



SS/WS 20.10./.....

Praktikum: (P1)(P2)

(Mo/Di/Mi/Do)

Gruppe-Nr: 16...

Name: Fritz Vorname: Bejaulin

Name: Seeger Vorname: Jasur

Versuch: Wärmestrahlung (mit/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: Oksana Barchenko Durchgeführt am: 15.04.2010

Abgabe am: 22.04.10

Rückgabe am:

Begründung:

2. Abgabe am:

Ergebnis: (+ / 0 / -)

Fehlerrechnung: ja / nein

Datum: 22.04.10

Handzeichen: 

Bemerkungen:

Sehr ausführliche und gute Beschreibung des Versuchs + Schöne Auswertung

⇒ sehr schön ☺



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 Thermosäule mit einem Millivoltmeter. Wegen der zur Steigerung der Empfindlichkeit eingebauten Reflektors ist die Eichung der Thermosäule (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 Thermosäule und der Lochblende zu vermeiden. Berücksichtigen Sie die Umgebungstemperatur und die Strahlung, die die Thermosäule nicht vom schwarzen Strahler empfängt. Nehmen Sie Rücksicht auf die konstruktionsbedingte lange Einstellzeit der Thermosäule (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 (grüne Bananenstecker an Netzgerät anschließen: max.12V) 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 aufgerautes 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 Ø);

Pyrometer (mit Abbildungslinse, Okularlinse, Rotfilter und Lampe mit Eichkurve), dazu Vorwiderstand auf Stift (1 Ω);

Lampengehäuse mit Lampe und Vorwiderständen (2,4 Ω);

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*

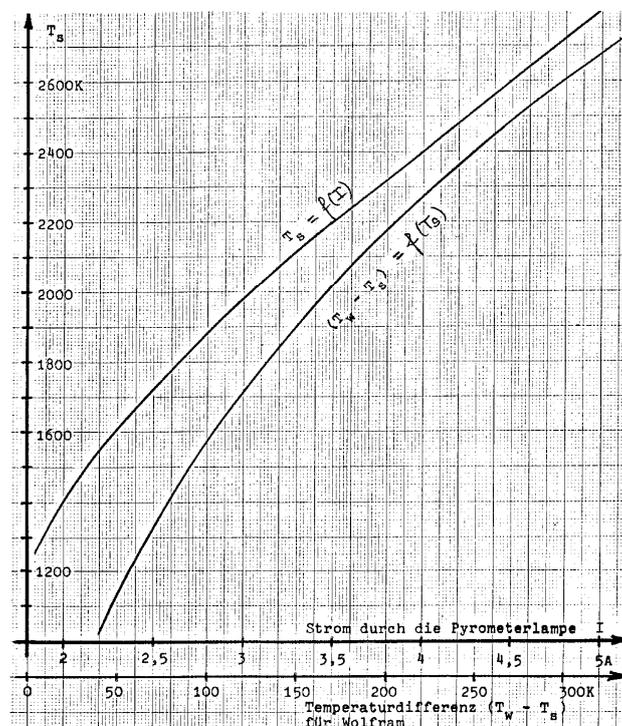
Walcher: *Praktikum der Physik*

Schpolski: *Atomphysik*, Band 1

Euler, Ludwig: *Arbeitsmethoden der optischen Pyrometrie*

Pepperhoff: *Temperaturstrahlung*

Beiser: *Atome, Moleküle, Festkörper*



Zu Versuch P2-43
'Wärmestrahlung'

Vorbereitung zum Versuch „Wärmestrahlung“

Benjamin Fritz, Jasmin Seeger

In diesem Versuch wird die Wärmestrahlung als eine von drei Arten der Übertragung von Wärmeenergie untersucht. Prinzipiell kann Wärmeenergie auf die folgenden Arten übertragen werden:

- 1) Wärmestrahlung
- 2) Konvektion
- 3) Wärmeleitung

Unter Wärmeleitung versteht man den Transport von Wärmeenergie durch Wechselwirkung von Atomen und Molekülen, wobei diese ihre Position dabei nahezu beibehalten. Als Konvektion bezeichnet man die Wärmeübertragung mittels Stofftransport, also beispielsweise die Zu- oder Abfuhr warmer Luft o.Ä.

Die Wärmestrahlung bezeichnet die Übertragung von Wärmeenergie in Form von elektromagnetischer Strahlung, also elektromagnetischen Wellen. Grundsätzlich emittieren und absorbieren alle Körper Strahlung. Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt emittiert Wärmestrahlung. Hat ein Körper beispielsweise eine höhere Temperatur als seine Umgebung, so gibt er mehr Wärmeenergie in Form von Strahlung ab, als er aus seiner Umgebung aufnimmt \Rightarrow Der Körper kühlt sich ab! Ist der Körper mit seiner Umgebung im thermischen Gleichgewicht, so emittiert er die gleiche Menge an Wärmestrahlung pro Zeit wie er auch absorbiert. Die Abstrahlung kann in verschiedenen Frequenzbereichen wie z.B. im infraroten oder im sichtbaren Bereich erfolgen.

Nun noch eine kurze Vorbemerkung zum Planckschen Strahlungsgesetz:

Die klassische Physik scheiterte daran, das Spektrum der schwarzen Strahlung zu erklären. Max Planck erkannte 1900, dass dieses Phänomen nur unter Annahme der Quantenhypothese, nach der ein strahlendes System mit einem Strahlungsfeld keine beliebigen Energieportionen, sondern nur ganzzahlige Vielfache von $h \cdot \nu$ (h = Plancksches Wirkungsquantum), austauschen kann, erklärbar ist. Basierend auf dieser Annahme fand er sein Strahlungsgesetz:

$$\rho(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \cdot \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu,$$

wobei $\rho(\nu, T)$ die Energiedichte im Frequenzintervall $[\nu, \nu + d\nu]$ bezeichnet, die im Strahlungsfeld eines schwarzen Körpers herrscht.

1. Stefan-Boltzmann Gesetz

In diesem Versuchsteil soll das Stefan-Boltzmann Gesetz experimentell verifiziert werden. Dazu verwenden wir einen schwarzen Strahler. Zur Erklärung des Begriffs „schwarzer Strahler“ müssen zuerst noch einige Dinge erläutert werden:

Wie oben schon erwähnt, strahlt eine Fläche nicht nur ab, sondern sie absorbiert auch einen Teil der auf sie auftreffenden Strahlung. Dieser Bruchteil wird **Absorptionsgrad** genannt. Es gilt also:

$$\epsilon = \frac{\text{Leistung der absorbierten Strahlung}}{\text{Leistung der auftreffenden Strahlung}}$$

Logischerweise ergibt sich der **Reflexionsgrad** dann zu: $\epsilon_{\text{Refl}} = 1 - \epsilon$

ϵ hängt nicht nur von der Beschaffenheit der Oberfläche ab, sondern auch von der Frequenz der Strahlung: $\epsilon = \epsilon(\nu)$

Eine Fläche nennt man „**schwarz für die Frequenz ν** “, wenn sie alle auftreffende Strahlung der Frequenz ν absorbiert: $\epsilon(\nu) = 1$

Wenn für alle Frequenzen $\epsilon(\nu) = 1$ gilt, nennt man die Fläche „**schwarz**“.

Eine schwarze Fläche absorbiert aber nicht nur am besten, sondern strahlt auch am meisten (Kirchhoffsches Strahlungsgesetz, siehe Aufgabe 2 und Vorbereitungsmappe).

Als **schwarzen Strahler** bezeichnet man einen idealisierten Körper, welcher die gesamte auf ihn treffende elektromagnetische Strahlung jeder Wellenlänge vollständig absorbiert (er ist also schwarz!). Außerdem emittiert er mehr Wärmestrahlung in jedem Spektralbereich als jeder andere Körper mit derselben Temperatur. Praktisch realisiert man einen schwarzen Strahler durch einen Hohlkörper (z.B. Hohlzylinder) aus feuerfestem Material mit einem kleinen Loch (Der Absorptionsgrad der inneren Fläche sollte auch möglichst groß sein!). Der Hohlkörper wird elektrisch geheizt und zur Wärmeisolation durch mehrere Luftmäntel isoliert. Betrachtet man nun die Strahlung die aus dem Loch des Hohlleiters austritt, so handelt es sich nahezu nur um die Strahlung eines schwarzen Körpers mit derselben Temperatur, da von der einfallenden Strahlung nur ein minimaler Teil (wegen hoher Anzahl an Reflexionen und daher Absorptionen) wieder durch das Loch nach außen gelangt. \Rightarrow Der Hohlkörper hat also nahezu einen Absorptionsgrad $\epsilon = 1$. Wegen dieser praktischen Realisierung eines schwarzen Strahlers nennt man die schwarze Strahlung auch **Hohlraumstrahlung!**

Nun aber zum Experiment:

Aus dem Planckschen Strahlungsgesetz lässt sich durch Integration das Stefan-Boltzmann Gesetz herleiten. Dieses lautet wie folgt:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 ,$$

mit der Stefan-Boltzmann Konstanten $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$.

Das Gesetz besagt also, dass die von einer Fläche abgestrahlte Leistung proportional zur Fläche und zur vierten Potenz der Temperatur ist. Wie oben schon erwähnt absorbiert aber ein Körper auch immer Strahlung aus der Umgebung. Da ein schwarzer Strahler die gesamte ankommende Strahlung

absorbiert, können wir diese durch $P = \sigma \cdot A \cdot T_0^4$ berechnen, wenn T_0 die Umgebungstemperatur bezeichnet. Die abgestrahlte Nettoleistung beträgt dann also: $P_{Netto} = \sigma A(T^4 - T_0^4)$

Dieser Zusammenhang soll nun im Experiment verifiziert werden.

Da wir die Strahlungsleistung auf die komplette Fläche nicht messen können, beschränken wir uns auf die Bestätigung von $P \sim T^4$.

Wir werden dazu einen schwarzen Strahler aufheizen, wobei seine Temperatur durch ein eingebautes Thermoelement und ein Millivoltmeter gemessen wird. Außerdem werden wir die Strahlungsleistung, die durch eine Lochblende auf eine Mollsche Thermosäule fällt, messen. Durch die durch die Lochblende einfallende Strahlung fällt eine Spannung U_{Th} an der Säule ab, welche proportional zur Strahlungsleistung pro Fläche und damit zur gesamten ausgesandten Strahlungsleistung ist. Diese Spannung wird ebenfalls per Millivoltmeter gemessen. Es gilt also:

$$U_{Th} \sim P \sim T^4 - T_0^4$$

Der konstante Faktor T_0 kann bei geeigneter Eichung weggelassen werden, wodurch sich ergibt:

$$U_{Th} \sim T^4$$

Diese Proportionalität muss also verifiziert werden, um die Proportionalität im Stefan-Boltzmann Gesetz zu zeigen! Wir wollen hier aber nicht, wie man vielleicht vermuten könnte, ein $U_{Th} - T^4$ -Diagramm erstellen und dieses auf Linearität überprüfen, sondern wir wollen eine geeignete Darstellung finden, aus der wir den Exponenten m der Beziehung $U_{Th} \sim T^m$ ablesen können. Dieser sollte dann logischerweise $m = 4$ sein. Dieser Weg stellt sich als geschickter heraus als die bloße Erstellung eines $U_{Th} - T^4$ -Diagramms, da bei steigender Temperatur T^4 extrem schnell wächst.

Wir haben uns für folgendes Verfahren entschlossen:

Um den Exponenten m der Proportionalität $U \sim T^m$ herauszubekommen, ist es am besten $\ln U$ über $\ln T$ aufzutragen.

Denn aus $U \sim T^m$ folgt: $\frac{U}{T^m} = c$ mit $c = const.$

$$\Rightarrow \frac{U}{c} = T^m$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{U}{c}\right) = \ln(T^m)$$

$$\Rightarrow \ln(U) - \ln(c) = m \cdot \ln(T)$$

Da nur die Steigung betrachtet werden muss, kann man den y-Achsenabschnitt vernachlässigen. Somit erhält man den Exponenten m als Steigung der $\ln(U) - \ln(T)$ Ausgleichsgeraden.

Durch das rasante Wachstum von T^4 sollten bei der Messung allerdings auch keine äquidistanten T -Schritte verwendet werden, sondern besser wäre es die Spannungsschritte äquidistant zu wählen. Wir wählen folgenden Ansatz, wobei T_{Max} die größte im Experiment gemessene Temperatur darstellt:

$$T_{Max}^4 = n \cdot \Delta T_n^4 \text{ mit } n \text{ aus den natürlichen Zahlen.}$$

$$\Rightarrow \Delta T_n = \frac{T_{Max}}{\sqrt[n]{n}}$$

Diese Wahl scheint für dieses Experiment besser geeignet zu sein!

2. Emissionsvermögen verschiedener Flächen

In diesem Versuchsteil werden wir mit einem analogen Aufbau zu Aufgabe 1 das Emissionsverhalten verschiedener Flächen untersuchen. Anstatt dem schwarzen Strahler wird nun ein Sektor einer heizbaren Scheibe mit verschiedenen Oberflächensektoren in die Versuchsanordnung eingebracht. Zur Messung der Temperatur der Scheibe wird wieder ein festes Thermoelement verwendet. Zur Messung der Strahlungsleistung wird wieder die Thermosäule benutzt. Es sollen zu Aufgabe 1 analoge Diagramme erstellt werden und es sollen Rückschlüsse auf das Emissionsverhalten der verschiedenen Flächen gezogen werden.

Nun noch eine Erklärung zum Kirchhoffschen Gesetz, welches für diesen Versuch ausschlaggebend ist: Man stelle sich folgendes vor: Zwei Ebene Platten mit verschiedenen Absorptionsgraden (ϵ_1, ϵ_2) befinden sich in einem ideal verspiegelten Raum, sodass keine Strahlung entweichen kann. Es herrscht im ganzen Raum dieselbe Temperatur T , also auch die Platten haben diese Temperatur. Von der Strahlung P_1 , die die Platte 1 aussendet, wird $\epsilon_2 P_1$ der Strahlung von der anderen Platte absorbiert. Von der Strahlung die Platte 2 emittiert, wird von Platte 1 genau $\epsilon_1 P_2$ absorbiert. Diese beiden Leistungen müssen selbstverständlich gleich sein, sonst würden die Temperaturen von selbst verschieden werden \Rightarrow Perpetuum mobile 2. Art und das kann natürlich nicht funktionieren!

Es muss also $\epsilon_1 P_2 = \epsilon_2 P_1$ gelten. Wir können nun alle Emissionen auf das Emissionsvermögen eines schwarzen Strahlers beziehen, indem wir mit P_S seine Strahlungsleistung, mit ϵ den Absorptionsgrad der strahlenden Fläche und mit P die abgestrahlte Leistung dieser Fläche bezeichnen und berücksichtigen, dass der schwarze Strahler einen Absorptionsgrad von 1 hat.

$$\Rightarrow P = \epsilon \cdot P_S$$

Man erkennt also, dass die abgestrahlte Leistung von einer Fläche proportional zu ihrem Absorptionsgrad ist. Wie oben schon erwähnt, strahlt ein schwarzer Strahler also am stärksten und je mehr eine Fläche absorbiert, desto stärker emittiert sie auch! In der hier hergeleiteten Formel kann man erkennen, dass man den ursprünglich als Absorptionsgrad ϵ eingeführten Koeffizienten auch als Emissionsvermögen ansehen kann. Das Emissionsvermögen ist nämlich proportional zum Absorptionsgrad und beide nehmen bei Bezug auf den schwarzen Strahler Werte zwischen 0 und 1 an!

Wollen wir nun das Emissionsvermögen der verschiedenen Flächen bei einer bestimmten Temperatur T messen, so können wir uns folgendes zu Nutze machen (T_0 bezeichnet wieder die Umgebungstemperatur!):

$$P_S = \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_0^4)$$

$$P_{Fläche} = \epsilon_{Fläche} \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_0^4)$$

Das Emissionsvermögen bestimmt sich also zu:

$$\epsilon_{\text{Fläche}} = \frac{P_{\text{Fläche}}}{P_S}$$

Nun werden wir im Experiment jedoch nicht die Leistungen direkt messen, sondern Spannungen an Thermosäule und Thermoelement, welche zur jeweiligen Leistung proportional sind.

Es gilt also:

$$U \sim P$$

und damit bestimmt sich der Emissionsgrad der Flächen zu:

$$\epsilon_{\text{Fläche}} = \frac{U_{\text{Fläche}}}{U_S}$$

Um den Strahlungsfluss zu maximieren, sollten strahlende Fläche und Lochblende sehr nah beieinander sein!

3. Wahre Temperatur einer Glühlampe in Abhängigkeit vom Lampenstrom

In diesem Versuchsteil soll mit Hilfe eines optischen Pyrometers die Temperatur einer Glühlampe in Abhängigkeit des Lampenstroms gemessen werden. Ein Pyrometer ist ein Messapparat, der die Strahlung eines Körpers misst, um Rückschlüsse auf seine Temperatur zu ziehen. In unserem Versuch wird ein optisches Pyrometer verwendet, dessen Funktionsweise wir hier zuerst einmal erklären wollen: Durch eine Linse am Eingang des Pyrometers wird das Bild eines strahlenden Körpers in dieselbe Ebene abgebildet, in der sich eine Glühwendel befindet. Diese ist an einen regelbaren Widerstand angeschlossen, sodass der Stromfluss variiert werden kann. Je nach Stromfluss strahlt diese Glühwendel dann mehr oder weniger stark. Der Gedanke ist nun die Glühwendel durch ein Okular am Ausgang (durch einen Rotfilter) zu betrachten. Da das Bild der strahlenden Fläche genau in der Ebene der Glühwendel liegt, kann man durch Variation des Stroms erreichen, dass die Glühwendel vor dem strahlenden Hintergrund gerade verschwindet. Der benötigte Strom ist charakteristisch für die Temperatur der strahlenden Fläche.

Zur Kalibrierung des Pyrometers wird ein schwarzer Strahler bei bekannter Temperatur verwendet. Das dadurch erhaltene $T - I$ - Diagramm steht uns bereits zur Verfügung.

Das Problem ist nun aber, dass kein Körper so stark wie ein schwarzer Körper bei gleicher Temperatur strahlt. Dadurch wird man bei der Messung der Temperatur einer nicht schwarzen Fläche immer einen zu kleinen Wert erhalten, die sog. Schwarze Temperatur, da ein schwarzer Strahler schon bei kleinerer Temperatur dieselbe Strahlungsleistung emittiert als jeder andere Körper. Deshalb steht uns noch eine zweite Eichkurve zur Verfügung, aus der wir die Differenzen zwischen wahrer Temperatur und schwarzer Temperatur ablesen können. Diese können dann zur Korrektur verwendet werden, indem man die abgelesene Differenz einfach zur gemessenen schwarzen Temperatur hinzuaddiert.

2) 4. Selbsten: Kupfer blank / Kupfer rau / Titanoxid / Russ

Anfangs: $1,25 \text{ mV}$
 $\approx 30^\circ\text{C}$

Start mit
Kupfer rau

$I = 2,53 \text{ A}$

$U_{\text{Schleife}} \text{ (mV)}$	$U_{\text{Mittel}} \text{ (mV)}$
1,45	0,0006
1,55	0,016
1,65	0,019
1,75	0,013

1,85	0,017
1,95	0,034
2,05	0,037
2,15	0,0245

$U_{\text{Mittel}} \text{ (mV)}$	$U_{\text{Schleife}} \text{ (mV)}$	$U_{\text{Mittel}} \text{ (mV)}$	
2,25	3,85	0,029	0,084
2,35	3,95	0,053	0,142
2,45	4,05	0,0555	0,143
2,55	4,15	0,037	0,092
2,65	4,25	0,041	0,093
2,75	4,35	0,072	0,162
2,85	4,45	0,075	0,173
2,95	4,55	0,048	0,11
3,05	4,65	0,054	0,11
3,15	4,75	0,095	0,185
3,25	4,85	0,097	0,19
3,35	4,95	0,062	0,16
3,45		0,068	
3,55		0,117	
3,65		0,12	
3,75		0,075	

$I = 3 \text{ A}$

$I = 3,42 \text{ A}$

[Handwritten signature]

Wärmestrahlung

Messprotokoll

Versuch 1

Start: 2 A

U_T [mV]	U_M [mV]	Nilpunkt = 0,005 mV / 0,004 mV
0,064	0,007	
0,09	0,0085	
0,1	0,0115	
0,11	0,0125	
0,12	0,011	
0,13	0,011	
0,15	0,012	
0,2	0,0185	Zeit 2,5 A
0,4	0,0325	3,0 A
0,6	0,047	
0,8	0,0675	
1,0	0,0785	
1,2	0,0855	
1,4	0,11	3,5 A
1,6	0,131	
2,0	0,177	
2,2	0,198	
2,4	0,225	
2,5	0,237	
2,7	0,263	
3,0	0,37	
3,5	0,385	
3,7	0,424	

3,9	0,46
4,0	0,48
4,2	0,5
4,35	0,56
4,5	0,585
4,7	0,632
4,8 5,0	0,7
5,2	0,76
5,4	0,812
<hr/>	
5,6	0,882
5,8	0,98
6,0	1,06
6,22	1,155
6,41	1,24
6,7	1,355
6,82	1,415

4A

[Handwritten signature]

3

I_{Lamp}	I_{Pyro}
2,32	2,19
2,55	2,3
2,7	2,4
3,03	2,59
3,31	2,78
3,5	3,00
3,7	

$I_{Lamp} [A]$	$I_{Pyro,1} [A]$	$I_{Pyro,2} [A]$
2,36	2,13	2,16
2,5	2,21	2,22
2,76	2,35	2,43
3,01	2,4	2,65
3,37	2,54	2,85
3,65	2,74	3,04
3,97	2,91	3,92

Physikalisches Anfängerpraktikum P2

„Wärmestrahlung“

Versuchsauswertung

Benjamin Fritz, Jasmin Seeger

Allgemein ist zu sagen, dass alle Begriffe und Formeln, die hier nicht mehr näher erläutert werden, bereits in der Vorbereitung ausführlich dargestellt wurden.

1. Nachweis des Stefan-Boltzmann Gesetzes

Das Stefan-Boltzmann Gesetz lautet wie folgt:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

Es besagt also, dass die von einer Fläche mit Inhalt A abgestrahlte Leistung P proportional zur Fläche und zur vierten Potenz der Temperatur ist. In diesem Versuch sollte die T^4 -Proportionalität mit Hilfe eines schwarzen Strahlers experimentell bestätigt werden.

Der Versuchsaufbau war folgender: Ein schwarzer Strahler war auf einer Schiene befestigt. Seine Strahlungsöffnung befand sich in Richtung der Schiene. Der schwarze Strahler war an eine Spannungsquelle angeschlossen, mit deren Hilfe man ihn durch Stromfluss erhitzen konnte. Außerdem war am Strahler ein PtRh-Pt Thermoelement montiert, mit dessen Hilfe man seine Temperatur messen konnte. Das Thermoelement selbst misst allerdings keine Temperatur, sondern man kann an ihr eine Spannung abgreifen, welche sich über eine Umrechnungstabelle in die jeweilige Temperatur umrechnen lässt. Des Weiteren befand sich noch eine Lochblende und dahinter eine Mollsche Thermosäule auf der Schiene. Die Lochblende verhinderte, dass zu viel Strahlung auf die Thermosäule fällt, um diese nicht zu stark zu erhitzen, sodass der Messfehler möglichst gering ausfällt. Außerdem wurde zwischen den Messungen auch noch zusätzlich eine reflektierende Platte zwischen Strahler und Lochblende eingebracht, sodass zwischen den Messungen möglichst keine schwarze Strahlung auf die Thermosäule fiel und diese dadurch ihre Anfangstemperatur näherungsweise beibehielt.

Die Mollsche Thermosäule misst aber auch nicht direkt die einfallende Strahlungsleistung, sondern an ihr lässt sich eine zur Leistung proportionale Spannung abgreifen, die wegen der Proportionalität als direktes Maß für die Leistung verwendet werden kann. Es galt also, wie in der Vorbereitung bereits erläutert, folgenden Zusammenhang zu bestätigen:

$$U_{Moll} \sim T^4$$

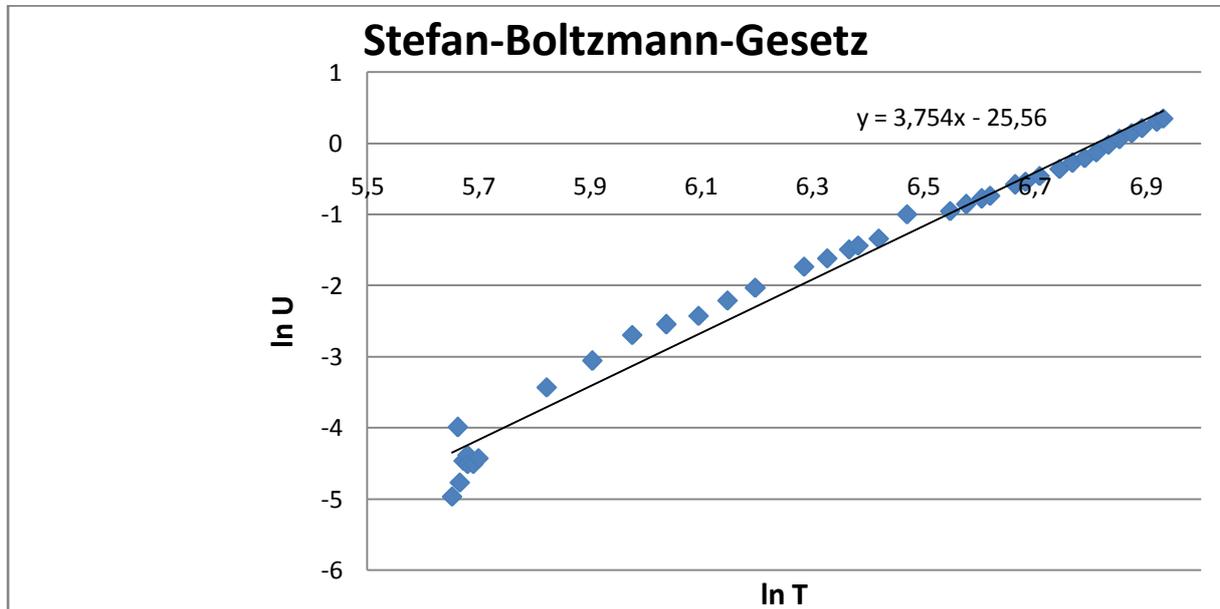
Wir gingen von einem Strahler bei Raumtemperatur aus, was allerdings nicht weiter schlimm ist, da wir ja nur obige Proportionalität nachweisen wollen.

Wir gingen nun folgendermaßen vor: Wir ließen einen Strom $I = 2A$ durch den Strahler fließen, sodass dieser sich erhitzte. Später erhöhten wir den Strom bis zu $I = 3,5A$, um eine schnellere Temperaturerhöhung zu erreichen, da wir sonst jedesmal mehrere Minuten warten mussten um ein Wertepaar aufzunehmen. Wir nahmen also bei verschiedenen Temperaturen (U_{Thermo}, U_{Moll})-Wertepaare auf und rechneten die U_{Thermo} in die jeweiligen Temperaturen um.

Im Folgenden sind unsere Messergebnisse aufgelistet:

U_{Thermo} [mV]	U_{Moll} [mV]	T [K]
0,064	0,007	285
0,09	0,0085	289
0,1	0,0115	291
0,11	0,0125	293
0,12	0,011	293
0,13	0,011	296
0,15	0,012	299
0,2	0,0185	288
0,4	0,0325	338
0,6	0,047	367
0,8	0,0675	394
1	0,0785	419
1,2	0,0885	444
1,4	0,11	468
1,6	0,131	492
2	0,177	537
2,2	0,198	560
2,4	0,225	582
2,5	0,237	592
2,7	0,263	614
3	0,37	646
3,5	0,385	698
3,7	0,424	719
3,9	0,46	739
4	0,48	750
4,35	0,56	785
4,5	0,585	800
4,7	0,632	820
5	0,7	850
5,2	0,76	870
5,4	0,812	889
5,6	0,882	908
5,8	0,98	928
6	1,06	947
6,22	1,155	968
6,41	1,24	986
6,7	1,355	1013
6,82	1,415	1024

Es bietet sich nun an, $\ln U_{Moll}$ über $\ln T$ aufzutragen, um dann aus der Steigung der Regressionsgeraden direkt den Exponenten m der $U_{Moll} - T^m$ -Proportionalität ablesen zu können (Herleitung siehe Vorbereitung!). Das Stefan-Boltzmann Gesetz sagt, wie oben schon erwähnt, ja einen Exponenten $m = 4$ voraus.



Wie man der Funktionsgleichung der Regressionsgeraden entnehmen kann, erhielten wir die von Excel ermittelte Steigung also zu $m = 3,754$. Dieser Wert weicht von der Theorie um 6,15% ab, was für unsere ungenauen Messmethoden ein recht annehmbarer Wert ist. Der von uns verwendete Strahler war natürlich nur näherungsweise schwarz und die Thermosäule erhitze sich trotz der reflektierenden Scheibe mit der Zeit, was ebenfalls zu einem Fehler führt. Außerdem war es schwierig U_{Moll} zu messen, da die Anzeigenadel des analogen Millivoltmeters nach Wegnahme der reflektierenden Scheibe kontinuierlich anstieg und dann irgendwann abbremste. Dadurch, dass die Thermosäule durch die Strahlung aufgewärmt wird, bleibt die Nadel aber nie stehen, sondern steigt weiter in der Anzeige nach oben. Deshalb war es schwer, den optimalen Zeitpunkt zu finden, an dem man die Spannung abzulesen hat. Alles in allem haben wir unserer Meinung nach trotzdem ein befriedigendes Ergebnis erhalten!

2. Emissionsvermögen verschiedener Flächen

Nun sollte das Emissionsverhalten verschiedener Materialien untersucht werden. Dazu wurde im Aufbau von Aufgabe 1 lediglich der schwarze Strahler durch eine Sektorenkreisscheibe mit vier Sektoren aus unterschiedlichen Materialien ersetzt. Die Sektorenscheibe war an eine Spannungsquelle angeschlossen, um die Scheibe zu erhitzen. Des Weiteren war sie an ein NiCr-Ni Thermoelement angeschlossen, wodurch wir wieder durch eine Spannungsmessung mit Hilfe einer Umrechnungstabelle auf die Temperatur schließen konnten. Die Referenztemperatur für unsere Messung lieferte uns eine mit Eiswasser gefüllte Thermosflasche (also recht genau $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) \Rightarrow Die hier durchgeführte Messung war also genauer als die in Aufgabe 1, da dort keine Referenztemperatur verwendet wurde. Da wir im ersten Aufgabenteil allerdings nur eine Proportionalität zeigen wollten, reichte dies auch völlig aus.

Die Messung wurde wie folgt durchgeführt: Wir starteten im Sektor „Kupfer rau“ (nur die Strahlung aus diesem Sektor konnte die Lochblende passieren) und stellten die Spannungsquelle an, sodass die Scheibe anfangen sich zu erwärmen. Wir nahmen einen Messwert (U_{Thermo} , U_{Moll}) und drehten dann die Scheibe um 90° , sodass wir uns im Sektor „Titanoxid“ befanden. Wieder wurde ein Messwert genommen und weiter zum Sektor „Ruß“ und danach zum Sektor „Kupfer blank“ gedreht. Dann starteten wir wieder mit „Kupfer rau“ usw... Dabei erwärmte sich die Scheibe natürlich kontinuierlich.

Um dann auf den Emissionsgrad der verschiedenen Oberflächen schließen zu können, machen wir uns die folgende Formel zu Nutze (Vorbereitung):

$$\epsilon_{Fläche} = \frac{U_{Moll}}{U_S}$$

Dabei bezeichnet U_{Moll} die Spannung an der Mollschen Thermosäule und U_S die Spannung, die man an der Mollschen Thermosäule messen würde, wenn die strahlende Fläche durch einen schwarzen Strahler gleicher Temperatur ersetzt werden würde. Das Problem ist nun, dass der in Aufgabe 1 verwendete schwarze Strahler viel weiter von der Lochblende entfernt stand, als die Sektorenscheibe in Aufgabe 2. Wir können die Emissionsgrade also nicht an den Werten des schwarzen Strahlers „eichen“. Stattdessen macht es Sinn, die Werte der berußten Oberfläche als Referenz zu verwenden. Wir werden damit natürlich keine genauen, absoluten Emissionsgrade bestimmen können, sondern nur relative Werte. Wir werden dazu also zu jeder Temperatur bei der gemessen wurde die Spannung an der Mollschen Thermosäule mit berußter Fläche als Strahler benötigen. Wir haben, wie oben beschrieben, die Scheibe aber nach jedem Messwert gedreht und haben damit nicht für jede Temperatur die Spannung an der Mollschen Thermosäule für das Ruß gemessen. Die benötigten Werte erhalten wir stattdessen durch Interpolation aus dem $U_{Moll} - T^4$ Schaubild für das Ruß, welches weiter unten im Protokoll folgt.

Nun nochmal zur Zusammenfassung: Wir werden das Emissionsvermögen von Ruß sozusagen gleich eins setzen. Dann werden wir für die restlichen drei Oberflächen jeweils ein $U_{Moll} - U_{Moll,Ruß}$ -Diagramm erstellen und aus der Steigung der Regressionsgeraden erhalten wir dann das Emissionsvermögen ϵ .

Wir erwarten für das Titanoxid dann allerdings einen Emissionsgrad > 1 , da wir der Literatur entnehmen können, dass Titanoxid noch ein bisschen stärker emittiert als Ruß.

In folgenden Tabellen sind unsere Messergebnisse für die verschiedenen Sektoren dargestellt:

Kupfer rau:

U _{Scheibe} [mV]	U _M [mV]	T _{Scheibe} [K]
1,45	0,0006	309
1,85	0,017	319
2,25	0,029	329
2,65	0,041	338
3,05	0,054	348
3,45	0,068	358
3,85	0,084	367
4,25	0,099	377
4,65	0,11	387

Titanoxid:

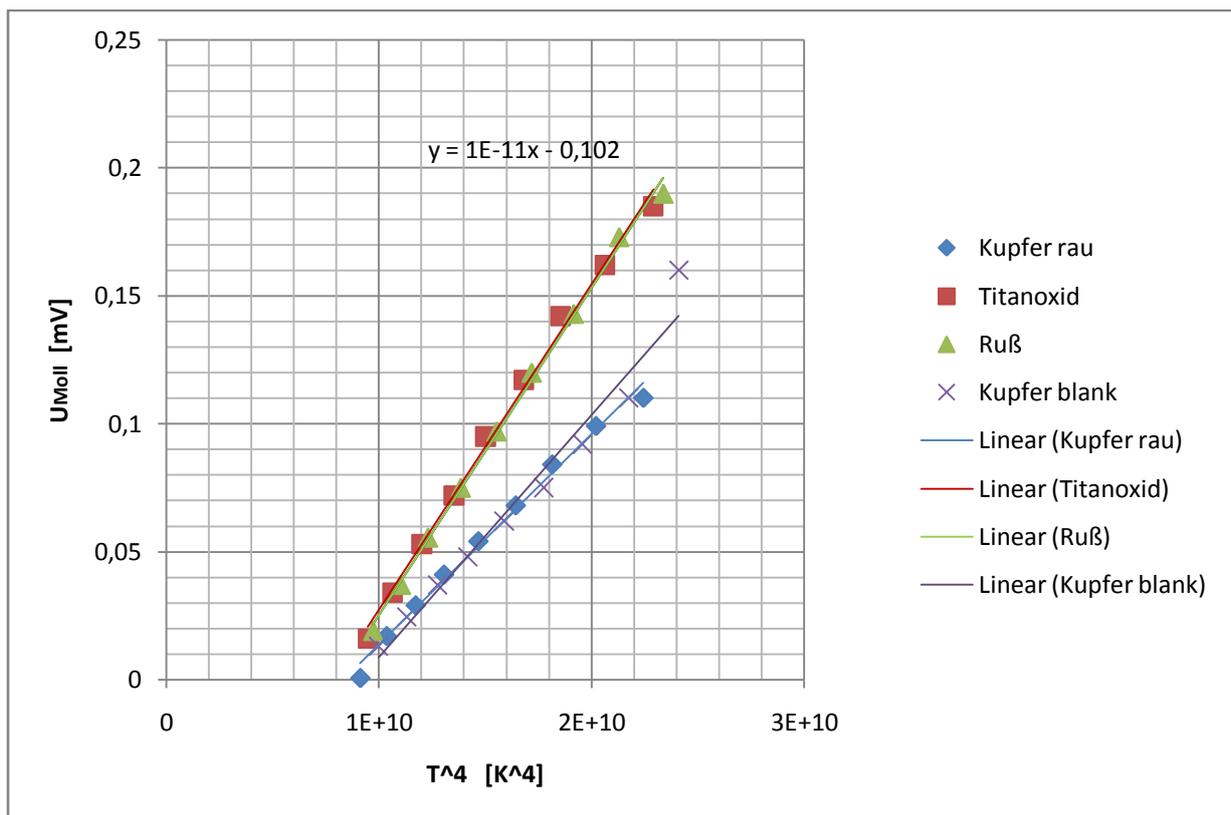
U _{Scheibe} [mV]	U _M [mV]	T _{Scheibe} [K]
1,55	0,016	312
1,95	0,034	321
2,35	0,053	331
2,75	0,072	341
3,15	0,095	350
3,55	0,117	360
3,95	0,142	369
4,35	0,162	379
4,75	0,185	389

Ruß:

Kupfer blank:

U _{Scheibe} [mV]	U _M [mV]	T _{Scheibe} [K]	U _{Scheibe} [mV]	U _M [mV]	T _{Scheibe} [K]
1,65	0,019	314	1,75	0,013	316
2,05	0,037	324	2,15	0,0245	326
2,45	0,0555	333	2,55	0,037	336
2,85	0,075	343	2,95	0,048	345
3,25	0,097	353	3,35	0,062	355
3,65	0,12	362	3,75	0,075	365
4,05	0,143	372	4,15	0,092	374
4,45	0,173	382	4,55	0,11	384
4,85	0,19	391	4,95	0,16	394

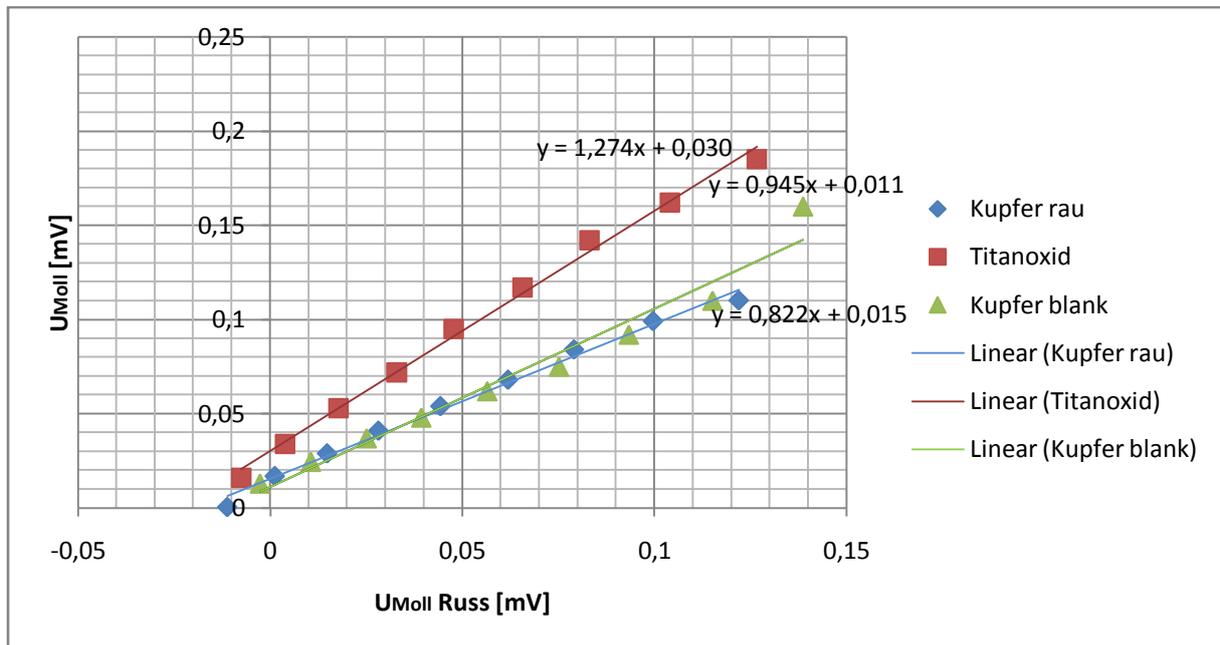
Nun können wir durch jeweils ein $U_{Moll} - T^4$ -Diagramm pro Sektor nochmals die vom Stefan-Boltzmann Gesetz vorhergesagte Proportionalität überprüfen (für einen nicht schwarzen Strahler muss ja nach Boltzmann und Kirchhoff gelten: $P = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$).



Die Linearität ist eindeutig zu erkennen!

Die Funktionsgleichung, die wir uns ausgeben ließen, ist natürlich die für das Ruß, da wir diese ja für die Interpolation auf die Temperatur-Zwischenwerte (s.o.) benötigen. Wir berechneten nun mit Hilfe dieser Gleichung die benötigten Werte für $U_{Moll,Ruß}$ und erstellten für die verbleibenden drei

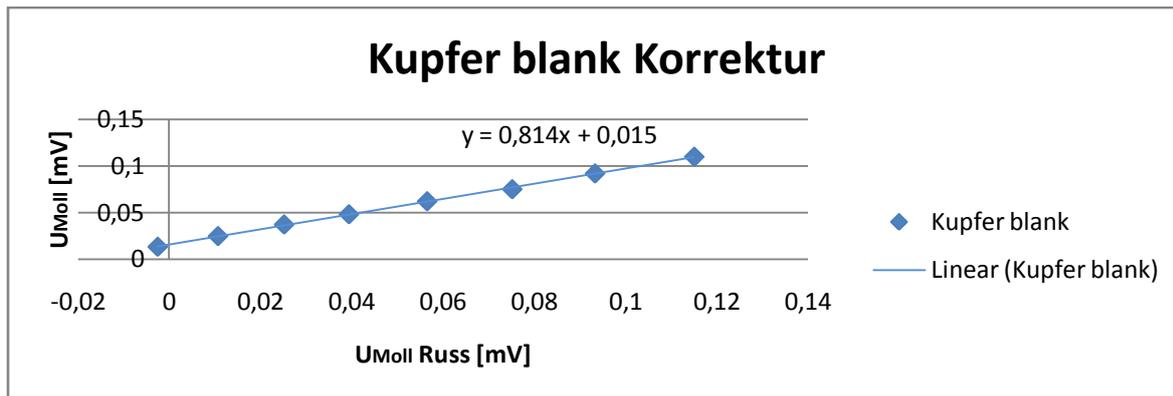
Sektoren wie oben beschrieben ein $U_{Moll} - U_{Moll,Ruß}$ -Schaubild, um aus der Steigung ϵ ablesen zu können:



Die y-Achsenabschnitte fallen, wie erwartet, klein aus, da die Theorie ja eine Ursprungsgerade fordert. Aus den Funktionsgleichungen der Regressionsgeraden lesen wir folgende Ergebnisse ab:

	Kupfer rau	Kupfer blank	Titanoxid	Ruß
Emissionsgrad	0,822	0,945	1,274	1

Es ist also zu erkennen, dass Titanoxid noch stärker emittiert als das Ruß (hätten wir die Emissionsgrade an einem schwarzen Strahler geeicht, wäre ein Wert >1 natürlich schwachsinnig gewesen). Ruß hat aufgrund unserer Vorgehensweise natürlich einen Emissionsgrad von eins. Allerdings hätten wir für blankes Kupfer einen kleineren Emissionsgrad erwartet als für das raue Kupfer, da ja blanke Flächen erfahrungsgemäß besser reflektieren, und daher schlechter absorbieren als raue. Da Absorptions- und Emissionsvermögen proportional zueinander sind, hätten wir also für blankes Kupfer ein kleineres ϵ erwartet als für raues. Betrachtet man jedoch unser obiges Diagramm, so erkennt man, dass bei der Messung mit blankem Kupfer der letzte Wert sehr aus dem linearen Zusammenhang ausreißt. Wir gehen daher davon aus, dass bei diesem Wert auf irgendeine Weise falsch gemessen wurde. Deshalb erstellten wir für blankes Kupfer nochmals ein $U_{Moll} - U_{Moll,Ruß}$ Diagramm, wobei der letzte Messwert weggelassen wurde. Wieder ließen wir uns die Funktionsgleichung der Regressionsgeraden ausgeben, um aus der Steigung das Emissionsvermögen ablesen zu können:



Durch diese Korrektur erhalten wir also einen Emissionsgrad $\epsilon = 0,814$ für das blanke Kupfer. Dies entspricht schon eher unseren Erwartungen, da dieser Wert nun kleiner ist als der des rauhen Kupfers. Da der letzte Messwert stark von der Linearität abwich, nehmen wir an, dass diese Korrektur gerechtfertigt war und das Ergebnis nun der Realität eher gleich kommt. Da der Emissionsgrad eigentlich an einem schwarzen Strahler geeicht wird, sind unsere Ergebnisse natürlich durchweg zu groß. Nur die relativen Lagen sind aussagekräftig.

Mit dem korrigierten Wert lauten unsere Ergebnisse also:

	Kupfer rau	Kupfer blank	Titanoxid	Ruß
Emissionsgrad	0,822	0,814	1,274	1

3. Wahre Temperatur einer Glühlampe in Abhängigkeit des Lampenstroms

In diesem Versuchsteil ging es darum, mit dem Pyrometer als Temperaturmessgerät vertraut zu werden. Dazu sollte die wahre Temperatur einer Glühbirne, oder genauer, der Wolframglühwendel im Inneren gemessen werden. Die Funktionsweise eines optischen Pyrometers wurde bereits in der Vorbereitung beschrieben. Jedoch bestand im Experiment ein Unterschied zur Beschreibung in der Vorbereitung: Anstatt das betrachtete Objekt in die Ebene einer Glühwendel im Inneren des Pyrometers abzubilden, war die betrachtete Glühwendel der Glühbirne nur als leuchtender Punkt durch den Rotfilter zu sehen und nicht als genaues Abbild.

Stellte man den Pyrometerstrom an und regelte diesen hoch, so war durch das Okular neben dem leuchtenden Punkt der betrachteten Glühwendel noch ein weiterer, kleinerer leuchtender Punkt zu sehen. Es galt nun, den kleineren leuchtenden Punkt durch Regeln am Pyrometerstrom auf exakt dieselbe Helligkeit zu bringen wie der leuchtende Punkt der betrachteten Glühwendel. Der dazu benötigte Pyrometerstrom ist charakteristisch für die Temperatur des betrachteten Objekts und kann mittels Eichkurve (siehe Aufgabenblatt) in diese umgerechnet werden. Dies sollte für verschiedene Glühbirnenströme durchgeführt werden.

Da diese Messung auch sehr vom Auge des Betrachters abhängig ist, machten wir für jeden Glühbirnenstrom zwei Messungen, eine pro Experimentator.

Anmerkung: Wir gehen davon aus, dass die Glühwendel im Pyrometer ebenfalls aus Wolfram besteht, da man sonst nicht durch den Helligkeitsvergleich der beiden Flecken auf ihre Temperatur

schließen kann, da anderes betrachtetes Material ja ein komplett anderes temperaturabhängiges Emissionsspektrum bzw. Emissionsverhalten haben kann (haben wird) und dadurch kein direkter Vergleich zulässig ist.

Die auf diese Weise erhaltene Temperatur ist jedoch noch nicht die wahre Temperatur der Glühbirne, sondern die schwarze (zu den Begriffen wahre und schwarze Temperatur siehe Vorbereitung!). Aus der gegebenen Eichkurve kann jedoch nicht nur die schwarze Temperatur T_S abgelesen werden, sondern auch für jeden Strom die Differenz zwischen wahrer und schwarzer Temperatur $T_W - T_S$. Durch Summenbildung erhält man dann die wahre Temperatur.

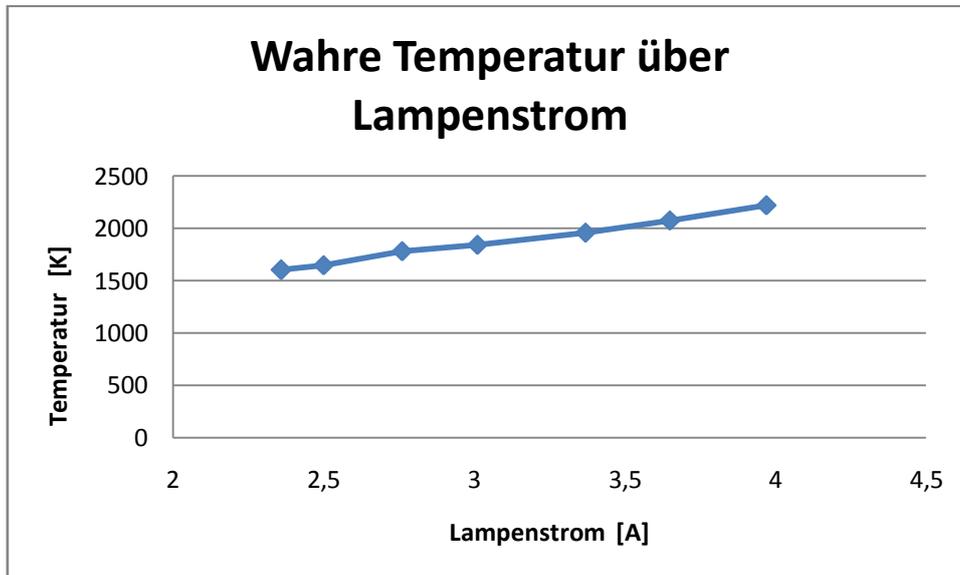
In folgenden Tabellen sind unsere Ergebnisse aufgelistet:

I_{Lampe} [A]	$I_{Pyro,1}$ [A]	$I_{Pyro,2}$ [A]	Durchschnittswert [A]
2,36	2,13	2,16	2,145
2,5	2,21	2,22	2,215
2,76	2,35	2,43	2,39
3,01	2,44	2,65	2,545
3,37	2,54	2,85	2,695
3,65	2,74	3,04	2,89
3,97	2,91	3,42	3,165

Aus der gegebenen Eichkurve lasen wir dann für unsere Durchschnittswerte T_S und $T_W - T_S$ ab und bildeten die Summe um die wahre Temperatur zu erhalten. Wir erhielten Folgendes, wobei das Ablesen mancher Werte ziemlich ungenau war:

I_{Lampe}	Durchschnitt	T_S	$T_W - T_S$	T_W
2,36	2,145	1510	92	1602
2,5	2,215	1550	97	1647
2,76	2,39	1670	112	1782
3,01	2,545	1720	122	1842
3,37	2,695	1820	138	1958
3,65	2,89	1920	155	2075
3,97	3,165	2050	172	2222

Diese Ergebnisse haben wir auch noch grafisch dargestellt:



Es ist also trotz aller Messungenauigkeiten ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Lampentemperatur und Temperatur des Wolframdrahts zu erkennen.