



SS/~~WS~~0.12./.....

Praktikum: (~~X~~/P2)      (~~X~~o/Di/~~X~~/X)      Gruppe-Nr: ..11..

Name: ..... Fleig ..... Vorname: ..... Georg .....

Name: ..... Krause ..... Vorname: ..... Marcel .....

Versuch: .... Wärmestrahlung ..... (~~X~~t/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: .... Martin Strelzyk ..... Durchgeführt am: 05.06.12.

Abgabe am: .....

Rückgabe am: .....

Begründung:

2. Abgabe am: .....

Ergebnis:    (+ / 0 / -)

Fehlerrechnung:    ja / nein

Datum: .....

Handzeichen: .....

Bemerkungen:



Die Gesetzmäßigkeiten der Wärmestrahlung waren bei der Entwicklung der Quantenmechanik von ganz besonderer Bedeutung. Nur mit der Annahme quantenhafter Energieabsorption und -emission der atomaren Oszillatoren ließ sich die gemessene spektrale Verteilung der Strahlung des Schwarzen Körpers auch theoretisch begründen (Plancksches Strahlungsgesetz).

Die Strahlungsgesetze spielen auch für die Technik eine wichtige Rolle, z.B. bei Hitzeschilden für Weltraumfahrzeuge und für Hochtemperaturöfen, aber auch bei der Konstruktion von Lampen, bei der Auswahl von Anstrichen (z.B. von Heizkörpern) und bei der Konzeption von Sonnenkollektoren.

Mit Hilfe eines realen, nahezu schwarzen Körpers (Hohlraumstrahler) demonstrieren Sie bei diesem Versuch die Gültigkeit eines solchen Gesetzes und lernen dabei Geräte zur Messung von Temperatur und Strahlungsleistung kennen. Ein angenähert 'grauer Strahler' wird Ihnen bei einem Pyrometer-Versuch in Form einer Wolfram-Glühwendel vorgestellt.

**Hinweise:** 1) Die Netzgeräte in den Wärmeversuchen sind so leistungsfähig, das Sie durch Fehlbedienung die Apparatur zerstören können. Daher sind die Ströme sehr vorsichtig gegen die Grenzwerte zu regeln  
2) Thermoelemente dürfen nicht an eine Spannungsversorgung angeschlossen werden!

### **Aufgaben:**

#### **1. Weisen Sie die Gültigkeit des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes nach.**

Schließen Sie die weißen Anschlußbuchsen der Heizung des schwarzen Strahlers an das 65V-Netzgerät an. Drehen Sie die Leistung nicht auf Vollast, um einen zu raschen Temperaturanstieg zu vermeiden. Die Temperatur des Strahlers wird mit Hilfe eines eingebauten PtRh-Pt-Thermoelements (Anschlußbuchsen sw/rt) und eines Millivoltmeters gemessen. Zum Vergleich der Strahlungsleistungen bei verschiedenen Temperaturen dient eine Mollsche Thermo säule mit einem Millivoltmeter. Wegen des zur Steigerung der Empfindlichkeit eingebauten Reflektors ist die Eichung der Thermo säule (Strahlungsleistung pro Fläche, dividiert durch angezeigte Spannung) stark von der Geometrie der Anordnung abhängig. Sie müssen sich deshalb auf Relativmessungen beschränken, d.h. auf die Demonstration der  $T^4$ -Abhängigkeit. Es ist eine Auftragung vorzunehmen, die es gestattet, den Exponenten abzulesen. Überlegen Sie sich geeignete (sehr ungleiche) Temperaturschritte für die Messung. Schirmen Sie in den Meßpausen die Wärmestrahlung mit Hilfe einer Kippblende ab, um ein Aufheizen der ganzen Thermo säule und der Lochblende zu vermeiden. Berücksichtigen Sie die Umgebungstemperatur und die Strahlung, die die Thermo säule nicht vom schwarzen Strahler empfängt. Nehmen Sie Rücksicht auf die konstruktionsbedingte lange Einstellzeit der Thermo säule (einige Sekunden).

#### **2. Messen Sie die emittierte Strahlungsintensität verschiedener Flächen in Abhängigkeit von der Temperatur und ziehen Sie vergleichende Schlüsse auf die Emissionsvermögen. Achtung: $I_{\max}=3.5A!$**

Bei sonst gleicher Anordnung wie in Aufgabe 1 wird der schwarze Strahler durch jeweils einen Sektor einer heizbaren Scheibe mit verschiedenen Oberflächensektoren ersetzt. Die Scheibe wird elektrisch geheizt (Maximalstrom beachten!) und die Temperatur mit Hilfe eines an der Scheibe befestigten NiCr-Ni-Thermoelements mit einem Millivoltmeter gemessen. Die Auftragungen erfolgen wie bei Aufgabe 1.

#### **3. Bestimmen Sie die wahre Temperatur $T_w$ einer Glühlampe in Abhängigkeit vom Lampenstrom $I$ mit Hilfe eines Pyrometers. Achtung: $I_{\max}=4A!$**

Dazu wird pyrometrisch zunächst die schwarze Temperatur  $T_s$  in Abhängigkeit von  $I$  gemessen und dann eine Korrektur ( $T_w-T_s$ ) angebracht, die vom Strahler (Wolfram), von der Beobachtungswellenlänge (um 650nm) und von der Temperatur abhängig ist. Sowohl Eichkurve des Pyrometers,  $T_s(I)$ , als auch die Korrektur ( $T_w-T_s$ ) über  $T_s$  sind diesem Aufgabenblatt beigelegt. Die Pyrometerlampe (6V, 30W) wird über den danebenstehenden 'Vorwiderstand auf Platte mit Stift' an ein Netzgerät (Bereich 0-16V, 0-5A) angeschlossen und  $I$  mit Hilfe des Reglers (anfangs auf Null) eingestellt. Die zu messende Glühlampe (6V, 15W) wird über festeingebaute Vorwiderstände an das zweite Netzgerät angeschlossen. Beobachten Sie die hellsten Glühfadenstellen. Vergessen Sie nicht, zuvor den optischen Teil des Pyrometers zu justieren.

## Zubehör:

**Schwarzer Strahler** mit elektrischer Heizung (weiß/weiß) und mit PtRh-Pt-Thermoelement (schwarz/rot) ohne besondere Referenz-Kontaktstelle (wegen hoher Temperaturen entbehrlich; Zimmertemperatur annehmen!);

heizbare (max. 12V) **Sektorenscheibe** (Oberflächen: blankes Kupfer, im Sandstrahl aufgerauhtes Kupfer, Kerzenruß, Titanoxid-beschichtet) mit NiCr-Ni-Thermoelement;

**Thermosäule** nach Moll (Serienschaltung von Thermoelementen, jeder zweite Kontakt ist geschwärzt und wird von der Strahlung getroffen; die übrigen sind thermisch mit dem konischen Reflektor bzw. dem Gehäuse verbunden.);

**Kippblende**, Lochblende (12mm  $\varnothing$ );

**Pyrometer** (mit Abbildungslinse, Okularlinse, Rotfilter und Lampe mit Eichkurve), dazu Vorwiderstand auf Stift (1  $\Omega$ );

**Lampengehäuse** mit Lampe und Vorwiderständen (2,4  $\Omega$ );

**2 Millivoltmeter**;

**3 Netzgeräte** EA-PS3016-05B regelbar 0-16V/0-5A ;

**1 Netzgerät** EA-PS3065-05B regelbar 0-65V/0-5A;

Zeiss-Schienen mit Reitern.

## Literatur:

Bergmann, Schäfer: *Experimentalphysik*, Band 3

Gerthsen, Kneser, Vogel: *Physik*

Pohl: *Optik und Atomphysik*

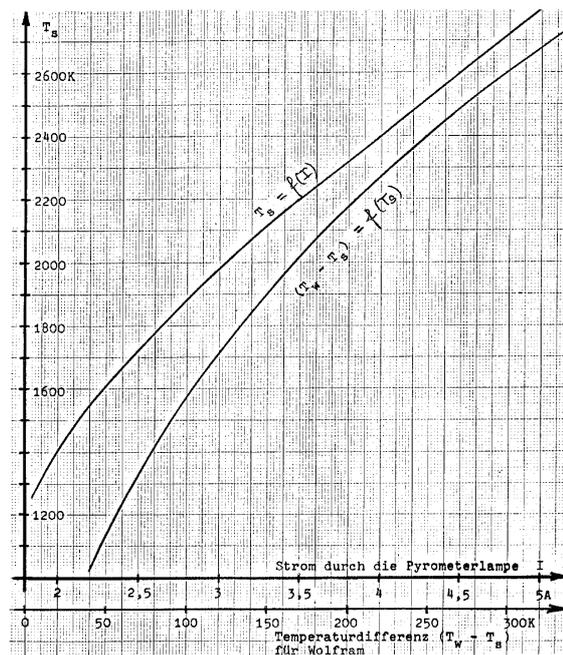
Walcher: *Praktikum der Physik*

Schpolski: *Atomphysik*, Band 1

Euler, Ludwig: *Arbeitsmethoden der optischen Pyrometrie*

Pepperhoff: *Temperaturstrahlung*

Beiser: *Atome, Moleküle, Festkörper*



Zu Versuch P2-43  
'Wärmestrahlung'

# **Physikalisches Anfängerpraktikum P2**

**Versuch:  
P2-43  
Wärmestrahlung**

Schriftliche Vorbereitung

von

Georg Fleig (georg@leech.it)  
Marcel Krause (mrrrc@leech.it)

Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:  
05.06.12

# Theoretische Grundlagen

Die heutigen Versuchsreihen behandeln ausgiebig das Thema der Wärmestrahlung, welches wir unter verschiedenen Gesichtspunkten näher betrachten werden. Es sollen dabei zunächst einige allgemeine theoretische Grundlagen geschaffen werden, die in den nachfolgenden Versuchsbeschreibungen vorausgesetzt werden.

## Arten der Wärmeübertragung

Man bezeichnet ganz allgemein den Transport thermischer Energie über die Grenze eines thermodynamischen Systems hinweg als Wärmeübertragung. Die übertragene Energie selbst ist dann die Wärme. Man beobachtet, dass in geschlossenen Systemen stets ein Wärmeausgleich angestrebt ist. Dabei gelangt Wärme ohne äußere Energiezufuhr stets von einem warmen zu einem kalten Wärmereservoir. Dieser experimentelle Befund findet sich in leicht abgewandelter Form im zweiten Hauptsatz der Thermodynamik wieder.

Die Wärmeübertragung selbst kann im Wesentlichen auf drei verschiedene Arten erfolgen, die nachfolgend kurz aufgeführt sind. Bei realen Prozessen findet man häufig mehrere dieser Übertragungsarten gleichzeitig vor.

### Wärmeleitung

Die Wärmeleitung, auch Wärmediffusion oder Konduktion genannt, findet sich vor allem in Festkörpern und ruhenden Flüssigkeiten, in denen Temperaturunterschiede herrschen. Die Richtung des Wärmeflusses ist durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik gegeben. Bei der Wärmeleitung findet die Wärmeübertragung über die kinetische Energie benachbarter Atome und Moleküle statt, die miteinander in Form von Stößen wechselwirken können.

Gitterschwingungen können ebenfalls zu einem Wärmeübertrag führen. In Metallen findet die Wärmeleitung hauptsächlich durch die Elektronen statt. Je leitfähiger ein Metall für elektrischen Strom ist, desto größer ist dabei auch seine thermische Leitfähigkeit. Dies wird durch das Wiedemann-Franz-Gesetz beschrieben.

### Konvektion

Die Konvektion, passenderweise auch Wärmeströmung genannt, stellt im Gegensatz zur Wärmeleitung eine Form der Wärmeübertragung dar, die auf strömenden Fluiden basiert. Die Energie in Form von Wärme wird dabei von einem zumeist festen Körper auf ein strömendes Fluid übertragen, welche diese als innere Energie transportieren kann. Umströmt dieses Fluid einen anderen Festkörper niedrigerer Entropie, so kann dieser durch den Konvektionsstrom aufgewärmt werden.

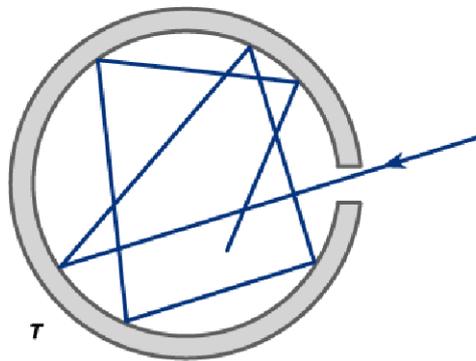
### Wärmestrahlung

Die letzte der drei möglichen Arten der Wärmeübertragung ist auch diejenige, die wir im Versuch näher betrachten werden: die Wärmestrahlung. Im Gegensatz zur Wärmeleitung und Konvektion findet Wärmestrahlung auch im Vakuum statt, da elektromagnetische Wellen als Träger der Wärmeenergie in Frage kommen. Jeder Festkörper sowie die meisten Flüssigkeiten emittieren, abhängig von ihrer Temperatur, ein kontinuierliches Spektrum elektromagnetischer Wellen. Gase hingegen weisen häufig diskrete Linienspektren auf, die Rückschlüsse auf deren Zusammensetzung erlauben.

Diese Beobachtungen lassen sich an einem Modell einer idealisierten Wärmestrahlungsquelle, dem schwarzen Körper, genauer erläutern. Einen solchen Körper, auf dessen Theorie nachfolgend eingegangen wird, verwenden wir auch in dieser Versuchsreihe.

## Schwarzer Körper

Als schwarzen Körper, auch schwarzer Strahler genannt, bezeichnet man einen idealisierten, in der Natur nur näherungsweise anzutreffenden Körper. Ein solcher ist zum einen in der Lage, die auf ihn einfallende elektromagnetische Strahlung vollständig zu absorbieren, zum anderen gilt er in Umgebung eines Wärmebads als ideale thermische Strahlungsquelle, deren kontinuierliches Spektrum einzig von der Temperatur  $T$  des Wärmebads abhängt. Modellhaft ist ein solcher schwarzer Körper nachfolgend skizziert.



In Kontakt mit dem Wärmebad wird der schwarze Körper auf einer konstanten Temperatur  $T$  gehalten. Die Atome des Körpers werden dabei stochastisch auf ein höheres Energieniveau gebracht. Beim Zurückfallen auf das niedrigere Niveau wird aufgrund der Energie-Impuls-Erhaltung ein Photon erzeugt, welches dann als elektromagnetische Welle in den Raum abstrahlt.

Diese Effekte sind nicht kontinuierlich für beliebige Energien durchführbar, denn der Effekt ist quantenmechanischer Natur. Das System aus Körper und Strahlungsfeld kann nur Energien umwandeln, die ein ganzzahliges Vielfaches des Energiequantums  $h\nu$  sind. Dabei bezeichnen  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum und  $\nu$  die Frequenz der elektromagnetischen Welle. Mathematisch ergibt sich das Verhältnis aus angeregten Atomen  $n^*$  und unangeregten Atomen  $n_0$  bei der Temperatur  $T$  durch die Boltzmann-Verteilung

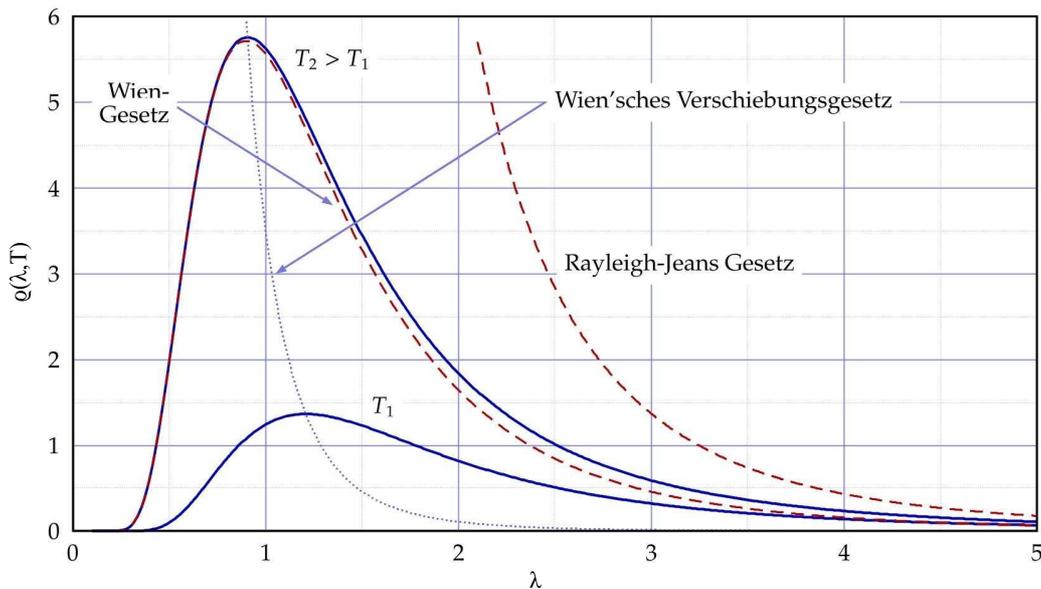
$$\frac{n^*}{n_0} = \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right)$$

wobei  $k_B$  die Boltzmann-Konstante ist. Betrachtet man die Anteile der Absorption, der spontanen Emission und der stimulierten Emission über die Einführung der Einstein-Koeffizienten  $A$  und  $B$ , wobei

$$\frac{A}{B} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

gilt, dann ergibt sich das Plancksche Strahlungsgesetz, wenn man die Energiedichte  $\rho(\nu, T)$  betrachtet, zu:

$$\rho(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} d\nu$$



Im obigen Schaubild ist neben dem Planckschen Strahlungsgesetz, welches schematisch für zwei verschiedene Temperaturen  $T_i$  auf die Wellenlänge  $\lambda$  umgewälzt und aufgetragen wurde, auch das Rayleigh-Jeans-Gesetz für  $h\nu \ll k_B T$

$$\rho(\nu, T) d\nu \approx \frac{8\pi k_B T}{c^3} \cdot \nu^2 d\nu$$

sowie das Wiensche Strahlungsgesetz für  $h\nu \gg k_B T$

$$\rho(\nu, T) d\nu \approx \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right) d\nu$$

dargestellt. Diese beiden Gesetzmäßigkeiten ergeben sich, wenn man das Plancksche Strahlungsgesetz in den oben notierten Bereichen nähert. Sucht man dort nach dem Maximum  $\nu_m$  hinsichtlich der Frequenz, so ergibt sich das Wiensche Verschiebungsgesetz

$$\nu_m = \frac{2,82 k_B}{h} \cdot T$$

welches eine Verschiebung des Maximums der spektralen Energiedichte bei steigender Temperatur hin zu großen Frequenzen, und somit zu niedrigen Wellenlängen, beschreibt.

## Emission und Absorption

Die Begriffe der Emission und Absorption spielen bei der Diskussion rund um elektromagnetische Strahlung sowie die zugehörigen thermodynamischen Prozesse eine wichtige Rolle, deshalb soll an dieser Stelle noch kurz darauf eingegangen werden. Ein jeder Körper besitzt hinsichtlich der Strahlung bestimmte Absorptions- sowie Emissionsvermögen, welche im Wesentlichen das Verhalten des Körpers in einem Strahlungsfeld beschreiben.

Das Absorptionsvermögen  $A$  eines Körpers ist gegeben durch

$$A = A(T) = \frac{P_{\text{abs}}}{P_{\text{schw}}}$$

wobei  $P_{\text{abs}}$  die vom Körper absorbierte Strahlungsleistung und  $P_{\text{schw}}$  wie gesamte einfallende Strahlungsleistung respektive die von einem schwarzen Körper absorbierte, gesamte Strahlungsleistung bezeichne.

Im idealisierten Fall eines schwarzen Strahlers ist  $P_{\text{abs}} = P_{\text{schw}}$ , wodurch sich  $A = 1$  ergibt. In der Realität findet man allerdings nur Fälle mit  $P_{\text{abs}} < P_{\text{schw}}$ , also  $A \in [0, 1)$  vor. Man spricht dann von grauen Körpern.

Analog kann man das Emissionsvermögen  $E$  eines Körpers über

$$E = E(T) = \frac{M_{\text{emit}}}{M_{\text{schw}}}$$

definieren, wenn  $M_{\text{emit}}$  die in den Halbraum gerichtete, spezifische Ausstrahlung des Körpers und  $M_{\text{schw}}$  die spezifische Ausstrahlung über alle Frequenzen eines schwarzen Körpers bezeichnet. Auch hier gilt nur für den Idealfall des schwarzen Körpers, dass  $E = 1$  annimmt, realiter allerdings findet man mit  $M_{\text{emit}} < M_{\text{schw}}$  ein Emissionsvermögen von  $E \in [0, 1)$  vor. Auch hier bezeichnet man den Körper dann als grau.

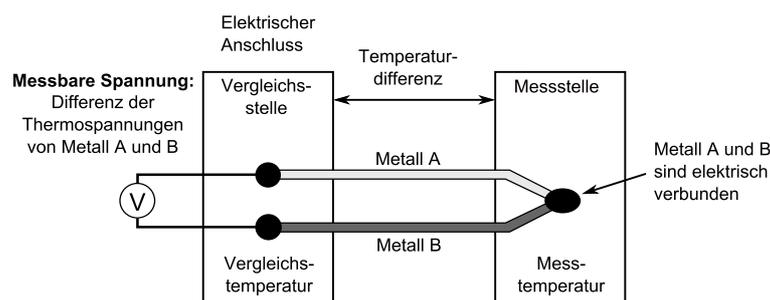
Zuletzt betrachten wir noch den Quotienten  $K$  zwischen Emissions- und Absorptionsvermögen:

$$K = K(T) = \frac{E(T)}{A(T)}$$

Während die Emission- sowie Absorptionsvermögen nicht nur temperatur- sondern auch materialabhängig sind, gilt dies für den Quotienten  $K(T)$  der beiden Größen nicht. Dieser ist nur abhängig von der Temperatur. Aufgrund dieser Eigenschaften sei auch erwähnt, dass der Begriff des schwarzen Körpers irreführend sein kann. Ein Körper ist erst dann ein schwarzer Körper, wenn er bei möglichst niedriger Temperatur nicht nur im sichtbaren Licht „schwarz“, also maximal absorbierend, erscheint, sondern auch in allen anderen möglichen Frequenzbereichen des elektromagnetischen Spektrums.

## Thermoelement

Ein Thermoelement ist ein Bauteil, welches in der Lage ist, Wärme durch Thermoelektrizität in elektrische Energie umzuwandeln. In der einfachsten Form besteht das Element aus zwei unterschiedlichen Metallen, welche an einem Ende miteinander verbunden und V-förmig angeordnet sind. Die nachfolgende Skizze soll das Prinzip nur schematisch veranschaulichen.



Erhitzt man ein Metall, so finden sich an der heißen Stelle Elektronen mit hoher kinetischer Energie wieder. In einem Werkstoff, dessen Enden sich in zwei Wärmebädern unterschiedlicher Temperatur befinden, bildet sich so nicht nur ein Temperaturgradient aus, sondern auch ein Ladungsträgergradient, denn die hohe kinetische Energie sorgt für eine Verringerung der Ladungsträgerdichte auf der heißen Seite des Metalls. Analoges gilt für die kalte Seite. Dort finden wir eine Verdichtung der Ladungsträger vor.

Durch das Zusammenführen von zwei Leitern an einem Ende kann man erreichen, dass sich je ein Ende

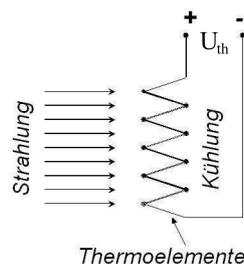
eines Leiters im selben Wärmereservoir wie das andere befindet. Dann kann man zwischen diesen Enden problemlos die Spannung abgreifen, denn die Messpunkte für die Spannung müssen in demselben Wärmereservoir liegen, sonst verfälscht eine zusätzliche Thermospannung die Messung. Das verbundene Ende befindet sich in einem Wärmebad abweichender Temperatur.

Da der sich ausbildende Ladungsträgergradient charakteristisch für das verwendete Metall ist, findet sich am freien Ende jedes einzelnen Materials bei einer gewissen Temperatur auch ein charakteristisches Potential vor. Daher können wir zwischen den beiden freien Enden des Metalls eine Spannung abgreifen, was auch als Seebeck-Effekt bezeichnet wird.

Mit Hilfe von Thermoelementen lassen sich Temperaturdifferenzen ganz einfach anhand der sich einstellenden Spannung zwischen den freien Metallenden messen. Mit einigen Modifikationen im Aufbau ist es außerdem möglich, mit ihnen die absolute Temperatur zu messen.

## Thermosäule

Eine Thermosäule ist ein thermoelektrisches Messgerät für elektromagnetische Strahlung, welches auf Umwandlung von Strahlungsenergie über Wärmeenergie in elektrische Energie basiert. Im Wesentlichen besteht eine Thermosäule aus einer Reihenschaltung vieler einzelner, als graue Körper dienender Thermoelemente, die die einfallende elektromagnetische Strahlung absorbieren. Der Aufbau ist nachfolgend skizziert.



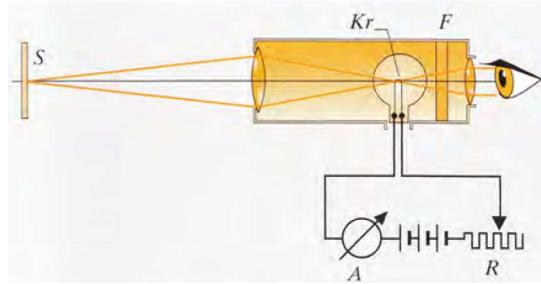
Durch geeignete Anbringung der Thermoelemente addieren sich so die kleinen Spannungen eines jeden Elements zu einer gut messbaren Spannung  $U_{th}$ , welche proportional zur Strahlungsleistung der absorbierten elektromagnetischen Strahlung ist.

## Pyrometer

Ein Pyrometer, auch Strahlungsthermometer genannt, ist ein Messgerät zur berührungslosen Temperaturmessung von Oberflächen. Die Messung basiert auf dem um das Emissionsvermögen  $E(T)$  eines grauen Körpers korrigierten Stefan-Boltzmann-Gesetzes

$$P = E(T)\sigma AT^4$$

wobei  $P$  die Strahlungsleistung,  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante,  $A$  die Fläche und  $T$  die Temperatur des emittierenden Körpers darstellen. Die Herleitung dieses Gesetzes erfolgt anschließend in Aufgabe 1. Nachfolgend ist der Aufbau eines optischen Pyrometers skizziert.



Das Pyrometer wird auf den zu untersuchenden Gegenstand gerichtet. Eine Linse sorgt dafür, dass das Bild des Gegenstands mit einer Glühwendel im Inneren des Pyrometers zusammenfällt. Eine zweite Linse am Ende des Messgeräts ermöglicht eine entspannte Beobachtung, ein Filter sorgt dafür, dass nur ein schmalbandiger Bereich der Strahlung durchgelassen wird. Häufig finden sich Rotfilter in den Pyrometern vor.

Möchte man nun die Temperatur eines Gegenstands bestimmen, so variiert man mit Hilfe eines Widerstands  $R$  den Strom  $I$  durch die Glühwendel genau so, dass die Glühwendel im Hintergrund des (glühenden) Gegenstands gerade verschwindet. Da die Glühwendel selbst als grauer Körper angenommen wird, kann man über die Farbe und benötigte Stromstärke so auf die Temperatur des beobachteten Gegenstands schließen.

Häufig betrachtet man pyrometrisch Gegenstände, deren Emissionsvermögen anfangs unbekannt sind. Man kann das Pyrometer dann eichen, indem man den Gegenstand auf eine bekannte Temperatur aufheizt und den Widerstand und damit die Stromstärke so regelt, dass die Glühwendel im Hintergrund des Gegenstands verschwindet.

## Aufgabe 1: Stefan-Boltzmann-Gesetz

Ziel der ersten Aufgabe ist es, die Gültigkeit des Stefan-Boltzmann-Gesetzes nachzuweisen. Dazu betrachten wir zunächst formal die Herleitung des Gesetzes aus dem in den theoretischen Grundlagen angesprochenen Planckschen Strahlungsgesetz. Wir berechnen die spezifische Ausstrahlung  $R$  des schwarzen Körpers über alle Frequenzen  $\nu \in [0, \infty]$  in einen Halbraum hinein, die andere Hälfte des Raumes sei durch den Körper selbst verdeckt. Diese ergibt sich dann zu:

$$R = \frac{c}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\Theta \cos \Theta \sin \Theta \int_0^{\infty} d\nu \rho(\nu, T) = \frac{c}{4} \int_0^{\infty} d\nu \rho(\nu, T)$$

Der Cosinus-Faktor berücksichtigt dabei die Tatsache, dass man die in beliebige Winkel  $\Theta$  sowie  $\varphi$  abgestrahlte Leistung auf die senkrecht zu diesen Richtungen stehenden Flächen projizierte Strahlungsleistung reduziert.

Substituiert man  $x := \frac{h\nu}{k_B T}$  und setzt das Plancksche Strahlungsgesetz ein, so erhält man:

$$R = \frac{2\pi k_B^4 T^4}{c^2 h^3} \int_0^{\infty} dx \frac{x^3}{e^x - 1} = \frac{2\pi^5}{15} \frac{k_B^4}{c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$

Im letzten Schritt wurde dabei die Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma \approx 5,67 \text{ W/K}^4\text{m}^2$  eingeführt. Betrachten wir nun die Abstrahlung einer Fläche  $A$  in den Halbraum, dann ergibt sich die Leistung  $P$  des Strahlers

durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz zu:

$$P = \sigma AT^4$$

In der realen Versuchsdurchführung ist natürlich darauf zu achten, dass der Körper nicht nur Strahlung emittiert, sondern auch die Strahlung der unmittelbaren Umgebung absorbiert. Wir betrachten daher die Leistungsdifferenz

$$\Delta P = \sigma A (T^4 - T_0^4)$$

wenn  $T_0$  die Umgebungstemperatur ist. Im Versuch verwenden wir eine Thermosäule nach Moll, um die Strahlungsleistung bei unterschiedlichen Temperaturen zu vergleichen. Die Messungen selbst sind sehr stark von der Geometrie der Anordnung abhängig, daher müssen wir uns im Versuch auf das bloße Aufzeigen der  $T^4$ -Proportionalität beschränken. Die Bestimmung absoluter Werte hingegen wird uns kaum möglich sein.

Wie in den theoretischen Grundlagen zur Thermosäule angesprochen, ist die Spannung  $U_{\text{th}}$  der Säule ein Maß für die eintreffende Strahlungsleistung. Wir erwarten also, dass sich eine Proportionalität der Form

$$U_{\text{th}} \propto T^4$$

ergeben wird. Dann wäre die Gültigkeit des Stefan-Boltzmann-Gesetzes hinreichend nachgewiesen. Der Proportionalitätsfaktor  $k$  ist aufgrund der starken Geometrie-Abhängigkeit der Anordnung nicht identisch mit den Vorfaktoren des Stefan-Boltzmann-Gesetzes. Logarithmieren der resultierenden Gleichung

$$U_{\text{th}} = kT^4$$

führt auf

$$\ln(U_{\text{th}}) = 4 \ln(\sqrt[4]{k}T)$$

Tragen wir im Versuch also  $\ln(U_{\text{th}})$  über  $\ln(T)$  auf und führen eine lineare Regression durch, so sollten wir eine Ausgleichsgeraden mit der Steigung von ungefähr 4 erhalten. Der Faktor  $\sqrt[4]{k}$  ist dabei unwesentlich, da er nur eine Stauchung der gesamten Funktion bewirkt. Die Steigung der Ausgleichsgeraden bleibt dabei invariant.

Durch die enorm hohe Abhängigkeit der Spannung zur Temperatur ist es zweckmäßig, während der Messung auf nichtlineare Temperaturdifferenzen  $\Delta T$  auszuweichen. Am geeignetsten erscheint dabei eine derartige Wahl von  $\Delta T$ , dass sich in der Spannung äquidistante Schritte vollziehen. Mit  $n \in \mathbb{N}$  und der im Experiment maximal ausgewählten Temperatur  $T_{\text{max}}$  teilen wir die Intervalle durch

$$T_{\text{max}}^4 = n \cdot \Delta T_n^4$$

auf. Formt man dies um, so ergibt sich

$$\Delta T_n = \frac{T_{\text{max}}}{\sqrt[4]{n}}$$

als Einteilung der Temperaturschritte. Dadurch können wir die Heizspannung  $U_{\text{heiz}}$  des schwarzen Körpers in äquidistanten Schritten erhöhen, was zu einem ebenfalls äquidistanten Anstieg der gemessenen Spannung  $U_{\text{th}}$  führen sollte.

Alternativ könnten wir auch einfach eine möglichst maximale Anzahl an Messwerten aufnehmen, ohne obigen Temperaturschritten streng zu folgen. Dadurch ließe sich der statistische Fehler möglichst gering

halten. Die am PtRh-Pt-Thermoelement abfallende Spannung  $U_{\text{heiz}}$  ließe sich dann mit Hilfe von Umrechnungstabellen in die entsprechende Temperatur des schwarzen Körpers umrechnen. Zur Auswertung würde dann wieder eine doppeltlogarithmische Auftragung der gemessenen Spannung  $U_{\text{th}}$  über der Temperatur  $T$  mit anschließender linearer Regression erfolgen.

Abschließend sei noch kurz angemerkt, dass wir im Versuch darauf achten sollten, während den Messpausen die vom schwarzen Körper ausgehende Strahlung mit Hilfe einer Kippblende abzuschirmen, um ein Aufheizen der Thermosäule sowie der Lochblende zu vermeiden. Des Weiteren sollte beachtet werden, dass die Thermosäule keine instantane Anpassung an die einfallende Strahlung bietet. Wir sollten daher stets einige Sekunden nach Beginn der Bestrahlung abwarten, bevor wir den Messwert aufnehmen.

## Aufgabe 2: Emissionsvermögen diverser Flächen

Im zweiten Versuchsteil wollen wir die emittierte Strahlungsintensität verschiedener Oberflächen betrachten. Dazu nutzen wir denselben Versuchsaufbau wie in Aufgabe 1, allerdings ersetzen wir den schwarzen Körper mit einer Scheibe, deren Sektoren jeweils unterschiedlichen Oberflächen entsprechen. Diese Sektorenscheibe wird dann von uns wieder elektrothermisch beheizt und jeweils so abgedeckt, dass nur ein einzelner Sektor zur selben Zeit auf die Thermosäule nach Moll abstrahlt.

Wenn wir annehmen, dass jeder Sektor der Sektorenscheibe dieselbe Fläche besitzt, so ergibt sich das Emissionsvermögen einer Fläche zu:

$$E(T) = \frac{M_{\text{sekt}}}{M_{\text{schw}}} = \frac{P_{\text{sekt}}}{P_{\text{schw}}}$$

Dabei bezeichnen  $P_{\text{sekt}}$  sowie  $P_{\text{schw}}$  die Strahlungsleistungen eines einzelnen Sektors respektive der gesamten, als schwarzer Körper angenommenen Sektorenscheibe. Im Versuch werden die jeweils die Spannungen am Sektor sowie an der Scheibe bestimmen, deshalb ist es zweckmäßiger, das Emissionsvermögen darüber zu vergleichen. Aufgrund der Linearität des Quotienten ergibt sich dieses dann zu

$$E(T) = \frac{U_{\text{th}}}{U_{\text{heiz}}}$$

mit  $U_{\text{th}} = U_{\text{sekt}}$  als der Spannung, die von der Thermosäule abgegriffen wird und  $U_{\text{heiz}} = U_{\text{schw}}$  der Heizspannung der Sektorenscheibe. Im Versuch empfiehlt es sich, die Sektoren möglichst nah an die Lochblende der Thermosäule heranzuführen, damit der Strahlungsfluss maximiert wird. Dadurch wird auch die Reaktionszeit der Thermosäule minimiert. Es ist von uns außerdem darauf zu achten, die maximale Stromstärke von  $I_{\text{max}} = 3,5 \text{ A}$  nicht zu überschreiten.

## Aufgabe 3: Wahre Temperatur einer Glühlampe

In der abschließenden Aufgabe wollen wir die wahre Temperatur einer aus Wolfram-Draht bestehenden Glühlampe mit Hilfe eines optischen Pyrometers bestimmen. Da der Wolfram-Draht keinen schwarzen Körper darstellt, müssen wir beachten, dass auch der Absorptionsgrad  $A$  geringer ist als der eines schwarzen Körpers.

Dadurch ergibt sich, dass die spezifische Ausstrahlung des Wolfram-Drahts geringer ist als die eines

schwarzen Körpers, wenn beide dieselbe Temperatur besitzen. Die wahre Temperatur  $T_w$  des Drahts ist somit also größer als die vom Pyrometer angezeigte Temperatur  $T_s$ , die man auch die schwarze Temperatur nennt. Im Allgemeinen ist diese abhängig von der Wellenlänge  $\lambda$  des Lichts. Ist dies nicht der Fall, dann spricht man von einem grauen Körper.

Für die von uns betrachteten Frequenzen ist die Wiensche Näherung  $h\nu \gg k_B T$  des Planckschen Strahlungsgesetzes hinreichend. Betrachten wir dann die Energiedichte  $\rho$  des Wolfram-Drahts mit dem Absorptionsvermögen  $A$ , so ergibt sich:

$$\rho(\nu, T_w) \approx A \cdot \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T_w}\right)$$

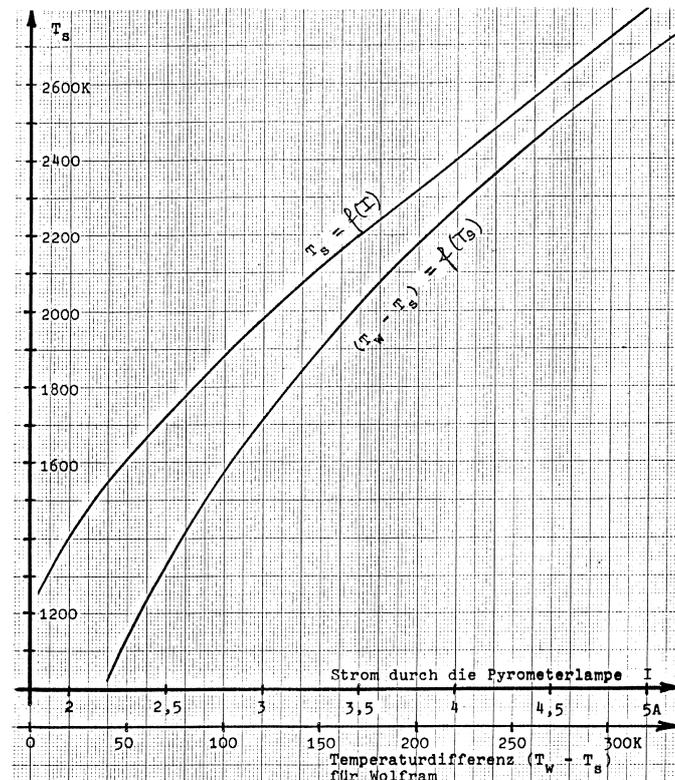
Diese Energiedichte muss aber gleich sein mit der des Pyrometers, welches wir als schwarzen Körper der Temperatur  $T_s$  annehmen. Also gilt:

$$A \cdot \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T_w}\right) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T_s}\right)$$

Logarithmiert man diese Gleichung und wälzt sie auf die Wellenlänge  $\lambda$  um, so erhält man:

$$\frac{1}{T_w} - \frac{1}{T_s} = \frac{k_B \lambda}{hc} \ln A$$

Die Wellenlänge des beobachteten Lichts wird in unserem Versuch durch den verwendeten Rotfilter zu  $\lambda = 650\text{nm}$  gegeben. Da der Versuchsbeschreibung die Eichkurve des verwendeten Pyrometers beigelegt ist, die im Nachfolgenden nochmal abgedruckt wurde, können wir diese auch für die Auswertung nutzen.



Im Versuch werden wir zunächst den optischen Teil des Pyrometers korrekt justieren. Die Glühwendel der zu untersuchenden Lampe werden wir dann mit einem Strom  $I_{lampe}$  bis zu einer maximalen Stromstärke

von  $I_{\max} = 4,0 \text{ A}$  aufheizen. Mit Hilfe des optischen Pyrometers bestimmen wir dann diejenige Stromstärke  $I_{\text{pyro}}$ , die nötig ist, um die Glühwendel des Pyrometers im Hintergrund der glühenden Lampe verschwinden zu lassen. Da sich die Glühfäden unterschiedlich stark aufheizen, betrachten wir jeweils nur die hellsten Stellen.

Mit der so benötigten Stromstärke  $I_{\text{pyro}}$  findet man mit Hilfe der Eichkurve  $T_s = f(I_{\text{pyro}})$  die zugehörige schwarze Temperatur  $T_s$  der Glühwendel des Pyrometers. Gleichzeitig können wir die zweite Eichkurve  $T_w - T_s = f(T_s)$  nutzen, um die Temperaturdifferenz  $\Delta T := T_w - T_s$  zwischen wahrer Temperatur und schwarzer Temperatur herauszufinden. Darüber ergibt sich die wahre Temperatur zu:

$$T_w = T_s + \Delta T$$

Wir werden im Versuch die wahre Temperatur über obige Schritte in Abhängigkeit des Lampenstroms  $I$  bestimmen. Es ist dabei ein linearer Zusammenhang zu erwarten.

## Quellenverzeichnis

Meschede, D.: Gerthsen Physik

Walcher, W.: Praktikum der Physik

Skizze des schwarzen Strahlers:

[http://www.sprott.net/science/physik/taschenbuch/daten/bild\\_9/24\\_0010.gif](http://www.sprott.net/science/physik/taschenbuch/daten/bild_9/24_0010.gif)

Skizze der Thermosäule:

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/4/4c/Thermopile.jpg>

Diagramm zum Planckschen Strahlungsgesetz:

[http://www.semibyte.de/dokuwiki/nat/graphiken/physik/plancksches\\_strahlungsgesetz\\_2](http://www.semibyte.de/dokuwiki/nat/graphiken/physik/plancksches_strahlungsgesetz_2)

Skizze des Pyrometers:

Meschede, D.: Gerthsen Physik

# **Physikalisches Anfängerpraktikum P2**

**Versuch:  
P2-43  
Wärmestrahlung**

Auswertung

von

Georg Fleig (georg@leech.it )  
Marcel Krause (mrrrc@leech.it )

Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:  
05.06.12

# Aufgabe 1: Stefan-Boltzmann-Gesetz

Der erste Aufgabenteil diene einzig dem Nachweis des Stefan-Boltzmann-Gesetzes

$$P = \sigma AT^4$$

wenn  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante,  $A$  die abstrahlende Fläche und  $T$  die Temperatur bezeichnen. Wie wir in der Vorbereitung ausführlich diskutiert haben, lassen sich in unserer Versuchsreihe aufgrund der schwierigen Eichung der Temperaturmessung und der hohen Geometrieabhängigkeit keine absoluten Temperaturwerte bestimmen. Wir beschränkten und daher auf den bloßen Nachweis der  $T^4$ -Abhängigkeit zwischen Temperatur und Strahlungsleistung.

Wir haben die Heizspannung  $U$  des schwarzen Körpers nach Absprache mit unserem Betreuer zunächst auf  $U = 20\text{ V}$  gestellt. Eine kippbare Platte trennte die Öffnung des schwarzen Körpers zunächst von der Thermosäule. Dies ist wichtig, denn eine permanente Aufheizung der Thermosäule durch die Wärmestrahlung des schwarzen Körpers würde unsere Messergebnisse verfälschen.

Im schwarzen Körper war ein Thermoelement befestigt, welches wir an ein Millivoltmeter angeschlossen haben. So konnten wir jederzeit die aktuelle Temperatur des Körpers über die Spannung  $U_{\text{heiz}}$  messen. Die Thermosäule wurde ebenfalls an ein Millivoltmeter angeschlossen, wo wir stets  $U_{\text{th}}$  abgreifen konnten.

Nach kurzer Aufwärmzeit des schwarzen Körpers haben wir begonnen, in einem Abstand von  $\Delta t = 4\text{ min}$  jeweils für kurze Zeit die Platte zu verkippen, damit der schwarze Körper auf die Thermosäule strahlen konnte. Wir haben dann jeweils ein Messwertepaar bestehend aus  $U_{\text{heiz}}$  und  $U_{\text{th}}$  aufgenommen und die Platte zurück gekippt.

In unregelmäßigen Abständen haben wir außerdem die Heizspannung  $U$  des schwarzen Körpers erhöht, um höhere Temperaturbereiche zu erschließen. Es ergaben sich so bei uns die nachfolgend abgedruckten Messwerte.

$U_{\text{heiz}}$ in mV	$T$ in K	$U_{\text{th}}$ in mV	$\ln(T)$	$\ln(U_{\text{th}})$
0,0740	286,15	0,0200	5,6565	-3,9120
0,1140	294,15	0,0260	5,6841	-3,6497
0,1500	299,15	0,0300	5,7009	-3,5066
0,1740	303,15	0,0350	5,7142	-3,3524
0,1885	306,15	0,0350	5,7241	-3,3524
0,2067	308,15	0,0310	5,7306	-3,4738
0,2240	311,15	0,0320	5,7403	-3,4420
0,2433	314,15	0,0370	5,7499	-3,2968
0,2583	317,15	0,0410	5,7594	-3,1942
0,3133	325,15	0,0560	5,7843	-2,8824
0,4450	345,15	0,0660	5,8440	-2,7181
0,4600	347,15	0,0820	5,8498	-2,5010
0,5700	363,15	0,1100	5,8948	-2,2073
0,6700	376,15	0,1330	5,9300	-2,0174
0,7900	392,15	0,1633	5,9716	-1,8120
0,8900	405,15	0,1800	6,0043	-1,7148
1,0000	419,15	0,2033	6,0382	-1,5929
1,0700	428,15	0,2000	6,0595	-1,6094
1,1800	442,15	0,2400	6,0916	-1,4271
1,2800	454,15	0,2667	6,1184	-1,3218
1,3800	461,15	0,2933	6,1337	-1,2264
1,4900	479,15	0,3267	6,1720	-1,1188
1,6000	493,15	0,3600	6,2008	-1,0217
1,7000	503,14	0,3833	6,2209	-0,9589
1,8333	518,15	0,4633	6,2503	-0,7693
2,2000	559,15	0,6600	6,3264	-0,4155
2,4333	585,15	0,7800	6,3719	-0,2485
2,6333	606,15	0,8900	6,4071	-0,1165
2,8333	625,15	0,9900	6,4380	-0,0101
3,0667	653,15	1,1200	6,4818	0,1133
3,2000	667,15	1,1900	6,5030	0,1740
3,3667	685,15	1,2900	6,5296	0,2546
3,5333	701,14	1,3800	6,5527	0,3221
3,6667	720,15	1,4800	6,5795	0,3920
3,9000	739,15	1,6800	6,6055	0,5188
4,1333	760,15	1,9333	6,6335	0,6592
4,2333	773,15	2,0333	6,6505	0,7097
4,3667	787,15	2,2000	6,6684	0,7885
4,5667	807,15	2,4000	6,6935	0,8755
4,7333	823,15	2,6000	6,7131	0,9555
4,8333	834,15	2,7000	6,7264	0,9933
4,9667	847,15	2,8333	6,7419	1,0415
5,1000	862,15	3,0000	6,7594	1,0986

Die aktuelle Temperatur  $T$  des schwarzen Körpers ergab sich aus der Spannung  $U_{\text{heiz}}$  des Thermoelements mit Hilfe einer Umrechnungstabelle, die am Versuchsplatz ausgelegt war. In obiger Tabelle finden sich rechts bereits die natürlich logarithmierten Werte der Temperatur und der Spannung des Thermoelements. Wir haben in der Vorbereitung diskutiert, dass

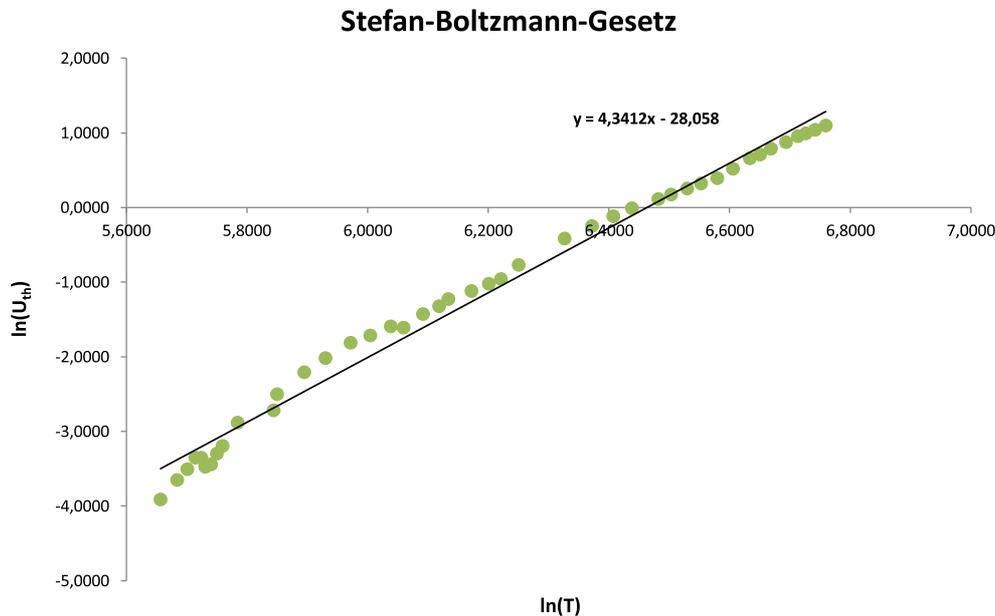
$$U_{\text{th}} \propto P \propto T^4$$

gilt, wenn  $P$  die Strahlungsleistung darstellt. Daher liefert uns nach Einführung der Proportionalitätskonstanten  $k$  die Logarithmierung gerade:

$$\ln(U_{\text{th}}) = 4 \ln(\sqrt[4]{kT})$$

Wir erwarten zwischen  $\ln(U_{th})$  und  $\ln(T)$  also einen linearen Zusammenhang mit der Steigung  $m_{theor} = 4$ . Der Faktor  $\sqrt[4]{k}$  ändert, wie zuvor besprochen, nichts an der Linearität dieses Zusammenhangs oder an deren Steigung.

Wir haben nun  $\ln(U_{th})$  über  $\ln(T)$  aufgetragen und eine lineare Regression durch alle Messwerte durchgeführt, wodurch sich das nachfolgende Schaubild ergab.



Wie man im Graph erkennen kann, erhielten wir als Steigung den Wert:

$$m_{exp} = 4,3412$$

Dieser liegt recht nahe an dem theoretischen Steigungswert. Wir haben auf diese Weise also das Stefan-Boltzmann-Gesetz qualitativ nachweisen können. Die Abweichung zwischen der experimentell bestimmten und der theoretischen Steigung beträgt 8,53%. Es soll noch kurz auf die möglichen Fehlerquellen des Versuchs eingegangen werden, die diese Abweichung begründen könnten.

Aufgrund der großen Anzahl der von uns aufgenommenen Messwerte liegt die Vermutung nahe, dass der statistische Fehler recht gering sein dürfte. Der Messvorgang selbst war allerdings relativ schwierig, denn es hätten von uns theoretisch zeitgleich die Spannungen  $U_{heiz}$  und  $U_{th}$  aufgenommen werden müssen, sobald wir die Platte verkippt hatten. Dies war praktisch aber kaum möglich. Die Thermosäule ist hinsichtlich der Spannungsanzeige relativ träge und der Spannungswert am Millivoltmeter hat sich erst nach kurzer Zeit so eingestellt, dass man einen Wert hat ablesen können. In dieser Zeit stieg aber natürlich auch die Temperatur des schwarzen Strahlers weiter an. So konnten wir nie garantieren, dass die beiden Spannungswerte auch zeitlich hundertprozentig zueinander korrelierten.

Eine weitere Fehlerquelle ergibt sich durch das Ablesen der Spannungen an den Millivoltmetern. Obwohl an diesen ein Spiegel zur möglichst parallaxenfreien Ablesung angebracht war, war die Skaleneinteilung nicht fein genug, um immer auf den tatsächlichen Spannungswert schließen zu können. Dieser systematische Fehler ließe sich durch die Benutzung anderer Millivoltmeter mit feineren Skaleneinteilungen verringern.

Zur Umwandlung der Spannungen in Temperaturen haben wir außerdem die am Versuchsplatz vorliegenden Umrechnungstabellen genutzt. Die dort angegebenen Temperaturwerte schienen recht grob zu sein, daher könnte es gut möglich sein, dass die Eichung des Thermoelements damit recht fehlerbelastet ist. Außerdem haben das verwendete Thermoelement und die Säule auch systematische Fehler, die unsere Ergebnisse weiter verfälschen.

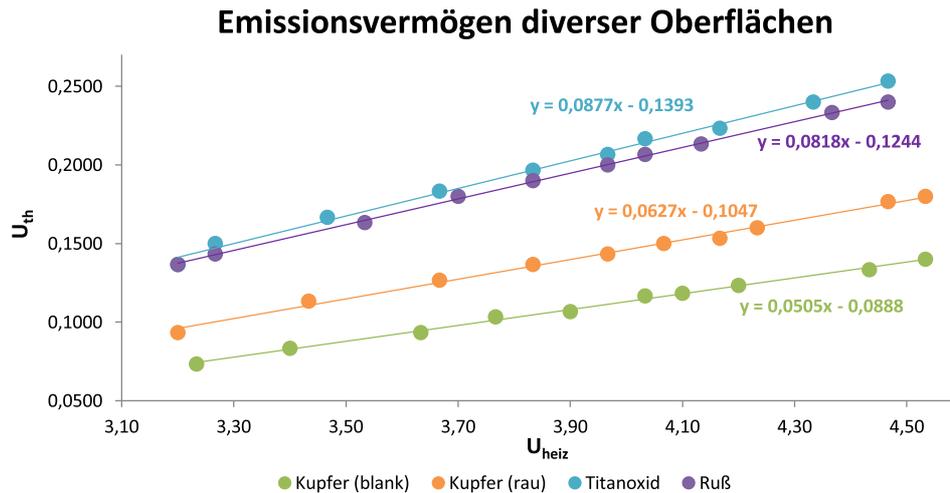
Alles in allem erkennen wir also, dass der Versuchsaufbau für quantitative Aussagen aufgrund der Vielzahl an systematischen Fehlern ungeeignet ist, wohl aber qualitativ die  $T^4$ -Abhängigkeit des Stefan-Boltzmann-Gesetzes deutlich aufzeigt und daher für diese Versuchsstellung mehr als hinreichend ist.

## Aufgabe 2: Emissionsvermögen diverser Flächen

Wir tauschten den schwarzen Körper aus Aufgabe 1 durch eine beheizbare Sektorscheibe aus Kupfer mit vier verschiedenen Oberflächen aus, um das Emissionsvermögen dieser Flächen zu bestimmen. Die Flächen waren unterteilt in blankes Kupfer, raues Kupfer, Ruß und eine Titanoxid Schicht. Da sich alle vier Sektoren auf derselben Scheibe befanden, war gewährleistet, dass auch alle dieselbe Temperatur hatten (abgesehen von einem möglichen, aber geringen, thermischen Gradienten im Material selbst). Nur so lassen sich Rückschlüsse auf das unterschiedliche Strahlungsvermögen ziehen. Mittels einer Moll'schen Thermosäule bestimmten wir wieder die Thermospannung, welche durch die absorbierte Strahlung erzeugt wurde. Auch an der Scheibe bestimmten wir mittels eines NiCr-Ni-Thermoelements die erzeugte Spannung. Als Referenztemperatur diente ein Gefäß mit Eiswasser. Wir wählten verschiedene Heizströme bis zu einer Stromstärke von  $I_{\max} = 3,5 \text{ A}$  und maßen bei den sich jeweils einstellenden Thermospannungen  $U_{\text{heiz}}$  in der Scheibe die zugehörige Spannung  $U_{\text{th}}$  an der Thermosäule. Dies geschah im Wechsel bei allen vier Oberflächen. In Absprache mit unserem Betreuer verzichteten wir auf eine genaue Temperaturmessung, da es nur im den qualitativen Vergleich der Emissionsvermögen ging. Die so aufgenommenen Messwerte sind nachfolgend aufgelistet.

Kupfer (blank)		Kupfer (rau)		Ruß		Titanoxid	
$U_{\text{heiz}}$ in mV	$U_{\text{th}}$ in mV						
3,23	0,0733	3,20	0,0933	3,20	0,1367	3,20	0,1367
3,40	0,0833	3,43	0,1133	3,27	0,1433	3,27	0,1500
3,63	0,0933	3,67	0,1267	3,53	0,1633	3,47	0,1667
3,77	0,1033	3,83	0,1367	3,70	0,1800	3,67	0,1833
3,90	0,1067	3,97	0,1433	3,83	0,1900	3,83	0,1967
4,03	0,1167	4,07	0,1500	3,97	0,2000	3,97	0,2067
4,10	0,1183	4,17	0,1533	4,03	0,2067	4,03	0,2167
4,20	0,1233	4,23	0,1600	4,13	0,2133	4,17	0,2233
4,43	0,1333	4,47	0,1767	4,37	0,2333	4,33	0,2400
4,53	0,1400	4,53	0,1800	4,47	0,2400	4,47	0,2533

Durch auftragen der Messwerte in einem gemeinsamen Diagramm, lassen sich sehr schön die unterschiedlichen Emissionsstärken der Oberflächen veranschaulichen.



Den linearen Zusammenhang zwischen den Thermospannungen konnten wir deutlich nachweisen. Eigentlich haben wir erwartet, dass die rußige Oberfläche das stärkste Emissionsvermögen aufweist, da sie am dunkelsten war. Wie man aus dem Alltag kennt, nehmen schwarze Oberflächen die Wärmestrahlung z.B. der Sonne am besten auf und emittieren daher auch besser. Da wir die Scheibe allerdings nur auf geringe Temperaturen aufgeheizt haben, überwiegte die Emission der Titanoxid-Oberfläche im infraroten Bereich. Das allerdings das blanke Kupfer ein schlechteres Emissionsvermögen besitzt, als das raue, war zu erwarten. Begründen lässt sich dies durch die höhere Reflexion der Oberfläche.

Zu den möglichen Fehlerquellen gehört hier zum einen die Sektorscheibe selbst, bei welcher sich nicht mit Sicherheit verhindern ließ, dass auch die Strahlung anderer Oberflächen zum Tragen kam. Außerdem sahen die Oberflächen selbst leicht verunreinigt aus. Zum anderen ist es möglich, dass sich die Moll'sche Thermosäule durch die ständige Bestrahlung mit der Zeit erwärmt, da wir keine Blende zum Abdecken, wie in Aufgabe 1, zur Verfügung hatten. Des Weiteren konnte durch die offene Wegstrecke zwischen Sektorscheibe und Thermosäule weitere Strahlung von außen eindringen und die Messung verfälschen.

## Aufgabe 3: Wahre Temperatur einer Glühlampe

In diesem letzten Versuchsteil sollten wir mit einem optischen Pyrometer die wahre Temperatur der Glühwendel einer Glühlampe bei verschiedenen Strömen  $I_{\text{lampe}}$  messen. Wir gingen dazu entsprechend wie in der Vorbereitung beschrieben vor. Leider waren die Glühwendel des Pyrometers und der Wolfram-Draht der Glühlampe nicht überlagert, sondern ein wenig gegeneinander versetzt. Dadurch war der Abgleich der Helligkeiten etwas erschwert und die Messung daher ungenauer. Die Wahrnehmung der Helligkeiten war außerdem eher subjektiv und wurde, je nach Betrachter, unterschiedlich wahrgenommen. Wir führten den Versuch bei mehreren verschiedenen Strömen  $I_{\text{lampe}}$  durch die Glühlampe aus und regelten den Strom  $I_{\text{pyro}}$  durch das Pyrometer entsprechend nach, sodass die Helligkeit beider Drähte in etwa übereinstimmte. Mit Hilfe der beiliegenden Eichkurve konnten wir zunächst auf die schwarze Temperatur  $T_S$  der Glühwendel des Pyrometers schließen. Die zweite Eichkurve lieferte uns schließlich die wahre Temperatur des Wolfram-Drahtes. Nachstehend sind die Messwerte mit den zugehörigen Temperaturen aufgelistet.

$I_{\text{lampe}}$ in A	$I_{\text{pyro}}$ in A	$T_s$ in K	$\Delta T$ in K	$T_w$ in K
2,37	2,58	1750	124	1874
3,13	3,29	2120	190	2310
2,45	2,73	1850	140	1990
2,81	3,02	1980	164	2144
2,22	2,44	1680	118	1798
3,31	3,58	2240	210	2450

Durch Auftragen der Wolfram-Draht-Temperatur  $T_w$  über den durch ihn fließenden Strom  $I_{\text{lampe}}$  lässt sich trotz der großen Messungenauigkeit der lineare Zusammenhang der beiden Größen gut erkennen.

