

Grundpraktikum der Physik Universität Ulm

Versuch 21 Wärmestrahlung

Sascha Hankele
sascha@hankele.com

Kathrin Alpert
kathrin.alpert@uni-ulm.de

Uwe Jantzen
uwejantzen@gmx.de

durchgeführt am 8. Juni 2007

1. Abgabe: 05. Juli 2007

2. Abgabe: 17. juli 2007

Betreuer: Holger Stefan Janzer

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	3
1.1	Strahlung	3
1.1.1	Wärmestrahlung	3
1.1.2	Grundgrößen und Definitionen	3
1.2	Wärmeübertragung	4
1.3	Lambert-Gesetz	4
1.4	Wechselwirkung von Strahlung und Materie	4
1.4.1	Kirchhoff-Gesetz	5
1.5	Plancksches Strahlungsgesetz	6
1.6	Strahlungsgesetze	7
1.6.1	Rayleigh-Jeans Gesetz	8
1.6.2	Wiensches Strahlungsgesetz	8
1.6.3	Wiensches Verschiebungsgesetz	8
1.6.4	Stefan-Boltzmann Gesetz	8
1.7	Thermosäule	9
1.8	Pyrometrie	10
2	Versuchsbeschreibung	10
2.1	Lesliewürfel	10
2.2	Abstandsgesetz	10
2.3	Abkühlvorgang	11
2.4	Pyrometer	11
3	Auswertung	11
3.1	Aufgabe 1 - Lesliewürfel	11
3.2	Aufgabe 2 - Strahlungsdichte eines schwarzen Strahlers (Rohrofen) in verschiedenen Abständen	12
3.3	Aufgabe 3 - Zusammenhang zwischen abgestrahlter Leistung und Temperatur eines schwarzen Strahlers	13
3.4	Aufgabe 4 - Messung mit einem Digitalpyrometer	16
4	Fehlerbetrachtung	17

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Strahlung

1.1.1 Wärmestrahlung

Heiße Körper senden elektromagnetische Strahlung aus, die sogenannte Temperatur- oder Wärmestrahlung. Im Spektrum schließt sich die Wärmestrahlung direkt an das rote Ende des sichtbaren Lichts an. Das Infrarotspektrum reicht von $0,7\mu m$ bis $1000\mu m$.

Auf Grund von Energieerhaltung wird die abgestrahlte Energie dem Körper in Form von Wärme entzogen.

1.1.2 Grundgrößen und Definitionen

Bei der Messung optischer Strahlung werden folgende Grundgrößen verwendet:

Strahlungsstromdichte Die Strahlungsstromdichte \vec{D} gibt die Intensität I der Strahlung mit Richtung an.

$$|\vec{D}| = I \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (1)$$

Strahlungsfluss Der Strahlungsfluss P gibt die in einem Zeitintervall dt abgestahlte Strahlungsenergie dQ an.

$$P = \Phi = \frac{dQ}{dt} = \int \int \vec{D} d\vec{A} \quad [W] \quad (2)$$

Bestrahlungsstärke Die Bestrahlungsstärke E ist ein Maß für die pro Fläche auffallende Strahlungsleistung.

$$E = |\vec{D}| \cos \alpha \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (3)$$

spezifische Abstrahlung Die spezifische Abstrahlung R bezeichnet den differentiellen Strahlungsfluss dP durch die differentielle Oberfläche dA des Strahlers.

$$R = \frac{dQ}{dA} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (4)$$

1.2 Wärmeübertragung

Der Wärmeaustausch mit der Umgebung kann prinzipiell auf drei Arten geschehen:

Wärmeleitung: Durch den Temperaturunterschied entsteht ein Wärmefluss in einem Kontinuum von Warm nach Kalt. Begründet werden kann dies durch den 2. Hauptsatz der Thermodynamik.

Wärmestrahlung: Elektromagnetische Strahlung, die von der Temperatur T^4 abhängt überträgt Energie an seine Umgebung. Um zu verhindern, dass diese Strahlung das Gefäß verlässt, ist es verpiegelt.

Konvektion: Sie kennzeichnet sich dadurch aus, dass die Wärmeübertragung durch die Bewegung von Teilchen passiert. Bei unterschiedlicher Temperatur in einem Medium entstehen auf Grund der unterschiedlichen Dichteverhältnisse Strömungen in Flüssigkeiten und Gasen.

1.3 Lambert-Gesetz

Da es in der Realität keinen idealen punktförmigen isotropen Strahler gibt, sind Strahlungsquellen in der Regel Flächen. Ein solcher flächenhafter Strahler, der in alle Richtungen die gleiche Strahlungsdichte hat, heißt Lambert-Strahler. Für seine Intensität gilt:

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta \quad (5)$$

Rauhe Oberflächen, wie z. B. bei Papier, sind in guter Näherung Lambert-Strahler.

1.4 Wechselwirkung von Strahlung und Materie

Trifft elektromagnetische Strahlung auf einen Körper, so kann dieser diese absorbieren α , transmittieren τ oder reflektieren ρ . Für einen Körper, der selbst nicht strahlt, gilt auf Grund von Energieerhaltung $\rho + \alpha + \tau = 1$. Je nach Material ergibt sich eine Wellenlängenabhängigkeit der einzelnen Größen.

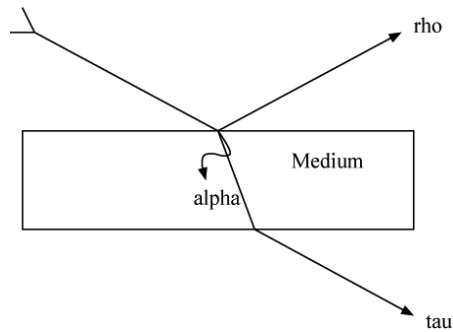


Abb 1: Wechselwirkung mit
Materie

Eine wichtige Fragestellung bei Behandlung von Wärmestrahlung ist die Bestimmung der spektralen Energiedichte der elektromagnetischen Wellen in einem großen Hohlraum, der das Volumen V und die Temperatur T hat. In einem großen Hohlraum erscheint ein kleines Loch mindestens genau so schwarz wie jede andere Fläche.

Das kleine Loch im Hohlraum entspricht einem idealen schwarzen Körper. Kirchhoff zeigte mit Hilfe thermodynamischer Betrachtungen, dass solche ideale schwarze Körper das größte spektrale Emissionsvermögen ($\varepsilon_s = 1$) aufweisen.

Fällt ein Strahl durch das kleine Loch, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieser wieder austritt sehr gering. Der Strahl wird mehrere Male reflektiert und gibt dabei durch Absorption an den Wänden seine komplette Energie ab.

Graue Strahler heißen Körper mit einem konstanten Emissionsgrad $\varepsilon < 1$. Ist ε abhängig von der Wellenlänge, so handelt es sich um einen farbigen Strahler. Ein weißer Strahler hat einen Emissionsgrad von $\varepsilon = 0$.

Die Temperatur, bei der ein schwarzer Strahler die gleiche Farbe hat wie der strahlende Körper, bezeichnet man als Farbtemperatur eines realen Körpers.

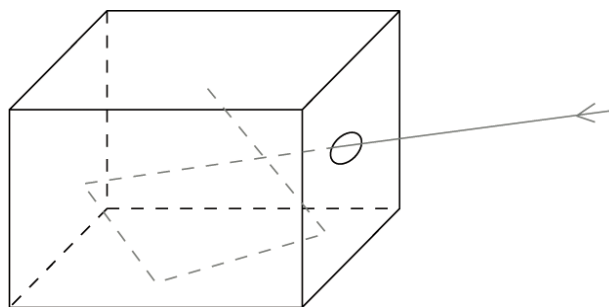


Abb 2: Hohlraumstrahler

1.4.1 Kirchhoff-Gesetz

Befindet sich ein Körper im thermischen Gleichgewicht, so beschreibt das Strahlungsgesetz von Kirchhoff den Zusammenhang zwischen Absorption und Emission eines realen Körpers

$$\frac{\varepsilon(\nu, T)}{\alpha(\nu, T)} = \varepsilon_S(\nu, T) \quad (6)$$

Dies bedeutet, dass Strahlungsabsorption und -emission einander entsprechen. Kann also ein Körper bei einer bestimmten Wellenlänge nicht emittieren, so kann er auch nicht absorbieren.

Da der Absorptionsgrad den Wert 1 nicht überschreiten kann, ergibt sich, da sich das spektrale Emissionsvermögen proportional verhält, dass das spektrale Emissionsvermögen maximal ist für einen schwarzen Strahler.

Die Strahlungsverteilung eines schwarzen Strahlers sieht wie folgt aus:

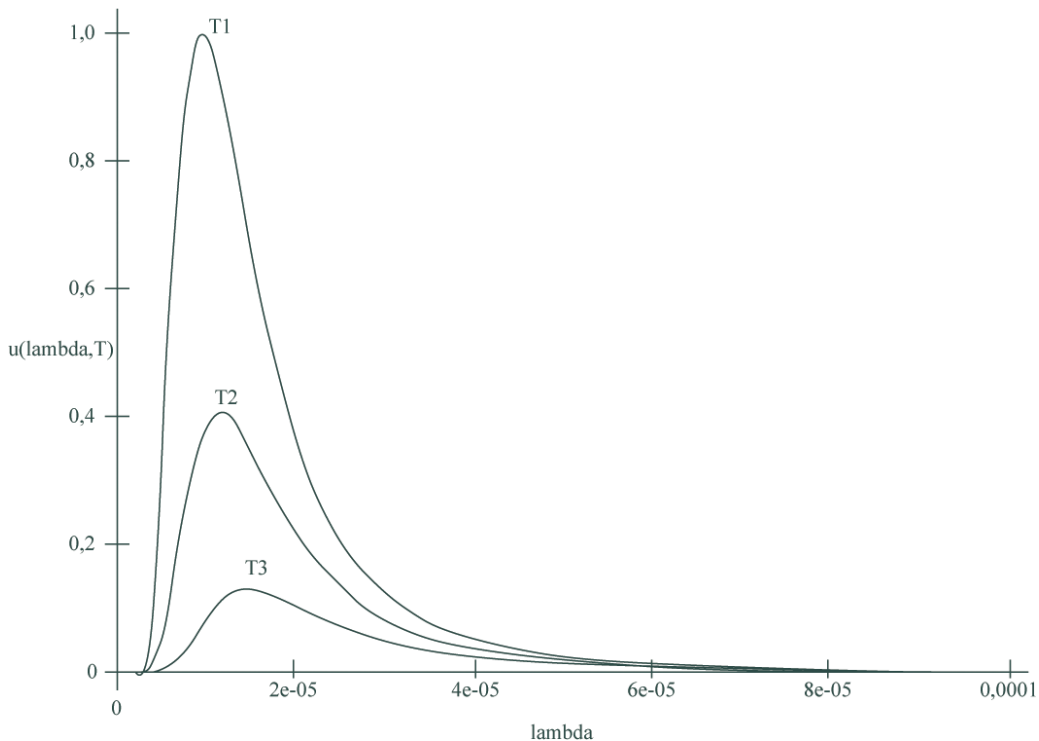


Abb 3: $u(\lambda, T)$ für $T_1 = 300K$, $T_2 = 250K$, $T_3 = 200K$

1.5 Plancksches Strahlungsgesetz

Um ein Strahlungsgesetz zu finden, das den experimentellen Beobachtungen entsprach führte MAX PLANCK um 1900 die Energiequanten ein, d. h. er postulierte, dass Energie nur in bestimmten Portionen $E = nh\nu$ emittiert oder absorbiert werden kann, wobei n eine ganze Zahl ist.

Im elektromagnetischen Strahlungsfeld mit der spektralen Energiedichte $u(\nu, T)$, kann ein Atom vom Zustand E_1 in den nächst höheren Zustand E_2 übergehen, indem es ein

Photon $h\nu$ absorbiert. Umgekehrt gibt das Atom beim Übergang vom angeregten Zustand in den Grundzustand ein Photon der entsprechenden Energie ab. Dies kann auf zwei Arten geschehen: angeregt durch das Strahlungsfeld oder spontan.

Laut Boltzmann gilt für die Besetzungszustände:

$$N_i = e^{\frac{-E_i}{kT}} \quad (7)$$

wobei k die Boltzmannkonstante ist $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$. Da im stationären Gleichgewicht die Absorptionsrate und Emissionsrate identisch sein muss, lässt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$B_{21}N_2 + A_{21}u(\nu, T)N_2 = A_{12}u(\nu, T)N_1 \quad (8)$$

$$u(\nu, T) = \frac{B_{21}N_2}{A_{12}N_1 - A_{21}N_2} \quad (9)$$

$$u(\nu, T) = \frac{B_{21}}{A_{12}e^{\frac{h\nu}{kT}} - A_{21}} \quad (10)$$

Für $T \rightarrow \infty$ muss $u(\nu, T) \rightarrow \infty$ streben (vgl. Abb. 3). Also gilt für die Einsteinkoeffizienten $A_{12} = A_{21}$.

$$u(\nu, T) = \frac{B_{21}}{A_{12}} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (11)$$

Durch Betrachtungen, die vom Eigenschwingungsspektrum eines Hohlraums ausgehen, folgt

$$\frac{B_{21}}{A_{12}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (12)$$

Damit erhält man das Planck'sche Strahlungsgesetz

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (13)$$

1.6 Strahlungsgesetze

Die frequenzbereichabhängigen Gesetze von Rayleigh-Jeans und Wien erhält man direkt aus der Planck'schen Strahlungsformel. Historisch betrachtet ist das Rayleigh-Jeans Gesetz älter als das Planck'sche Strahlungsgesetz. Es stellt einen Ansatz der klassischen Elektrodynamik dar, die Strahlungsintensität eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge zu beschreiben. Dies führte u. a. zur Ultraviolettkatastrophe, da sich zu dieser Zeit die Abweichung von den Messwerten bei niedrigen Frequenzen nicht in einem Gesetz vereinbaren ließ.

1.6.1 Rayleigh-Jeans Gesetz

Für sehr kleine Frequenzen $h\nu \ll kT$ ergibt sich aus (13) mit Hilfe von Taylor $e^{\frac{h\nu}{kT}} \approx 1 + \frac{h\nu}{kT}$ das Rayleigh-Jeans Gesetz:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}kT \quad (14)$$

1.6.2 Wiensches Strahlungsgesetz

Für sehr große Frequenzen $h\nu \gg kT$ ergibt sich aus (13), wenn man die 1 gegenüber der e -Funktion vernachlässigt, das Wien'sche Strahlungsgesetz:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}e^{-\frac{h\nu}{kT}} \quad (15)$$

1.6.3 Wiensches Verschiebungsgesetz

Durch Ableiten von (13) und Nullstellensuche erhält man das Wien'sche Verschiebungsgesetz. Mit dessen Hilfe lässt sich berechnen, bei welcher Frequenz ν die spektrale Energiedichte $u(\nu, T)$ ein Maximum annimmt.

$$\frac{du(\nu, T)}{d\nu} = \frac{3 \cdot 8\pi h\nu^2}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} + \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{h}{kT} (-1) \frac{e^{\frac{h\nu}{kT}}}{(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)^2} \quad (16)$$

$$\frac{du(\nu, T)}{d\nu} = \nu^2 \left(\frac{24\pi h}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} - \frac{8\pi h\nu}{c^3} \frac{h}{kT} \frac{e^{\frac{h\nu}{kT}}}{(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)^2} \right) \quad (17)$$

Die Lösung $\nu^2 = 0$ macht hier keinen sinn. Daher muss die Klammer verschwinden:

$$\frac{24\pi h}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} - \frac{8\pi h\nu}{c^3} \frac{h}{kT} \frac{e^{\frac{h\nu}{kT}}}{(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)^2} = 0 \quad (18)$$

Für λ erhält man daraus:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} K \quad (19)$$

Anwendungen für das Wien'sche Verschiebungsgesetz sind z. B. die Bestimmung der Sonnenoberflächentemperatur oder die kosmischen Hintergrundstrahlung.

1.6.4 Stefan-Boltzmann Gesetz

Das Stefan-Boltzmann Gesetz setzt die von einem schwarzen Strahler thermisch abgestrahlte Leistung $R(T)$ in Abhängigkeit zu seiner Temperatur T . Durch Integration über die spektrale

Energiedichte ergibt sich mit Hilfe von Substitution

$$R(T) = \iint u(\nu, T) = \int_0^\pi \int_0^\infty \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\vartheta d\nu \quad (20)$$

$$R(T) = \pi \int_0^\infty \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu \quad (21)$$

das Stefan-Boltzmann Gesetz

$$R(T) = \sigma T^4 \quad (22)$$

wobei $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ ist.

1.7 Thermosäule

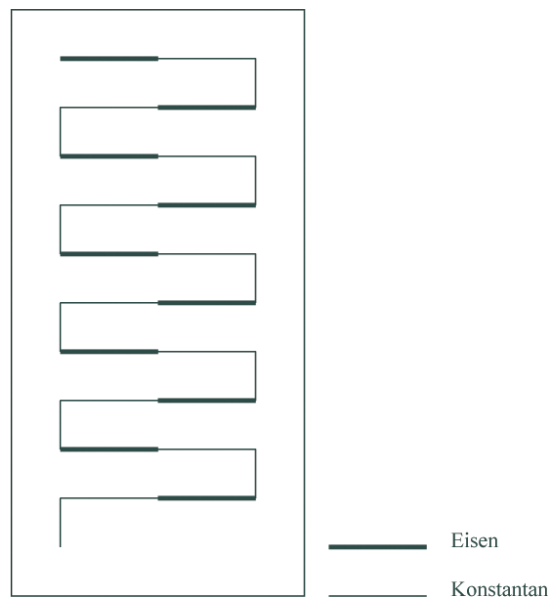


Abb 4: Thermosäule

Bei einer Thermosäule wird die Temperaturabhängigkeit der Kontaktspannung zwischen zwei verschiedenen Metallen (z.B. Manganin und Konstantan) genutzt. Die beiden Metalle sind miteinander verlötet, wobei eine Lötstelle auf einer genau bekannten Temperatur gehalten wird und die andere auf die zu messende Temperatur.

Aus der Spannung lässt sich dann die Temperaturdifferenz berechnen, aus der die zu messende Temperatur folgt. In der Praxis werden zur Steigerung der Genauigkeit mehrere Elemente hintereinander geschaltet.

1.8 Pyrometrie

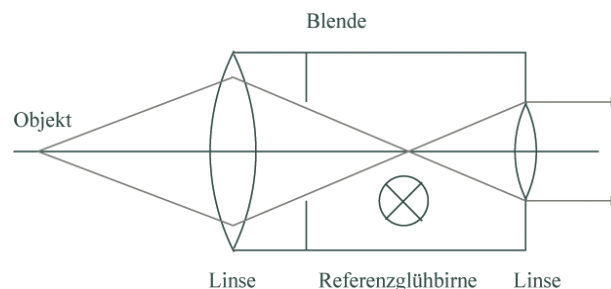


Abb 5: Aufbau eines opt. Pyrometers

Mit Hilfe eines Pyrometers lassen sich Temperaturen berührungslos messen. Da die Intensität der emittierten Strahlung eines Körpers nur von der Temperatur abhängt (siehe Boltzmann-Gesetz), lässt sich die Temperatur bestimmen.

Wichtig dabei ist allerdings, dass für reale Körper eine Korrektur vorgenommen werden muss, da es sich meist nicht um schwarze Körper handelt.

Weiter gibt es verschiedene Arten von Pyrometern. Oben abgebildet ist ein optisches Pyrometer, das über Helligkeitsvergleich mit einer Referenzbirne funktioniert. Weitere Arten sind z.B. das Quotientenpyrometer und das Schmalbandpyrometer zur Messung unterschiedlicher Frequenz- und Temperaturbereiche.

2 Versuchsbeschreibung

2.1 Lesliewürfel

Ein Lesliewürfel ist ein mit Wasser befüllbarer Würfel, der vier unterschiedliche Aussenseiten besitzt. Es gibt eine schwarze, eine spiegelnde, eine matt graue und eine weiße Seite. Mit Hilfe eines Thermoelements wird in gleichem Abstand die abgestrahlte Intensität in Volt sowie die Temperatur gemessen. Die verschiedenen Seiten werden so in Verhältnis zueinander gebracht.

2.2 Abstandsgesetz

Vor einem Ofen mit konstanter Temperatur wird eine wassergekühlte Blende angebracht. Mit Hilfe einer Sonde lässt sich die Ofentemperatur bestimmen. Mit Hilfe einer Thermosäule bestimmt man die Abgestrahlte Leistung (bzw. Spannung) im Abstand von 10 bis 90 cm.

Da es sich näherungsweise um eine punktförmige Wärmequelle handelt, ergibt sich ein kugelförmiges Abstrahlverhalten. Es ist also ein Abfallen der Spannung mit r^{-2} zu erwarten.

2.3 Abkühlvorgang

Nach abschalten des Ofens wird nun in einer festen Entfernung wieder eine der abgestrahlten Leistung proportionale Spannung sowie die Ofentemperatur gemessen. Über das Stefan-Boltzmann Gesetz (22) erhält man folgende Formel

$$U = \sigma \frac{VeA_B A_S (T^4 - T_0^4)}{\pi d^2} \quad (23)$$

Dabei ist die Empfindlichkeit der Thermosäule $e = 0,16 \frac{\text{mV}}{\text{mW}}$ und der Verstärkungsfaktor $V = 1000$. A_B und A_S sind die Flächen der Blendenöffnungen vor der Thermosäule bzw. vor dem Ofen. d ist der Abstand zwischen beiden Blenden.

Aus den gemessenen Daten lässt sich die Konstante σ bestimmt indem man eine Regressionsgerade zeichnet und direkt die Steigung σ erhält.

2.4 Pyrometer

In diesem Versuchsteil wurde mit Hilfe eines Pyrometers die Temperatur einer Glühwendel in einer Glühbirne bestimmt. Die Helligkeit der Glühbirne wurde über eine Spannungsquelle mittels Spannung U und Strom I eingestellt.

3 Auswertung

3.1 Aufgabe 1 - Lesliewürfel

Wie in der Versuchsbeschreibung erklärt wird die abgestrahlte Intensität in Volt, sowie die Temperatur gemessen. In folgender Tabelle finden sich die Werte von zwei Messreihen:

	V	C	V	C
Weiß	0,99	81	0,946	76
Grau (matt)	0,155	78	0,316	75,5
Schwarz	1	78	0,95	75
Verspiegelt	0,52	77	0,12	74,5

Stellt man alle Seiten ins Verhältnis zur schwarzen Seite, erhält man folgendes Ergebnis:

Weiss = $0,97 \cdot \text{Schwarz}$

Grau = $0,24 \cdot \text{Schwarz}$

Verspiegelt = $0,33 \cdot \text{Schwarz}$

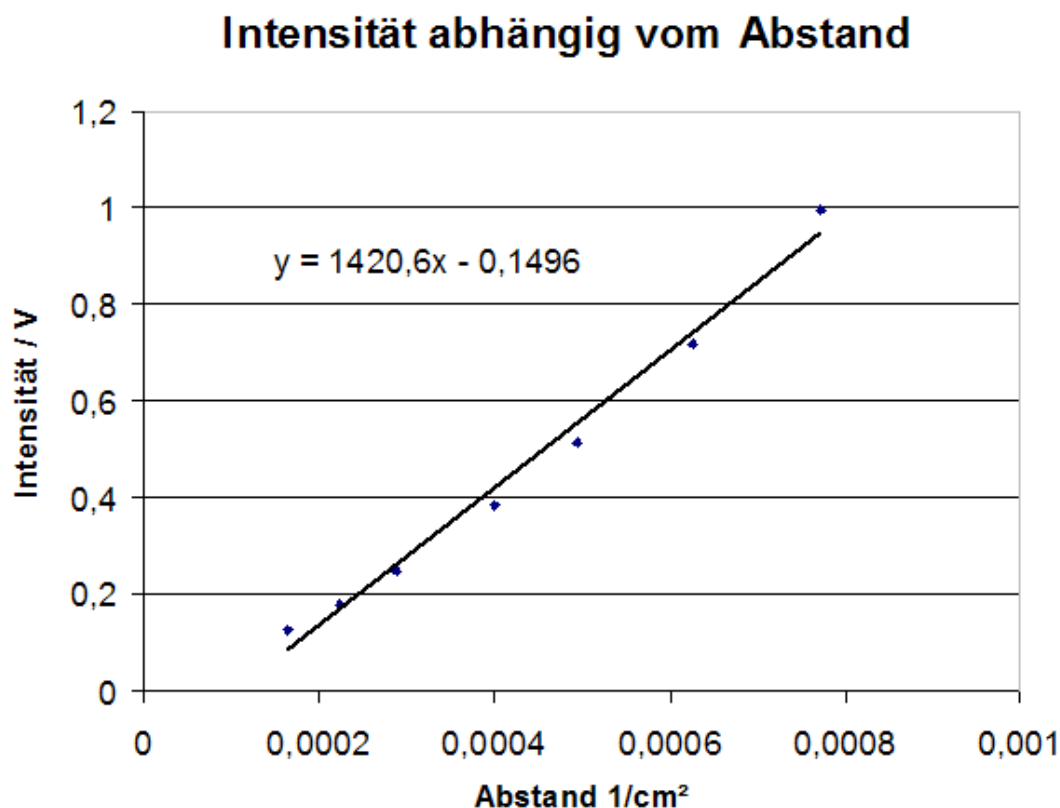
Die Auswertung zeigt den qualitativen Zusammenhang. Da ja Absorbtionsgrad = Emissionsgrad hätte man zunächst jedoch erwartet, dass die weisse Seite im Bereich der Grauen oder Verspiegelten liegen würde. Da sich die Wärmestrahlung jedoch im nicht sichtbaren Spektrum, d.h. im langwelligeren Bereich befindet, spielt die weisse Farbe keine Rolle für die Emissions- bzw Absorptionscharakteristik der untersuchten Fläche. Dies führt auch zur Erkenntnis, dass die Alufolie einer zu backenden Folienkartoffel so angebracht werden sollte, dass die spiegelndere Seite innen ist. So wird die Wärme innen festgehalten, wohingegen von aussen neue Hitze eindringen kann.

3.2 Aufgabe 2 - Strahlungsdichte eines schwarzen Strahlers (Rohrofen) in verschiedenen Abständen

Um zu ermitteln wie die Strahlungsintensität mit dem Abstand abnimmt benutzten wir einen Rohrofen und eine Thermosäule zur Messung, die in immer größeren Abständen positioniert wurde. Aus der Theorie erwarten wir einen quadratisch abnehmenden Zusammenhang, da sich elektromagnetische Strahlung in Form einer Kugelwelle ausbreitet und die Oberfläche einer Kugel ja mit dem Radius im Quadrat zunimmt. Hier nun die Messtabelle:

Abstand / cm	Spannung / V
36	0,996
40	0,72
45	0,513
50	0,385
59	0,247
67	0,178
78	0,126
90	0,018

Wenn man nun die Werte der Spannung über $1/\text{Abstandsquadrat}$ aufträgt sollte man eine Gerade erhalten. Die siehts man in folgendem Schaubild.



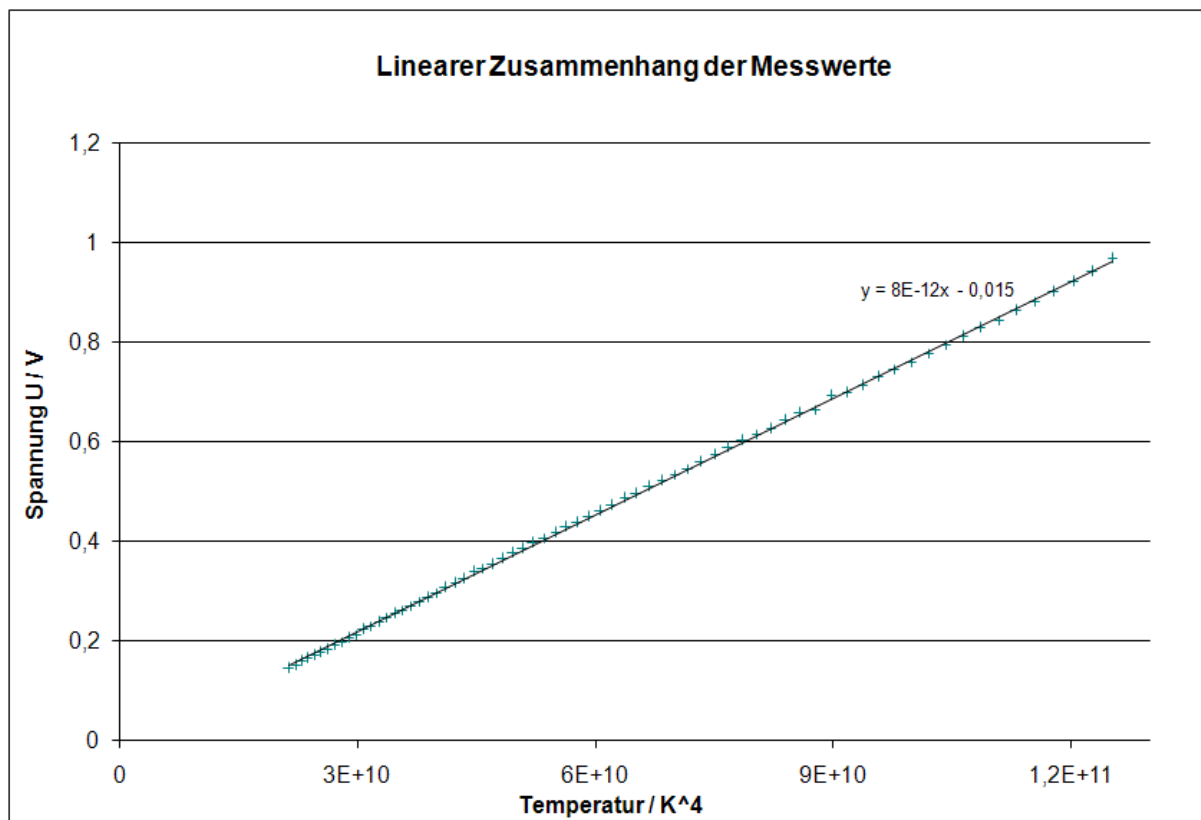
Die Abweichung der Gerade kommt durch die Ausdehnung unseres strahlenden Körpers, die natürlich stark von einer punktförmigen Strahlungsquelle abweicht.

3.3 Aufgabe 3 - Zusammenhang zwischen abgestrahlter Leistung und Temperatur eines schwarzen Strahlers

Wir maßen bei festem Abstand der Thermosäule die abgestrahlte Intensität in Form von Spannung des Rohrofens bei gleichzeitiger Temperaturmessung. Hierzu hatten wir eine Pt-100 Sonde, die uns einen Widerstand im Rohrofen anzeigte der mit fallender Temperatur sank. Aus diesem konnte über Tabellen die jeweilige Temperatur bestimmt werden. In diesem Versuchsteil geht es darum die T^4 Abhängigkeit der Intensität aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz aufzuzeigen, zusätzlich soll noch genau die Stefan-Boltzmann-Konstante bestimmt werden. Da nicht nur die Intensität sondern auch direkt die Spannung sich proportional zu T^4 verhält ($U \sim T^4$) können wir einfach die Spannung über T^4 auftragen und sollten einen linearen Zusammenhang erhalten. Hierzu müssen wir bei der Auftragung von T^4 die Zimmertemperatur T_0^4 abziehen. Nun ersteinmal die Messtabelle.

Pt-100 /Ohm	U /V	Temp / C	Pt-100 /Ohm	U /V	Temp / C
123,1	0,968	331,2	88,1	0,438	233,5
122,1	0,943	328,4	87,1	0,43	230,8
121,1	0,923	325,6	86,1	0,417	228
120,1	0,902	322,7	85,1	0,408	225,3
119,1	0,883	319,9	84,1	0,398	222,5
118,1	0,864	317,1	83,1	0,387	219,8
117,1	0,846	314,3	82,1	0,377	217,1
116,1	0,829	311,5	81,1	0,366	214,3
115,1	0,812	308,6	80,1	0,355	211,6
114,1	0,796	305,8	79,1	0,347	208,9
113,1	0,779	303	78,1	0,34	206,1
112,1	0,762	300,2	77,1	0,326	203,4
111,1	0,747	297,4	76,1	0,317	200,7
110,1	0,731	294,6	75,1	0,308	198
109,1	0,714	291,8	74,1	0,298	195,3
108,1	0,7	289	73,1	0,288	192,5
107,1	gerätefehler	286,2	72,1	0,28	189,8
106,1	gerätefehler	283,4	71,1	0,272	187,1
105,1	0,659	280,6	70,1	0,263	184,4
104,1	0,644	277,8	69,1	0,256	181,7
103,1	0,627	275	68,1	0,248	179
102,1	0,617	272,2	67,1	0,238	176,3
101,1	0,603	269,5	66,1	0,231	173,6
100,1	0,589	266,7	65,1	0,223	170,9
99,1	0,575	263,9	64,1	0,214	168,2
98,1	0,561	261,1	63,1	0,206	165,5
97,1	0,547	258,4	62,1	0,199	162,8
96,1	0,535	255,6	61,1	0,191	160,1
95,1	0,523	252,8	60,1	0,184	157,5
94,1	0,51	250,1	59,1	0,178	154,8
93,1	0,497	247,3	58,1	0,172	152,1
92,1	0,487	244,5	57,1	0,165	149,4
91,1	0,474	241,8	56,1	0,159	146,7
90,1	0,461	239	55,1	0,152	144,1
89,1	0,449	236,3	54,1	0,146	141,4

Nun Darstellung im Diagramm mit Ausgleichsgerade.



Man kann sehr schön die erwartete Proportionalität erkennen. Nun wird aus den Messwerten noch der exakte Wert der Stefanboltzmannkonstante bestimmt. Hier zu führen wir eine lineare Regression der Messwerte mit einer Hilfsfunktion durch.

$$U = \sigma \cdot \frac{d_O \cdot d_T \cdot e \cdot (T^4 - T_0^4)}{\pi \cdot r^2} = \sigma \cdot x$$

Tragen wir nun so die Spannung auf erhalten wir aus der Steigung der Geraden direkt die Stefan-Boltzmannkonstante. Hier ist $d_O = (2 \pm 0,01)cm$ ist der Durchmesser der Blende am Ofen, $d_T = (2 \pm 0,01)cm$ ist der Durchmesser der Blende an der Thermosäule, $e = 0,16 \frac{V}{W}$ ist die Empfindlichkeit der Thermosäule, T die jeweils gemessene Temperatur und $T_0 = (27 \pm 0,2)C$ die Zimmertemperatur.

Wir erhalten laut Ms Excel Regression

$$\sigma = (4,97643E - 08 \pm 9,65996E - 11) \frac{W}{m^2K^4}$$

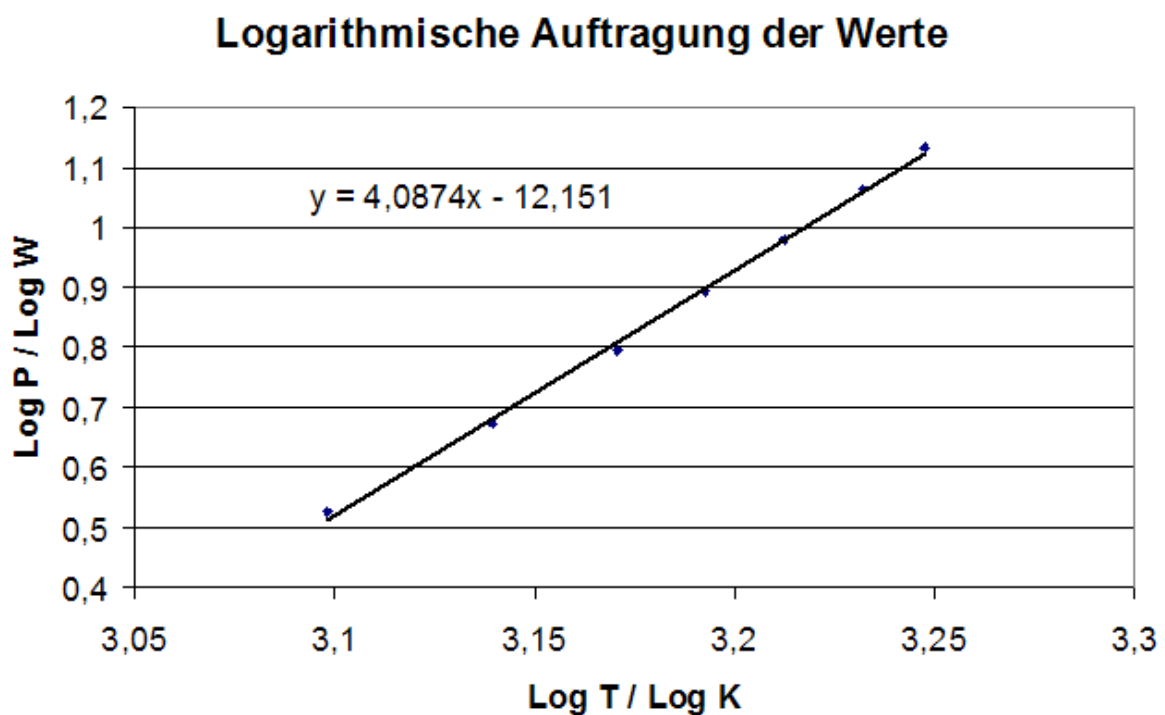
Dieser Wert weicht um ca. 12,3% vom Wert laut Wikipedia $\sigma = (5,67E - 08) \frac{W}{m^2K^4}$ ab. Dies liegt nicht im oben berechneten Fehlerintervall.

3.4 Aufgabe 4 - Messung mit einem Digitalpyrometer

Im letzten Versuchsteil benutzen wir ein Digital Pyrometer um die Temperatur einer Glühwendel einer Glühbirne zu bestimmen. Zusätzlich wurden Strom und Spannung abgelesen, um so die Leistung ermitteln zu können. Auch in diesem Versuchsteil sollte wieder die T^4 Abhängigkeit der Intensität aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz nachgewiesen werden. Da nicht nur die Intensität sondern auch direkt die Leistung sich proportional zu T^4 verhält ($P \sim T^4$) können wir einfach die folgenden Messwerte in ein Diagramm eintragen und beide Skalen logarithmieren. Die so entstehende Gerade sollte somit die Steigung 4 haben.

Spannung / V	Strom / A	Temp. / C
2	1,68	980
2,5	1,88	1106
3	2,08	1209
3,5	2,23	1285
4	2,39	1358
4,5	2,56	1433
5	2,71	1495

Hier die Messtabelle und nun die graphische Auswertung mit der Ausgleichsgeraden.



Rein qualitativ kann man die Übereinstimmung mit der T^4 Proportionalität erkennen. Auch der Vorfaktor zeigt die Proportionalität

4 Fehlerbetrachtung

Im Versuchsteil zur Bestimmung der Stefan-Boltzmann-Konstante fiel die starke Abweichung vom Literaturwert auf. Als mögliche Ursache ergibt sich eigentlich nur eine falsche Messung der Abstände der Blenden. Vermisst man sich hier nur um einen Zentimeter kommt man schon auf eine 20 % Abweichung vom Literaturwert.

Eine weitere Fehlerquelle bei diesem Versuch ist die abgegebene Wärmestrahlung durch die Experimentatoren. In diesem Zusammenhang können auch Luftbewegungen entstehen, die das Thermoelement beeinflussen. Auch das Thermoelement selbst ist nicht auf dessen Genauigkeit geprüft worden.

Quellen

- [1] W. Demtröder, Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik, Axel Springer Verlag, 2006

- [2] W. Walcher, Praktikum der Physik, Stuttgart, 1989

- [3] David R. Lide , CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84. Auflage, 2003

- [4] J. Krause, J. Grehn, Metzler Physik, Schroedel Verlag GmbH, Hannover 2004

- [5] Dominik Schmid-Lorch, Wärmestrahlung, 2005