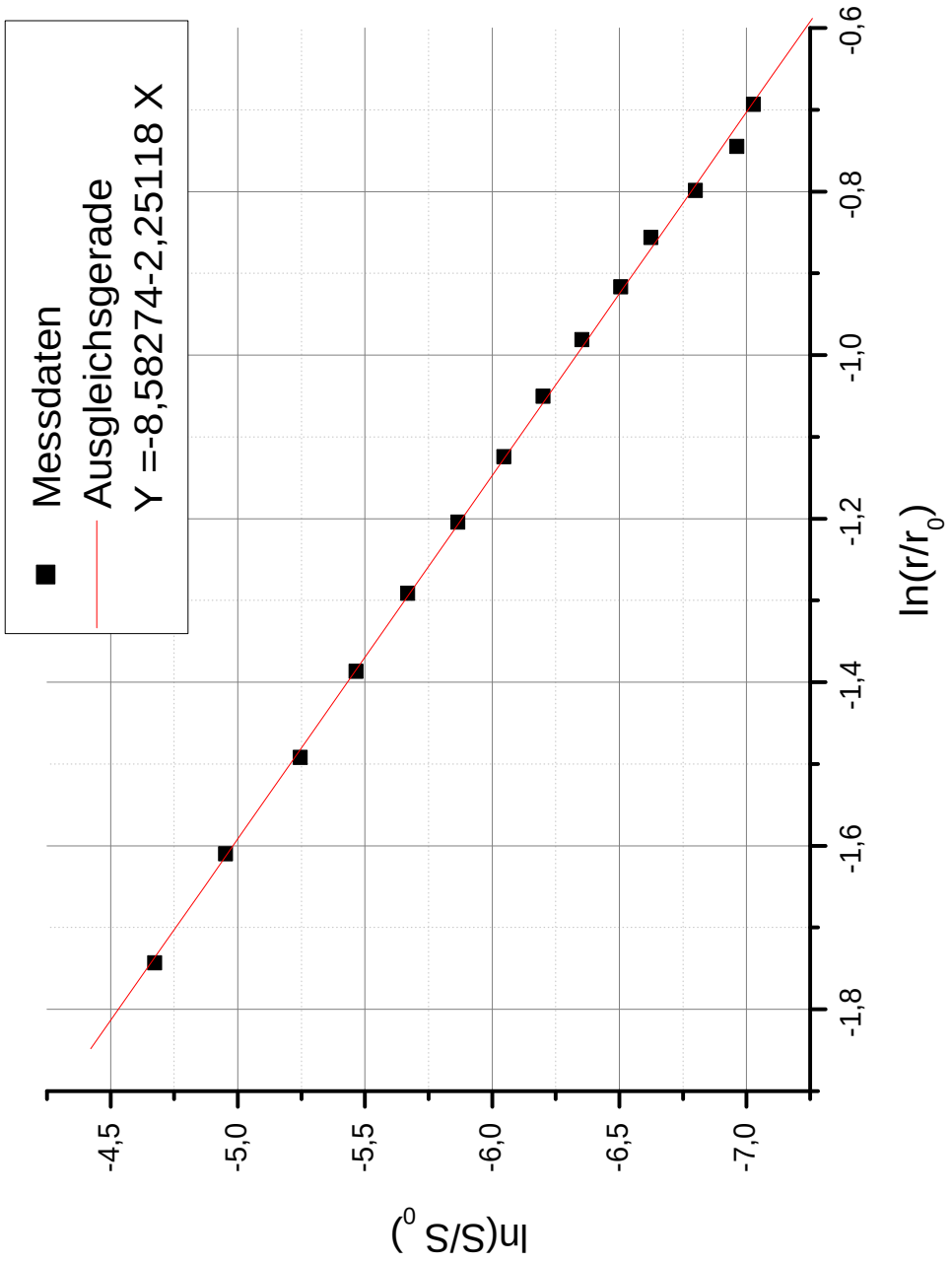


Abbildung 5: logarithmisch Strahlungsleistung gegen Abstand

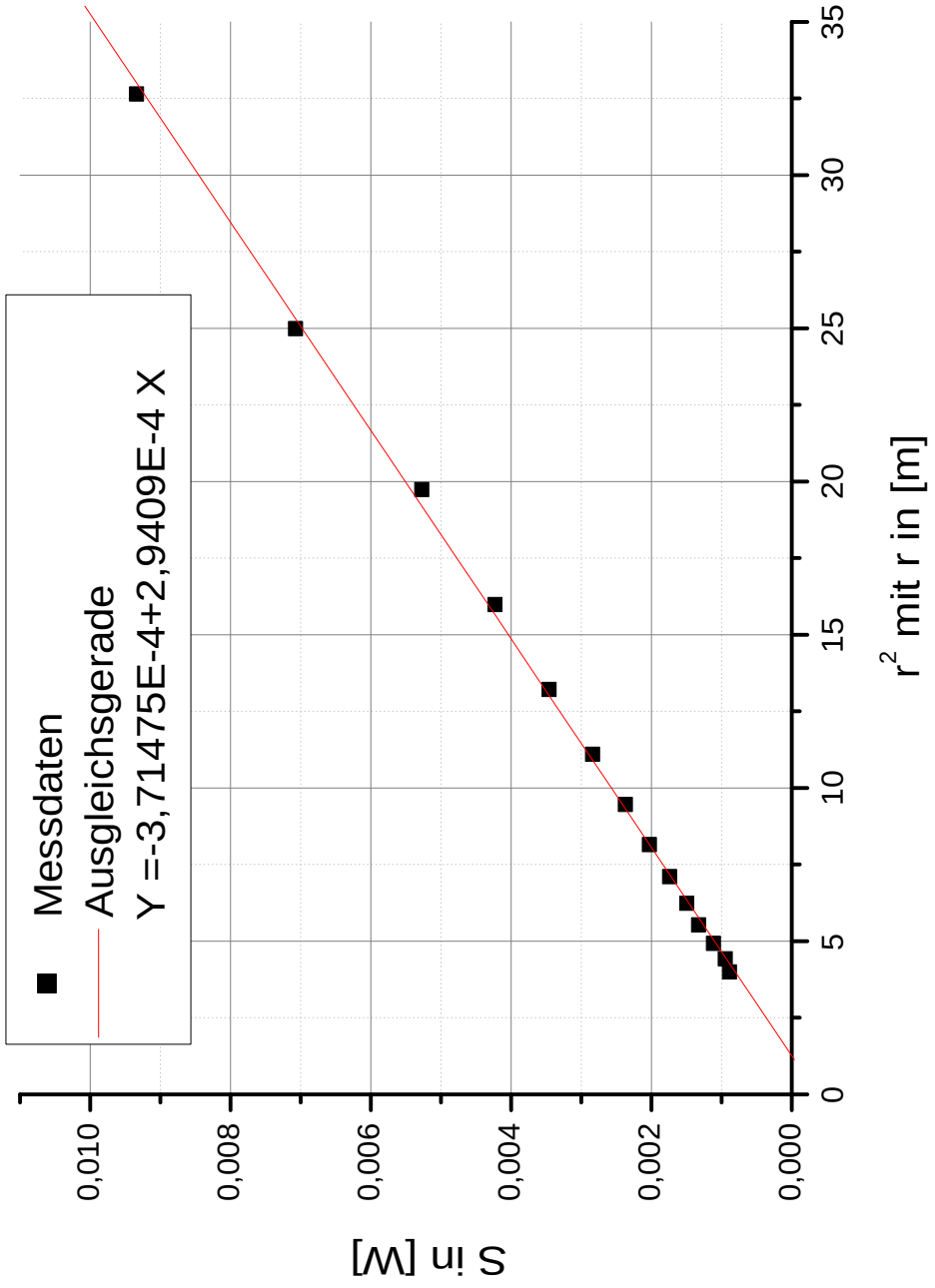


Abbildung 6: Strahlungsleistung in Abhängigkeit vom Abstand

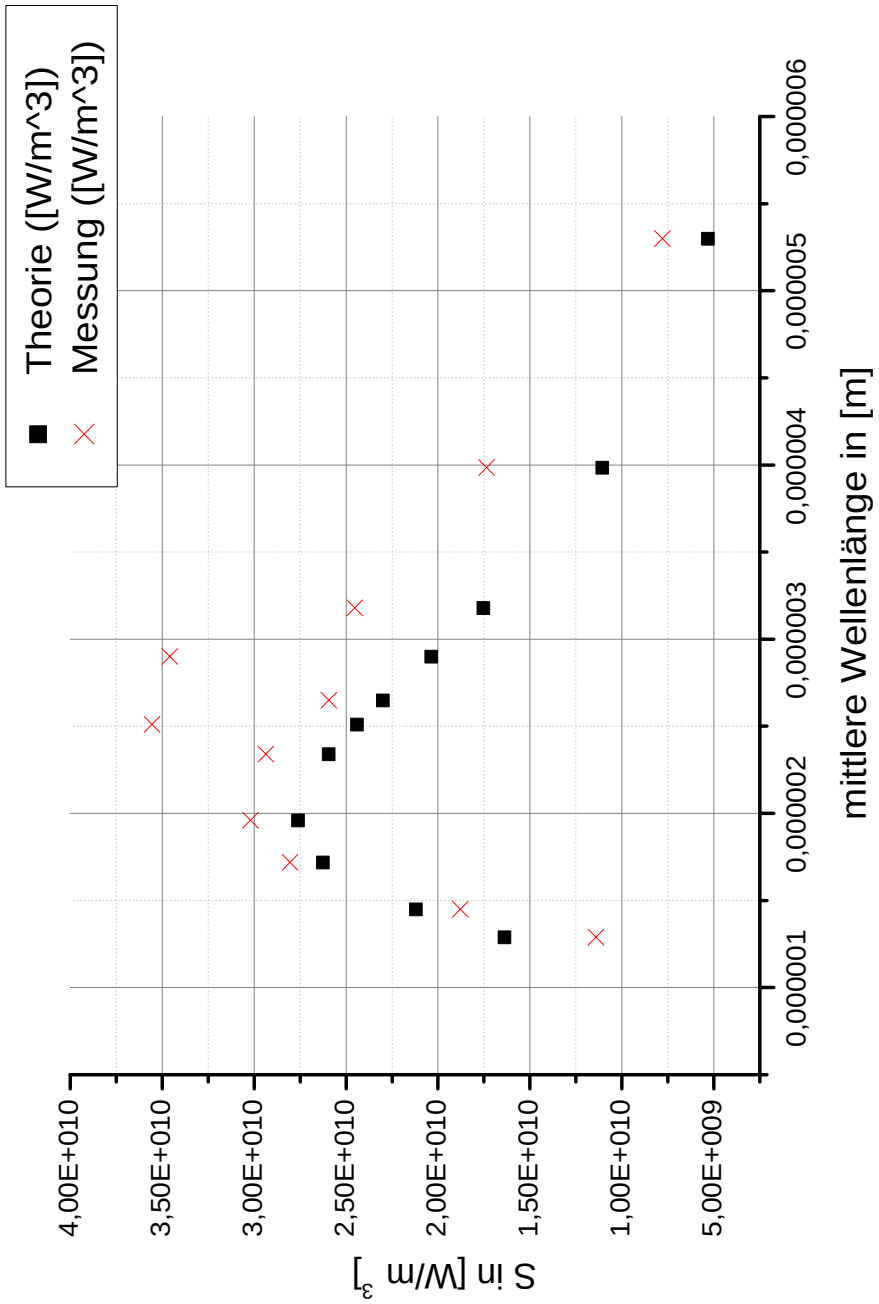


Abbildung 7: Spektralverteilung