



SS/WS 20...~~10/11~~.....

Praktikum: (~~P1~~/P2) (~~Mo/Di/Mi~~/Do) Gruppe-Nr: ...¹⁵...

Name: von Borstel..... Vorname: Matthias.....

Name: Kern..... Vorname: Agils Luitger.....

Versuch: Wärmestrahlung..... (~~mit~~/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: Oksana Brovchenko..... Durchgeführt am: 19.05.....

Abgabe am: 26.05......

Rückgabe am:

Begründung:

2. Abgabe am:

Ergebnis: (+ / 0 / -)

Fehlerrechnung: ja / nein

Datum: 26.05.2011

Handzeichen: *[Signature]*

Bemerkungen:

Super Vorbereitung, gute Auswertung und sehr ausführliche Fehlerbetrachtung



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 Thermoäule mit einem Millivoltmeter. Wegen des zur Steigerung der Empfindlichkeit eingebauten Reflektors ist die Eichung der Thermoäule (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 Thermoäule und der Lochblende zu vermeiden. Berücksichtigen Sie die Umgebungstemperatur und die Strahlung, die die Thermoäule nicht vom schwarzen Strahler empfängt. Nehmen Sie Rücksicht auf die konstruktionsbedingte lange Einstellzeit der Thermoäule (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 (anfänglich 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*

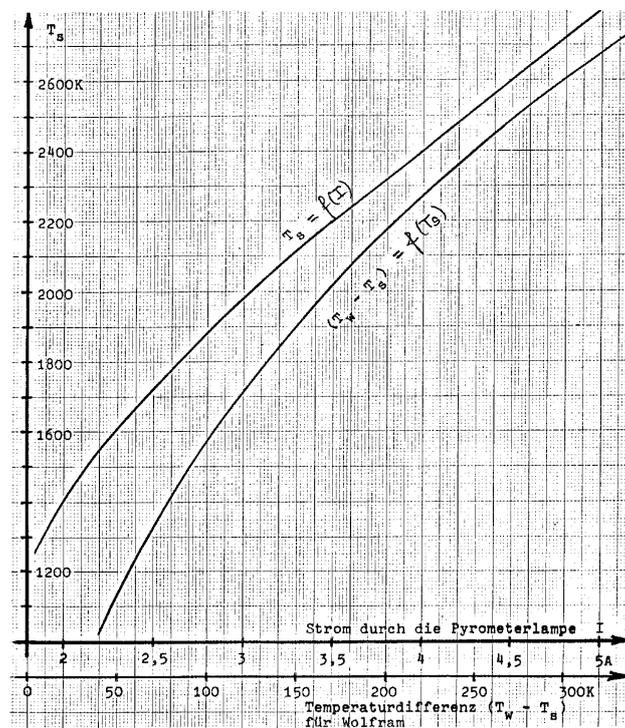
Walcher: *Praktikum der Physik*

Schpolski: *Atomphysik*, Band 1

Euler, Ludwig: *Arbeitsmethoden der optischen Pyrometrie*

Pepperhoff: *Temperaturstrahlung*

Beiser: *Atome, Moleküle, Festkörper*



Zu Versuch P2-43
'Wärmestrahlung'

Vorbereitungsprotokoll zum Versuch

P2-43: Wärmestrahlung

Matthias von Borstel – Agilo Luitger Kern
Gruppe Do – 15

19. Mai 2011

Inhaltsverzeichnis

V Theoretische Vorbemerkungen	2
V.1: Arten der Wärmeübertragung	2
V.2: Der schwarze Strahler	2
V.2.1: Theoretische Betrachtung	2
V.2.2: Experimenteller Aufbau	3
V.3: Absorption und Emission	4
V.4: Strahlungs-Thermometer	5
1 STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz	7
2 Emissionsvermögen	9
3 Temperatur einer Glühlampe	10



Max PLANCK im Jahr 1901 (Bild: Open Source)

Vorbereitungsprotokoll zum Versuch P2-43: Wärmestrahlung

Agilo Luitger Kern – Matthias von Borstel – Gruppe Do-15

Bevor wir auf die einzelnen Aufgabenteile eingehen, wollen wir einige Vorbemerkungen theoretischer Art machen, da sich diese zumeist auf das Gesamtgebiet beziehen und das allgemeine Verständnis der Versuche fördern.

V: Theoretische Vorbemerkungen

V.1: Arten der Wärmeübertragung

Man unterscheidet drei Arten der Wärmeübertragung:

- **Wärmestrahlung:** Die Wärmestrahlung ist die in diesem Versuch hauptsächlich untersuchte Art der Wärmeübertragung. Ein Körper mit einer bestimmten Temperatur T , die vom absoluten Temperaturnullpunkt verschieden ist, strahlt Wärmestrahlung in Form von elektromagnetischer Strahlung ab. Die Menge und die Frequenz der abgestrahlten Wärmestrahlung hängt von der Beschaffenheit des Körpers und von seiner Temperatur ab. Von uns wird im Folgenden hauptsächlich die Idealisierung eines *schwarzen Strahlers* betrachtet.
- **Wärmeleitung:** Dieser Prozess beschreibt die Übertragung der thermischen Energie über Stöße von Atomen und Molekülen. Hierbei bleiben diese aber – in Abgrenzung zur *Konvektion* zumindest näherungsweise an ihrem Platz bzw. es findet im Mittel über viele Teilchen keine Gesamtbewegung statt.
- **Konvektion:** Dieser Effekt tritt beispielsweise im Inneren der Erde auf: Heißes Gestein aus dem Inneren der Erde steigt in einem Konvektionsstrom an die Erdoberfläche und kühlt sich dort ab. Es fließt an der Erdoberfläche entlang und sinkt wieder ins Erdinnere. Ein ähnlicher Effekt lässt sich auch bei einer brennenden Kerze beobachten: Kleine feste Partikel in der geschmolzenen Kerzenwachs führen auch eine sogar recht schnelle Konvektionsbewegung durch. Die Wärmequelle, die in diesem Fall die Konvektion hervorruft, ist der brennende Docht in der Mitte.

V.2: Der schwarze Strahler

V.2.1: Theoretische Betrachtung

Der schwarze Strahler ist ein Körper, der sich im thermischen Gleichgewicht befindet, dessen Temperatur vom absoluten Temperatur-Nullpunkt verschieden ist und der das komplette auf ihn eingestrahlte Licht absorbiert. Der schwarze Strahler strahlt dann Wärmestrahlung mit einem bestimmten Spektrum, welches dem PLANCK'schen Strahlungsgesetz folgt, ab.

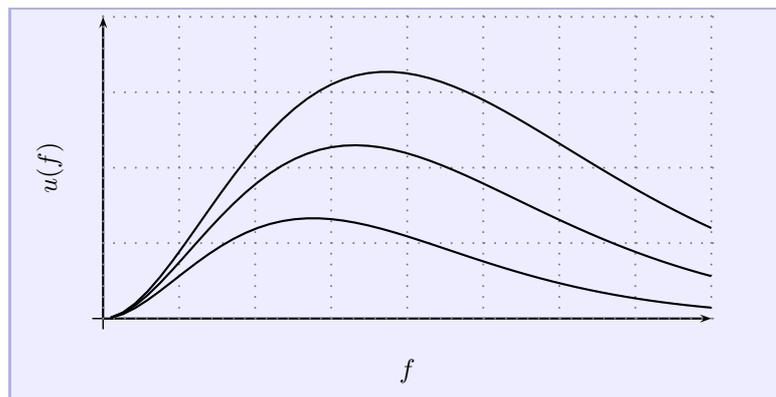
Der Grund für die Abstrahlung ist im Folgenden sehr grob erklärt: Durch die thermische Energie werden Atome teilweise in einen angeregten Zustand gebracht, wobei die Elektronen einen höheren Bahndrehimpuls besitzen. Die Anzahl dieser angeregten Elektronen ist gegeben durch eine thermodynamische BOLTZMANN-Verteilung:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(\frac{E_1 - E_2}{k_B T}\right)$$

Diese Elektronen fallen durch spontane sowie durch stimulierte Emission eines Photons wieder zurück auf ein niedrigeres Energieniveau. Das Photon hat eine bestimmte Wellenlänge, da nach den Gesetzen der Quantenmechanik nur diskrete Energieniveaus für die Elektronen zulässig sind. Gleichzeitig erhöht sich aber wieder die Anzahl der Elektronen im angeregten Zustand durch Absorption von Strahlung. Hierbei wird das *Absorptionsvermögen*, auf das später eingegangen werden wird, zu $A = 1$ angenommen. Einige weitere Überlegungen zum Gleichgewicht dieses Prozesses und Postulate aufgrund experimenteller Befunde führen darauf, dass die Energiedichte $u(f, T)$ folgende Form hat:

$$u(f, T) \sim \frac{f^3}{\exp\left(\frac{hf}{k_B T}\right) - 1}$$

Die (natürlich sehr unvollständige) Darstellung oben folgte allerdings nicht den Überlegungen von M. PLANCK, sondern den etwas einfacher nachzuvollziehenden von A. EINSTEIN. Stellen wir das ganze grafisch dar, erhalten wir den folgenden Verlauf:



Hierbei hat die oberste Kurve die höchste Temperatur und die unterste die niedrigste. Wie man sieht, verschiebt sich das Maximum nach rechts zu höheren Frequenzen.

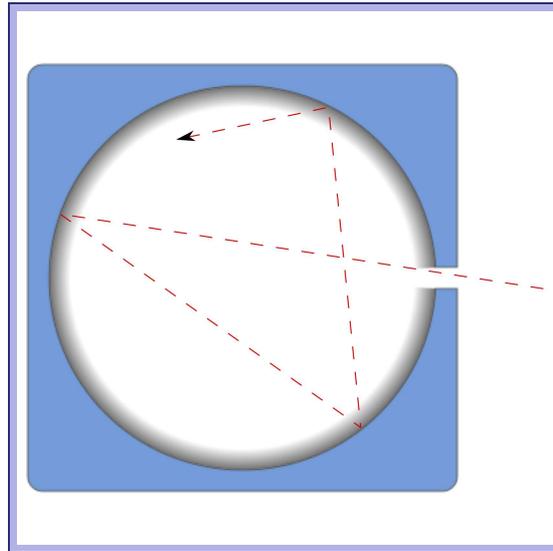
Analog zum schwarzen Körper definiert man einen *grauen Körper*, der als unvollkommener schwarzer Körper anzusehen ist. Der graue Körper absorbiert nicht das ganze auf ihn eingestrahlte Licht. Die Objekte aus der alltäglichen Erfahrungswelt sind daher als graue Körper zu betrachten.

V.2.2: Experimenteller Aufbau

Es zeigt sich allerdings, dass es in der Natur fast keine Objekte gibt, die in guter Näherung als schwarzer Strahler zu betrachten sind. Dieser müsste ja im gesamten Frequenzspektrum die komplette eingestrahlte Strahlungsleistung absorbieren.

Experimentell erzeugt man daher einen schwarzen Strahler zumeist auf diese Weise: Man baut einen von einem Wärmebad umschlossenen Hohlraum, der an einer Seite ein kleines Loch besitzt. Wird in dieses Loch Licht eingestrahlt, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein eingestrahlttes Photon den Hohlraum wieder verlässt, denkbar gering. Gleichzeitig befindet sich die Wärmestrahlung im Inneren des Hohlraums nach einiger Zeit im thermischen Gleichgewicht mit dem Wärmebad. Damit ist ein schwarzer Strahler in guter Näherung realisiert. Aus diesem Grund wird die Wärmestrahlung eines schwarzen Strahlers auch als *Hohlraumstrahlung* bezeichnet.

Der Aufbau des schwarzen Strahlers ist in der folgenden Grafik verdeutlicht:



Ein schwarzer Strahler (Bild: eigene Zeichnung)

V.3: Absorption und Emission

Hier wollen wir noch einmal näher auf die quantitative Beschreibung von Absorption und Emission eingehen, da diese Begriffe zuvor schon angeklungen sind.

Das *Absorptionsvermögen* A wird wie folgt definiert:

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

Hierbei steht P_{abs} für die vom Körper absorbierte Strahlungsleistung und P_{ein} entsprechend für die einstrahlte Strahlungsleistung. Im Falle eines schwarzen Strahlers wird die Strahlung vollständig absorbiert, es gilt also $P_{\text{ein}} = P_{\text{abs}}$. Damit ist $A = 1$, wie bereits erwähnt.

Entsprechend zum Absorptionsvermögen definiert man auch das *Emissionsvermögen* E eines Körpers. Für das Emissionsvermögen gilt folgender Zusammenhang:

$$E = \frac{M(T)}{M^0(T)}$$

Dabei steht $M(T)$ für die *spezifische Ausstrahlung*, die die über alle Frequenzen integrierte Strahlungsleistung pro Einheitsfläche bezeichnet. Analog steht $M^0(T)$ für die spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers. Es ist offensichtlich, dass dann für einen schwarzen Körper $E = 1$ gilt. Entsprechend hat ein grauer Körper ein Emissionsvermögen, für das $0 < E(T) < 1$ gilt.

Interessanterweise gibt es einen sehr einfachen Zusammenhang zwischen dem Absorptions- und dem Emissionsvermögen eines Körpers: Die Konstante $K(T)$ ist gegeben durch den Quotient aus Emission und Absorption:

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

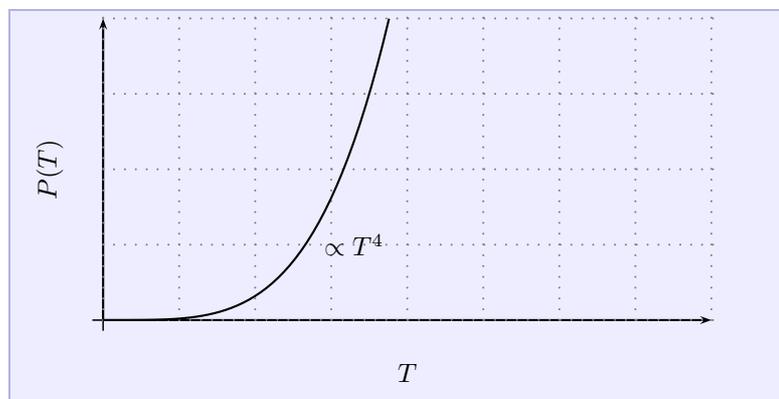
Die „Konstante“ $K(T)$ hängt zwar von der Temperatur des Körpers ab, ist jedoch bei konstanter Temperatur unabhängig von den Materialeigenschaften des Stoffes.

Diese Betrachtungen führen uns zur Auflösung eines Missverständnisses, das recht weit verbreitet ist: Der „schwarze“ Körper ist nicht zwangsläufig schwarz – vielmehr kann ein schwarzer Körper sehr viele verschiedene Farben besitzen. Mit dem Wort „schwarz“ ist nur gemeint, dass der Körper die gesamte auf ihn eingestrahlte Strahlung absorbiert. So können beispielsweise Sterne in recht guter Näherung als schwarze Strahler angesehen werden, obwohl sie im visuellen Spektrum in keinster Weise schwarz erscheinen, sondern verschiedene Farben besitzen.

V.4: Strahlungs-Thermometer

Mit einem *Strahlungs-Thermometer* oder auch *Pyrometer* kann man berührungslos Temperaturen von Objekten messen. Das funktioniert bei modernen Strahlungs-Thermometern über das STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz zur Strahlungsleistung eines grauen Strahlers:

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



Hierbei bezeichnet $E(T)$ das wie oben beschriebene Emissionsvermögen des grauen Körpers, σ die sogenannte STEFAN-BOLTZMANN-Konstante und F die Fläche des Körpers (um sie nicht mit dem Absorptionsvermögen $A(T)$ zu verwechseln). Die STEFAN-BOLTZMANN-Konstante ist eine Naturkonstante und hat den folgenden Zahlenwert:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}^2}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

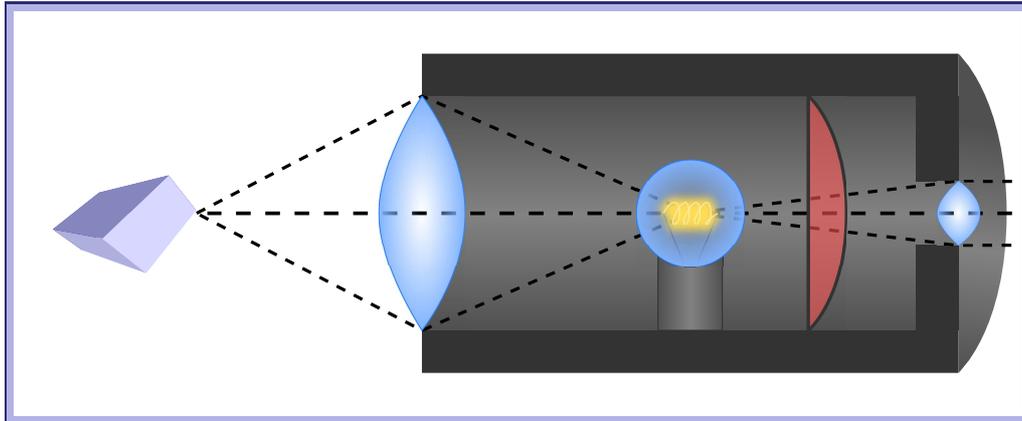
Messen wir nun mit Hilfe des Strahlungs-Thermometers die Strahlungsleistung des Körpers, erhalten wir seine Temperatur durch diesen Zusammenhang:

$$T = \sqrt[4]{\frac{P(T)}{E(T)\sigma F}}$$

Um eine Aussage über die Temperatur treffen zu können, muss man aber gleichzeitig auch das Emissionsvermögen des Stoffes kennen. Dies kann entweder durch Messung oder durch Ablesen aus einer entsprechenden Tabelle erfolgen.

Bei einem optischen Strahlungs-Thermometer, wie wir es im Praktikum verwenden, messen wir dagegen nicht die Strahlungsleistung, sondern vergleichen die Farbe eines Strahlers mit der einer Glühwendel bekannter Temperatur.

Das optische Strahlungs-Thermometer ist wie folgt aufgebaut:



Ein optisches Strahlungs-Thermometer (Bild: eigene Zeichnung)

Das Strahlungs-Thermometer besteht aus einer Röhre, in der sich eine Glühwendel und ein Rotfilter befinden. Es sind zwei Linsen an der Vorder- und an der Rückseite eingebaut, die die Arbeit mit dem Strahlungs-Thermometer erleichtern. Die Linse auf der Vorderseite hat die Eigenschaft, dass der Körper in die gleiche Ebene abgebildet wird, in der sich auch die Glühwendel befindet. Die hintere Linse ist nötig, um das Licht wieder parallel zu machen, um ein entspanntes Sehen zu ermöglichen.

Die Vorgehensweise ist nun die folgende: Man richtet das Thermometer auf den strahlenden Körper. Nun sieht man den Körper und die Glühwendel durch das Thermometer in einer Ebene. Über eine Spannungsquelle und einen regelbaren Widerstand kann der Strom, der durch die Glühwendel fließt, eingestellt werden. Der Widerstand ist nun so einzustellen, dass die Glühwendel vor dem Hintergrund des Körpers gerade verschwindet. In diesem Fall hat die Glühwendel die gleiche Strahlungsleistung (da wir die Situation durch ein Rotfilter betrachten) wie der Körper. Die Temperatur der Wendel kann aus dem durch sie fließenden Strom durch Eichung an einem Körper bekannter Temperatur bestimmt werden. Ist nun das Emissionsvermögen des betrachteten Körpers konstant, kann seine Temperatur berechnet werden.

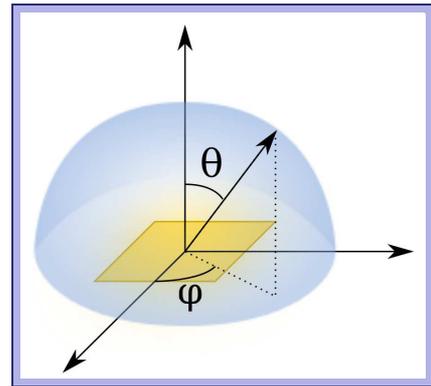
Es lässt sich allgemein sagen, dass die Temperatur eines grauen Strahlers bei gleicher Strahlungsleistung geringer ist als diejenige eines schwarzen Strahlers, da der graue Strahler ja einen geringeren Emissionskoeffizienten hat.

1: STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz

Wir wollen nun in diesem Aufgabenteil das schon erwähnte STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz näher untersuchen. Zunächst eine kurze Herleitung aus dem PLANCK'schen Strahlungsgesetz:

Wir integrieren die Energiedichte der PLANCK'schen Strahlung über alle Frequenzen und über die Hälfte des gesamten Raumwinkels, da wir annehmen, dass der Strahler in alle Raumrichtungen gleichmäßig strahlt und die andere Hälfte vom Körper verdeckt ist. Auf der rechten Seite haben wir das Integrationsgebiet noch einmal illustriert. Das Ergebnis ist dann die spezifische Ausstrahlung $M^0(T)$ des schwarzen Strahlers¹:

$$M^0(T) = \int_0^\infty df \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \sin(\theta) \cos(\theta) \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1}$$



Hierbei ist der Faktor $d\phi d\theta \sin(\theta)$ ein Raumwinkelelement. Der weitere Faktor $\cos(\theta)$ kommt daher, dass bei einem Winkel θ , der von 0° verschieden ist, die Fläche kleiner erscheint.

$$x := \frac{hf}{k_B T}; \Rightarrow df = dx \frac{k_B T}{h}; f = \frac{x k_B T}{h}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow M^0(T) &= \int_0^\infty dx \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \sin(\theta) \cos(\theta) \frac{4\pi k_B^4 T^4 x^3}{h^2 c^2} \frac{1}{e^x - 1} \\ &= \frac{4\pi k_B^4 T^4}{h^2 c^2} \int_0^\infty dx \frac{x^3}{e^x - 1} \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \sin(\theta) \cos(\theta) \\ &= \frac{4\pi k_B^4 T^4}{h^2 c^2} \frac{\pi^4}{15} \frac{1}{2} = \underbrace{\frac{2\pi^5 k_B^4}{15 h^3 c^2}}_{=: \sigma} T^4 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow P = \sigma F T^4$$

Wir haben auf diese Weise das STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz hergeleitet. In der Realität allerdings betrachtet man zumeist eher die Leistungsdifferenz $P - P_0$, da auch die Umgebung ständig Strahlung abgibt. Wir erhalten dann näherungsweise für die Nettoleistung:

$$\Rightarrow P = \sigma F (T^4 - T_0^4)$$

¹Diese Rechnung folgt der Darstellung auf der Seite von Wikipedia über das STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz: <http://de.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmann-Gesetz>

Dieses soll in Aufgabe 1 verdeutlicht werden, indem wir einen als schwarz anzusehenden Körper langsam aufheizen und die Temperatur mit Hilfe eines Thermoelements messen.

Da die genaue Messung einer über alle Frequenzen abgestrahlten Leistung sehr schwierig ist, wollen wir uns in diesem Versuch darauf beschränken, die Proportionalität der Strahlungsleistung zur vierten Potenz der Temperatur zu zeigen. Dies geschieht mit Hilfe einer MOLL'schen Thermosäule, die über eine Lochblende vom schwarzen Strahler beleuchtet wird. Diese ist im Inneren aus kleinen und vor allem sehr dünnen Thermoelementen aufgebaut, die durch eine gerußte Fläche erwärmt werden. Es wird dann die durch den SEEBECK-Effekt entstandene Spannung zwischen den beiden Materialien der Elemente gemessen, der daher ein Maß für die Wärmestrahlung ist. Es sollte sich also folgende Proportionalität ergeben:

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

Wenn wir den Proportionalitätsfaktor als k definieren und diese Gleichung logarithmieren, erhalten wir den folgenden Zusammenhang:

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

Wie man sieht, sollte bei einer linearen Regression von $\ln(U)$ in Abhängigkeit von $\ln(T)$ die Steigung etwa $m = 4$ betragen, womit wir die Proportionalität gezeigt hätten².

Ein Problem bei dieser Messung ist, dass die Strahlungsleistung sehr rasch ansteigt (nämlich mit der vierten Potenz der Temperatur). Es empfiehlt sich daher, die Intervalle zwischen zwei für die Messung verwendeten Temperaturen nicht gleich groß zu wählen. Vielmehr sollten diese Intervalle auch der vierten Potenz folgen:

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

Wenn wir diese Gleichung nach ΔT umformen erhalten wir also die Schrittweite für unsere Messungen zu:

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

Die Differenzen der gemessenen Spannung am Thermoelement sollten nun konstant sein, da sie proportional zu den Änderungen der Strahlungsleistung sind.

Um die Messergebnisse nicht zu verfälschen, werden wir das Thermoelement während den Pausen des Versuchs abdecken und vor jeder Messung die Einstellung des thermodynamischen Gleichgewichts zwischen Thermoelement und schwarzem Strahler abwarten.

²Der Faktor $\sqrt[4]{k}$ erzeugt nur einen Achsenabschnitt, der für uns nicht von Bedeutung ist.

2: Emissionsvermögen

In dieser Aufgabe gehen wir analog zu Aufgabe 1 vor. Allerdings ist nun die Strahlungsquelle eine beheizbare Scheibe, die in verschiedene Kreisabschnitte zerlegt ist. Mit Hilfe eines Thermoelements und eines Millivoltmeters messen wir die Temperatur der Scheibe.

Es wird dann die Scheibe so abgedeckt, dass jeweils ein Kreisabschnitt frei ist und die MOLL'sche Thermosäule von ihr bestrahlt wird. Wir machen dann die gleichen Regressionen wie in der ersten Aufgabe. Die Kreisabschnitte haben hier jeweils ein unterschiedliches Emissionsvermögen, auf das durch die Messung Rückschlüsse gezogen werden sollen. Es gilt die bereits in den Vorbemerkungen erwähnte Formel für das Emissionsvermögen:

$$E(T) = \frac{M(T)}{M^o(T)}$$

Bei gleicher Fläche der Sektoren können wir also schreiben:

$$E(T) = \frac{P_{\text{Sek.}}}{P_{\text{s.Str.}}}$$

Da aber die Spannung am Millivoltmeter proportional zur Nettoleistung ist, können wir das Emissionsvermögen auch direkt über die Spannungen vergleichen:

$$E(T) = \frac{U_{\text{Sek.}}}{U_{\text{s.Str.}}}$$

Es empfiehlt sich – um die geringen Unterschiede gut auflösen zu können – die Strahler möglichst nah an die Lochblende der Thermosäule zu bringen, damit sich das thermodynamische Gleichgewicht an der Thermosäule vor der Messung vollständig ausgebildet hat.

Der Heizstrom durch die Scheibe sollte laut der Aufgabenstellung $I_{\text{max}} = 3,5\text{A}$ nicht übersteigen.

3: Temperatur einer Glühlampe

In dieser Aufgabe werden wir die Temperatur einer aus Wolfram bestehenden Glühwendel in Abhängigkeit vom durch sie fließenden Strom bestimmen. Hierzu verwenden wir das optische Strahlungs-Thermometer, wie es in den Vorbemerkungen beschrieben wurde.

Allerdings ist hierbei zu beachten, dass Wolfram ein grauer Strahler ist. Wir machen daher eine Korrektur, da $E(T) = 1$ hier nicht angenommen werden kann. Aus dem PLANCK'schen Strahlungsgesetz folgt die folgende Gleichung:

$$\frac{1}{T_w} - \frac{1}{T_s} = \frac{k_B \lambda}{hc} \ln(E(T))$$

Hierbei steht T_w für die wahre Temperatur der Glühwendel und T_s für die über das Strahlungs-Thermometer bestimmte „schwarze“ Temperatur. Zusätzlich benötigen wir für die Umrechnung noch die Wellenlänge λ des beobachteten Lichts³. Um die gesamte Betrachtung zu vereinfachen, können wir hierzu aber das Schaubild aus der Vorbereitungshilfe verwenden.

Konkret gehen wir nun so vor: Wir heizen die Glühwendel auf eine noch zu messende Temperatur auf, indem wir einen Strom von maximal $I_{\max} = 4\text{A}$ durch sie fließen lassen. Mit Hilfe des Strahlungs-Thermometers messen wir dann wie im Abschnitt V.4 beschrieben den Strom, der nötig ist, um die Glühwendel im Thermometer so weit aufzuheizen, dass sie bei der Beobachtungswellenlänge von 650nm die gleiche Helligkeit besitzt. Mit Hilfe der Eichkurve kann dann aus diesem Strom die Temperatur der Glühwendel im Strahlungs-Thermometer und damit die *schwarze* Temperatur der zu untersuchenden Glühwendel bestimmt werden. Über das Schaubild in der Vorbereitungshilfe können wir ersehen, welche Temperaturdifferenz ΔT von wahrer zu schwarzer Temperatur existiert und erhalten so unser Ergebnis:

$$T_w = T_s + \Delta T$$

Ein Problem bei dieser Messung ist, dass sich die Glühwendel nicht gleichmäßig aufheizt. Für unsere Temperaturmessungen sollen wir hierbei die hellsten Stellen als Messpunkte verwenden.

Die Temperatur soll für verschiedene Ströme gemessen werden. Die Messwerte können wir bei der Auswertung in einem Schaubild eintragen, wobei ein linearer Zusammenhang zwischen Strom I und wahrer Temperatur T_w erwartet wird. Als Steigung der Geraden ergibt sich der „Wirkungsgrad“ der Lichterzeugung. Der numerische Wert ist für uns aber nicht weiter von Bedeutung.

³Es ist hier das Maximum des Durchlasses des eingebauten Rotfilters von $\lambda = 650\text{nm}$ zu verwenden.

Messprotokoll für "Wärmestrahlung"

Aufgabe 1:

U_{temp}^{mV}	0,04	0,07	0,09	0,11	0,125	0,145	0,165	0,19	0,21	0,23	0,255	0,29	0,295
U_{mess}^{mV}	0,033	0,045	0,055	0,066	0,072	0,08	0,091	0,1	0,11	0,116	0,126	0,137	0,143

fällt auf 0,04 mV bei Blende zu.

Spannung hochgedreht
↓

$U_{temp} [mV]$	0,325	0,345	0,37	0,395	0,415	0,43	0,45	0,475	0,5	0,53	0,56	0,59	0,64	0,68	0,72	0,78
$U_{mess} [mV]$	0,156	0,165	0,17	0,18	0,188	0,194	0,205	0,213	0,225	0,232	0,26	0,285	0,32	0,345	0,37	0,41

$U_{temp} [mV]$	0,82	0,87	0,92	0,97	1,02	1,07	1,12	1,17	1,22	1,32	1,37	1,44	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$U_{mess} [mV]$	0,435	0,465	0,5	0,533	0,565	0,6	0,64	0,68	0,705	0,78	0,815	0,87	0,91	0,99	1,07	1,14	1,22

$U_{temp} [mV]$	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	5,7
$U_{mess} [mV]$	1,3	1,38	1,46	1,55	1,64	1,72	1,8	1,88	1,95	2,06	2,16	2,25	2,36	2,45	2,56	2,67	2,77	2,87	3,0	3,12	3,24	3,36	6,5

Aufgabe 3:

Pt Probe [A]	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0
Messabweichung [A]	2,37	2,52	2,72	2,84	3,1	3,52

Wert (Ridung)

↓ 1,37

~~Wert~~

↓

Aufgabe 2:

Kupfer Blank

$U_{temp} [mV]$	1,19	1,37	1,65	1,85	2,15	2,5	2,7	3,0	3,2	3,5	4,0
$U_{mess} [mV]$	0,065	0,02	0,05	0,01	0,017	0,027	0,036	0,042	0,047	0,057	0,071

Kupfer Rau

$U_{temp} [mV]$	1,19	1,3	1,7	1,85	2,2	2,5	2,8	3,0	3,15	3,5	4,05
$U_{mess} [mV]$	0,06	0,03	0,015	0,017	0,028	0,04	0,052	0,06	0,067	0,075	0,108

Titanoxyd

$U_{temp} [mV]$	1,19	1,55	1,75	1,9	2,25	2,55	2,8	3,0	3,15	3,55	4,05
$U_{mess} [mV]$	0,075	0,089	0,021	0,029	0,048	0,065	0,082	0,094	0,105	0,129	0,167

Russ

$U_{temp} [mV]$	1,19	1,6	1,8	1,95	2,35	2,6	2,9	3,1	3,25	3,55	4,1
$U_{mess} [mV]$	0,01	0,01	0,021	0,029	0,048	0,062	0,08	0,09	0,099	0,122	0,157

[Handwritten signature]

Hauptprotokoll zum Versuch

P2-43: Wärmestrahlung

Matthias von Borstel – Agilo Luitger Kern
Gruppe Do-15

25. Mai 2011

Inhaltsverzeichnis

1 STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz	2
Messung	2
Mögliche Fehlerquellen	3
2 Emissionsvermögen	5
Messung	5
Mögliche Fehlerquellen	7
3 Temperatur einer Glühlampe	9
Messung	9
Mögliche Fehlerquellen	10



Max PLANCK im Jahr 1901 (Bild: Open Source)

Hauptprotokoll zum Versuch P2-43: Wärmestrahlung

Matthias von Borstel – Agilo Luitger Kern – Gruppe Do-15

1: STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz

Messung

In dieser Aufgabe soll die Gültigkeit des STEFAN-BOLTZMANN-Gesetzes überprüft werden. Das STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz ist für $m = 4$ gegeben durch:

$$P = \sigma F T^m$$

Wie in der Vorbereitung beschrieben, sollte hierzu eine doppelt-logarithmische Auftragung gemacht werden, durch die wir den Exponenten $m = 4$ als Steigung der durch lineare Regression gewonnenen Geraden erhalten müssten:

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

Die Temperatur T ergibt sich aus der am Thermoelement des schwarzen Strahlers gemessenen Spannung durch Ablesen der entsprechenden Werte aus der in der Vorbereitungshilfe gegebenen Tabelle. Wir haben eine Umgebungstemperatur von $\vartheta_{\text{Um}} = 20^\circ\text{C}$ angenommen.

Wir haben hierbei allerdings die Schrittweite der Messpunkte nicht auf die in der Vorbereitung beschriebenen Anordnung gesetzt. Vielmehr haben wir versucht, möglichst viele Messwerte aufzunehmen, um die statistische Abweichung möglichst gering zu halten. Die Intervalle zwischen den Messpunkten ergaben sich dann zunächst durch die begrenzte Geschwindigkeit der Wertaufnahme und später durch die für mehr Messungen zu grobe Skala am Millivoltmeter, das an das Thermoelement des schwarzen Strahlers angeschlossen war. Wir haben versucht, einen möglichst breiten Temperaturbereich abzudecken, damit die Gültigkeit des Gesetzes besser verifiziert ist. Zu diesem Zweck haben wir den schwarzen Strahler von Aufgabe 1, noch während wir die dritte Aufgabe bearbeitet haben, weiter aufgeheizt, um noch eine möglichst hohe Temperatur zu erhalten.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Messwerte für die beiden gemessenen Spannungen U_{Str} (Spannung durch Temperatur des schwarzen Strahlers) und U_{Th} (Spannung durch Temperatur der MOLL'schen Thermosäule) dargestellt. Wir haben sie direkt in eine Temperatur umgerechnet und logarithmiert:

$\ln(T)$	$\ln(U_{\text{Th}})$	$\ln(T)$	$\ln(U_{\text{Th}})$	$\ln(T)$	$\ln(U_{\text{Th}})$	$\ln(T)$	$\ln(U_{\text{Th}})$
5,70761	-3,41125	5,89482	-1,6399	6,13155	-0,385662	6,46948	0,667829
5,73059	-3,10109	5,90304	-1,58475	6,14665	-0,349557	6,48486	0,722706
5,73383	-2,90042	5,9112	-1,54646	6,17201	-0,248461	6,50151	0,770108
5,74668	-2,7181	5,92198	-1,49165	6,18446	-0,204567	6,51641	0,81093
5,75305	-2,63109	5,93264	-1,46102	6,20081	-0,139262	6,53255	0,858662
5,76252	-2,52573	5,94319	-1,34707	6,21491	-0,0943107	6,547	0,896088
5,77502	-2,3969	5,95363	-1,25527	6,23862	-0,0100503	6,56266	0,940007
5,78736	-2,30259	5,97164	-1,13943	6,26178	0,0676587	6,57668	0,982079
5,79651	-2,23493	5,98683	-1,06421	6,28255	0,131028	6,59051	1,01885
5,80559	-2,15417	5,99931	-0,994252	6,30289	0,198851	6,6055	1,06126
5,81756	-2,07147	6,01896	-0,891598	6,32283	0,262364	6,61894	1,09861
5,82939	-1,98777	6,03105	-0,832409	6,34239	0,322083	6,6322	1,13783
5,83525	-1,94491	6,04773	-0,765718	6,36156	0,378436	6,64529	1,17557
5,84687	-1,8579	6,06181	-0,693147	6,38038	0,438255	6,6582	1,21194
5,85836	-1,80181	6,07569	-0,629234	6,39884	0,494696	6,84391	1,8718
5,86972	-1,77196	6,09165	-0,57093	6,41042	0,542324		
5,87816	-1,7148	6,10513	-0,510826	6,43479	0,587787		
5,88652	-1,67131	6,11843	-0,446287	6,45229	0,631272		

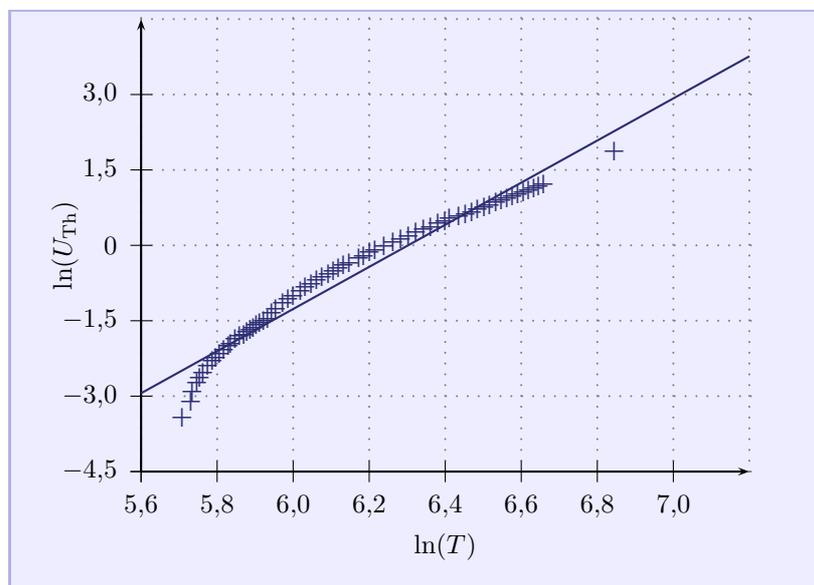
Nun haben wir wie oben beschrieben den Logarithmus von der Spannung U_{Th} und der Temperatur T gebildet. Aufgrund der Fülle der Messwerte haben wir uns dazu entschieden, dies von einem kleinen, von uns in C++ geschriebenen Programm übernehmen zu lassen. Diese Wertepaare sollten nach dem STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz auf einer Geraden liegen. Nach Regression erhalten wir diese Werte:

$$y(x) = mx + c$$

$$m = 4,2 \pm 0,1$$

$$c = -26,4 \pm 0,6$$

Der zweite Wert beschreibt hier jeweils die Standardabweichung der Größe. Wie man sieht, liegt der von uns ermittelte Wert recht nah an dem vorhergesagten Ergebnis. Die Abweichung vom vermeintlich wahren Wert $m = 4$ beträgt nur etwa 5%. Mit Sicherheit ein für die Messungengenauigkeiten erstaunlich „guter“ Wert. Der Parameter c ist für unsere Betrachtung nicht von Bedeutung. In der nachfolgenden Grafik sind die logarithmierten Messwerte zusammen mit der berechneten Regressionsgeraden dargestellt:



Mögliche Fehlerquellen

Wie schon in der Vorbereitung und auch in der Aufgabenstellung selbst erwähnt, ist die Messung in diesem Versuch recht stark fehlerbehaftet, weshalb wir uns auch darauf beschränkt haben, die Proportionalität der Strahlungsleistung zur vierten Potenz der Temperatur des Strahlers nachzuweisen.

Generell lässt sich sagen, dass der statistische Fehler unserer Messung gegenüber den systematischen Fehlern vermutlich gering ausfällt. Eine der größten Fehlerquellen ist die träge Messung der Strahlungsleistung an der MOLL'schen Thermosäule: Entfernten wir die Metallplatte vor der Thermosäule, stieg die am Thermoelement gemessene Spannung U_{Th} nur langsam. Es war daher zum Teil schwierig, den Punkt auszumachen, der zu der aktuellen Strahlungsleistung gehörte, denn gleichzeitig stieg ja auch die Temperatur des schwarzen Strahlers, weshalb die Spannung am Thermoelement der MOLL'schen Säule ohne Abschirmung durch die Metallplatte ohnehin kontinuierlich stieg.

Die Metallplatte, die wir zwischen den Messungen vor die Thermosäule brachten, hatte die Bewandnis, dass sich Letztere möglichst wenig aufwärmt, was das Messergebnis verfälscht hätte. Bei niedrigen Temperaturen des schwarzen Strahlers machte das keinen großen Unterschied und mit Abschirmung sank die Spannung am Thermoelement auf einen Wert nahe bei Null, wie es im thermodynamischen Gleichgewicht sein sollte. Bei höheren Temperaturen allerdings ergab sich das Problem, dass sich die Metallplatte

selbst durch die vom schwarzen Strahler ausgehende Wärmestrahlung aufheizte und die Spannung U_{Th} einen von Null deutlich verschiedenen Wert annahm. Da die Metallplatte während der Messung entfernt wurde, ist diese Spannung zunächst nicht von Bedeutung, legt aber die Vermutung nahe, dass sich auch die Thermosäule selbst mit der Zeit aufgewärmt hat. Dieser Effekt verfälscht also vermutlich bei hohen Temperaturen unser Messergebnis für die Strahlungsleistung. Die gemessene Strahlungsleistung sollte danach vom theoretisch zu erwartenden Wert nach unten abweichen, was sie auch tatsächlich tut. Allerdings ist die Abweichung hier weniger groß als von uns erwartet.

Ein geringer Fehler kann natürlich auch durch die Messinstrumente selbst auftreten. Dieser erscheint uns aber im Vergleich zu den übrigen systematischen Fehlern vernachlässigbar. Durch den Spiegel auf der Mess-Skala war eine unserer Ansicht nach recht präzise Ablesung der Messwerte möglich, da hierdurch die Parallaxenfehler praktisch keine Rolle spielten.

Der Fehler der durch die Thermoelemente erzeugten Spannung ist vermutlich gegenüber den oben genannten größten Fehlern auch klein. Dies machen wir hauptsächlich daran fest, dass die Spannung an der MOLL'schen Thermosäule zu Beginn sehr präzise einen Wert von $U_{\text{Th}} = 0$ annahm, wie es auch die in der Vorbereitung gezeigte Formel zur Nettoleistung erwarten lässt:

$$\Rightarrow P = \sigma F (T^4 - T_0^4)$$

Für $T = T_0$ fällt die Nettoleistung auf Null, wobei T hierbei die Temperatur der Metallplatte bezeichnet. Eher klein ist aus dem oben genannten Grund vor allem bei hohen Temperaturen auch der Fehler, der dadurch entsteht, dass sich im Raum auch noch andere Objekte befanden, von denen eine Wärmestrahlung ausging, die – als Nettoleistung betrachtet – von Null verschieden war. Hierzu zählen beispielsweise die Experimentatoren oder auch die Spannungsquellen, die sich bei höheren Spannung selbst aufheizen. Die Gruppe am Tisch gegenüber machte einen Versuch, in dem recht niedrige Temperaturen erzeugt wurden, was zu einer negativen Strahlungsleistung führt. Bei niedrigen Temperaturen könnte das eine Rolle gespielt haben, bei hohen Temperaturen dürfte aber die Strahlungsleistung des schwarzen Strahlers dominiert haben. Um den auf diese Weise entstanden Fehler zu minimieren, haben wir den schwarzen Strahler von anfang an möglichst nah an die Thermosäule geschoben.

Ein weiterer möglicher Fehler bei dieser Messung ist die Tatsache, dass zwei Messwerte gleichzeitig genommen werden müssen. Da das Ablesen eine gewisse Zeit benötigt, musste aber je einer aus unserer Gruppe an einem Millivoltmeter den Wert ablesen. Anfangs geschah das vermutlich nicht exakt gleichzeitig, weshalb wir – um diesen Fehler zu minimieren – dazu übergingen, dass wir die Spannung U_{Th} beim Erreichen eines vorher ausgemachten Wertes für die Spannung U_{Str} am Thermoelement des schwarzen Strahlers ablasen. Das Erreichen des Wertes signalisierte derjenige am Millivoltmeter des Strahlers durch Zuruf. Dieser Fehler ist aber vermutlich – vor allem bei höheren Temperaturen – auch eher gering, da wir hier die gerade beschriebene Technik verwendeten und gleichzeitig auch die Spannung U_{Str} immer langsamer stieg, da die Aufheizung des Wärmebads aufgrund der geringen Umgebungstemperatur immer mehr Strom benötigte.

Diesen haben wir deshalb nach und nach erhöht, wobei wir anfangs noch einen eher geringen Strom von $I \approx 2\text{A}$ einstellten, damit die Temperatur nicht zu schnell stieg und ein präzises Ablesen der Werte möglich war. Später steigerten wir den Strom bis auf den in der Aufgabenstellung angegebenen Maximalwert von $I = 4\text{A}$. Durch die Aufheizung der Heizspulen im Strahler schien außerdem ihr Widerstand zu sinken, denn der Strom hätte sich ohne leichtes Herunterregeln mit der Zeit auf über 4A erhöht.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass in diesem Versuch sehr viele, quantitativ schwierig auszudrückende systematische Fehlerquellen existieren. Abhilfe könnte möglicherweise eine computergesteuerte Messung in einem eigenen Raum schaffen, wodurch einige der Fehler verringert werden könnten. Es lässt sich gleichzeitig auch sagen, dass diese systematischen Fehler in unterschiedlichen Temperaturbereichen von Bedeutung sind und gleichzeitig auch in jedem Temperaturbereich starke Fehler existieren. Eine Verringerung des Temperaturbereiches macht daher – auch vor dem Hintergrund des Nachweises der Gültigkeit der T^4 -Abhängigkeit – keinen Sinn. Trotz allem ist dieser Versuch wohl aber ein sehr lehrreicher.

2: Emissionsvermögen

Messung

In dieser Aufgabe ging es darum, das Emissionsvermögen von verschiedenen Flächen über die von ihnen bei gleicher Temperatur ausgehende Strahlungsleistung. Auch hier rückten wir den Strahler – in diesem Fall die Sektorenscheibe – möglichst nahe an die MOLL'sche Thermosäule, damit die kalte Umgebung das Ergebnis möglichst wenig verfälscht.

Um die Scheibe langsam aufzuheizen, verwendeten wir zunächst einen Strom von ungefähr 1,5 A, regelten diesen dann aber mit der Zeit auf etwa 2,5 A hoch, um eine schnellere Aufheizung der Scheibe zu erhalten. Im Folgenden machten wir jeweils in der Reihenfolge eine Messung mit blankem Kupfer, rauem Kupfer, Titanoxid und Ruß als Oberfläche. Hierzu drehten wir die Sektorenscheibe so, dass jeweils die zu untersuchende Fläche zur Öffnung der Thermosäule zeigte. Über ein diesmal mit Hilfe von Eiswasser geeichtes Thermoelement maßen wir die Spannung U_{Str} . Zwischen den Messungen haben wir wieder die Metallplatte zwischen die Thermosäule und den Strahler geführt, damit Erstere weniger stark aufgeheizt wird. Außerdem haben wir die Öffnung des schwarzen Strahlers mit Alu-Folie abgedeckt, um eine Verfälschung des Messergebnisses durch den vorher verwendeten schwarzen Strahler zu vermeiden.

Um die Temperatur der aus Kupfer bestehenden Sektorenscheibe zu bestimmen, haben wir wie in Aufgabe 1 für den schwarzen Strahler Tabellenwerte verwendet. Hier mussten wir aber nicht von einer bestimmten Raumtemperatur ausgehen, da wir ja das Thermoelement mit Hilfe von Eiswasser auf $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ geeicht hatten. Unsere Messwerte sind in den folgenden Tabellen dargestellt:

Kupfer (blank):

$\ln(T)$	$\ln(U_{\text{Th}})$
3,52636	-6,90776
3,71357	-5,29832
3,82864	-4,60517
3,97029	-4,07454
4,12713	-3,61192
4,18965	-3,32424
4,30407	-3,17009
4,35671	-3,05761
4,45435	-2,8647
4,58497	-2,64508

Kupfer (rau):

$\ln(T)$	$\ln(U_{\text{Th}})$
3,46574	-5,80914
3,73767	-4,19971
3,82864	-4,07454
3,98898	-3,57555
4,12713	-3,21888
4,23411	-2,95651
4,30407	-2,81341
4,34381	-2,70306
4,45435	-2,4651
4,59512	-2,22562

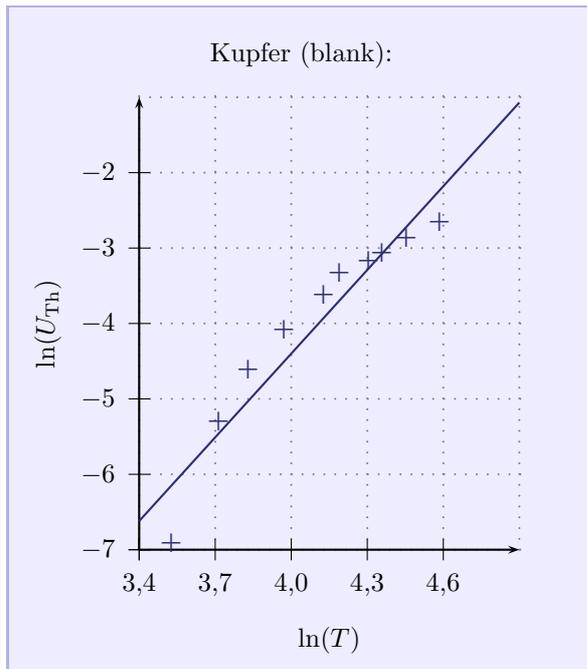
Titanoxid:

$\ln(T)$	$\ln(U_{\text{Th}})$
3,63759	-4,71053
3,7612	-4,60517
3,85015	-3,54046
4,00733	-3,03655
4,14313	-2,73337
4,23411	-2,50104
4,30407	-2,36446
4,34381	-2,25379
4,46591	-2,04794
4,59512	-1,78976

Ruß:

$\ln(T)$	$\ln(U_{\text{Th}})$
3,68888	-4,60517
3,80666	-3,86323
3,8712	-3,54046
4,06044	-3,03655
4,15888	-2,77259
4,26268	-2,52573
4,33073	-2,40795
4,38203	-2,31264
4,46591	-2,09557
4,60517	-1,85151

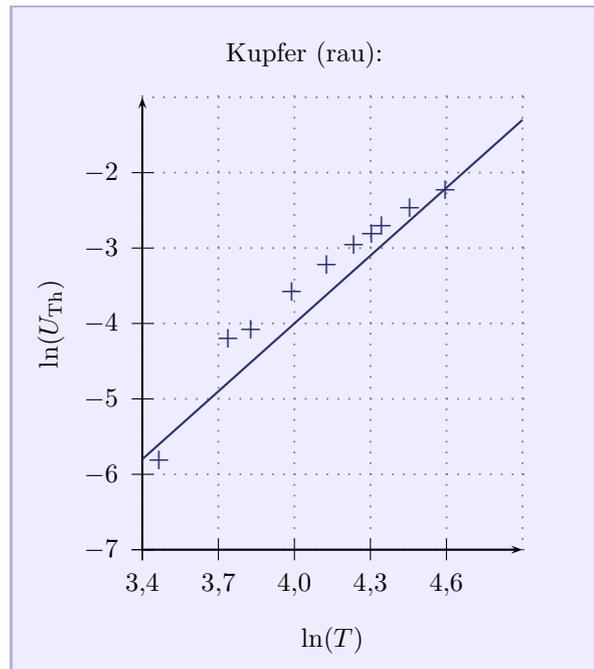
Wenn wir dieses Ergebnis grafisch darstellen, sollten wir wieder wie in Aufgabe 1 Geraden für die Funktion $U_{\text{Str}}(T)$ in doppelt-logarithmischer Darstellung erhalten. Das Emissionsvermögen steckt in diesem Fall im y-Achsenabschnitt. Mit diesem Messaufbau (s. „Mögliche Fehlerquellen“) ist eine quantitative Aussage über das Emissionsvermögen jedoch etwas gewagt. Es geht uns daher eher um den relativen Vergleich unter den verschiedenen Beschichtungen. Die Messwerte und die durch lineare Regression erhaltenen Geraden sind in den Grafiken auf der folgenden Seite dargestellt.



$$y(x) = mx + c$$

$$m = 3,7 \pm 0,4$$

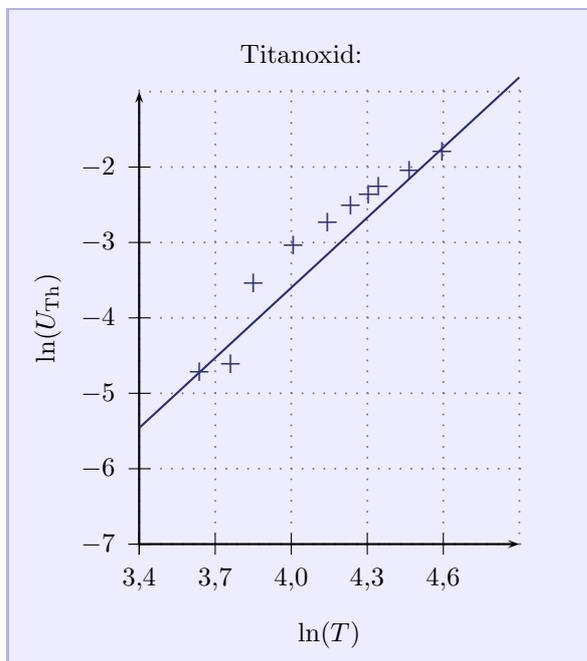
$$c = -19,2 \pm 1,7$$



$$y(x) = mx + c$$

$$m = 3,0 \pm 0,2$$

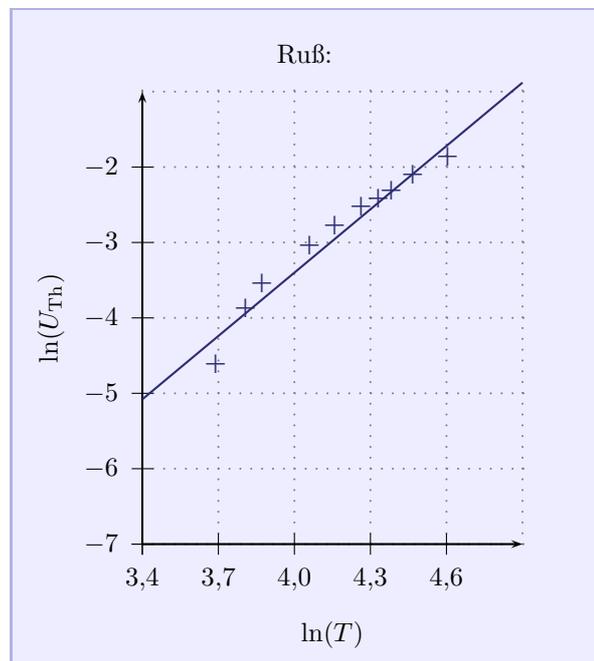
$$c = -16 \pm 1$$



$$y(x) = mx + c$$

$$m = 3,1 \pm 0,3$$

$$c = -16 \pm 1$$



$$y(x) = mx + c$$

$$m = 2,8 \pm 0,2$$

$$c = -14,6 \pm 0,8$$

Wie man sieht, weichen die Messungen sehr stark vom ideal des schwarzen Strahlers ab. Die Steigung der durch Regression gewonnenen Geraden ist durchweg deutlich niedriger als sie eigentlich nach den theoretischen Überlegungen sein sollte. Außerdem ändert sie sich auch bei jedem Sektor. Eine mögliche Ursache hierfür ist unserer Ansicht nach, dass die Sektorenscheibe ungleichmäßig aufgeheizt wird. Dazu mehr unter *Mögliche Fehlerquellen*. Dass dies die Ursache ist, vermuten wir, da das Emissionsvermögen wohl kaum so stark von der Temperatur abhängt.

In der Vorbereitung wurde die folgende Formel hergeleitet aus dem STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz hergeleitet:

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

Hierbei ist k die Proportionalitäts-Konstante zwischen der Strahlungsleistung und der vierten Potenz der Temperatur. Diese wiederum ist proportional zum Emissionsvermögen. Je größer der y -Achsenabschnitt c , desto höher ist also das Emissionsvermögen.

Wir können nun eine Aussage über das relative Emissionsvermögen der Oberflächen machen: Die gerußte Oberfläche hat das stärkste Emissionsvermögen, wie man es auch erwartet hätte, da es zumindest im visuellen Bereich des Spektrums die höchste Absorption aufweist. Überraschend ist allerdings, dass das Titanoxid ein nur wenig geringeres Emissionsvermögen als der Ruß besitzt. Gleichzeitig besitzen raues Kupfer und Titanoxid offenbar ein ähnliches Emissionsvermögen. Blankes Kupfer ist erwartungsgemäß deutlich weiter unten auf dieser Skala angesiedelt und hat mit Abstand das geringste Emissionsvermögen. Dies ist auch nicht überraschend, da blankes Kupfer stark reflektiert.

Mögliche Fehlerquellen

Wie schon eingangs erwähnt ist auch dieser Versuch sehr stark fehlerbehaftet. Wir wollen im Folgenden die hauptsächlichen Fehlerquellen beschreiben. Teilweise entsprechen diese natürlich jenen aus Aufgabe 1, da der Versuchsaufbau prinzipiell ähnlich ist.

Als größte Fehlerquelle in diesem Versuch sehen wir die Sektorenscheibe: Da die Sektoren nah beieinander sind, ist es schwierig, einzelne Sektoren so abzudecken, dass nur die Strahlungsleistung eines Sektors von Relevanz wäre. Wenn wir also das Emissionsvermögen eines der Sektoren messen, messen wir die übrigen auch mit, auch wenn diese natürlich nur zu einem kleineren Teil beitragen (s. hierzu den Integralausdruck aus der Vorbereitung, Seite 7: Wir nähern $\cos(\theta)$ hier für alle anderen Sektoren durch Null, was wohl sehr grob ist). Mit zusätzlichem Aufwand hätte man diesen Fehler möglicherweise stark verkleinern können. So hätte man möglicherweise einen Kasten um die Sektorenscheibe bauen können, der ein Loch in der Größe eines Sektors besitzt, vergleichbar einem Filterrad für optische Filter. Der Materialaufwand hierfür wäre nicht allzu groß.

Ein weiteres Problem ist auch hier, dass sich die MOLL'sche Thermosäule mit der Zeit erwärmt. Dieser Fehler macht aber vermutlich nicht so viel aus wie in der vorherigen Aufgabe, da wir generell weniger lang gemessen haben und die Sektorenscheibe weniger weit aufgeheizt haben. Außerdem haben wir die dritte Aufgabe zeitlich vor der zweiten Aufgabe bearbeitet. Die MOLL'sche Thermosäule sollte sich also in dieser Zeit wieder im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Umgebung befunden haben.

Ein weiterer denkbarer Fehler dieses Messaufbaus ist, dass die Sektorenscheibe nicht gleichmäßig warm wird. Zwar handelt es sich bei dem verwendeten Material der Scheibe um Kupfer, welches eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt, aber auch diese ist natürlich endlich. Es kann daher nicht davon ausgegangen werden, dass sie überall die gleiche Oberflächen-Temperatur aufweist, weshalb das STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz genau genommen hier eigentlich gar keine Gültigkeit hat. Eine weitere Frage ist, ob die Temperaturverteilung der Sektorenscheibe dann zumindest rotationssymmetrisch ist, also ob die Temperatur an der Oberfläche allein vom Radius zum Zentrum abhängt. Diese Frage ist für uns schwer zu beantworten. Auch hier ist aber ein systematischer Fehler gut denkbar, gleichzeitig würde dieser das Messergebnis natürlich enorm verfälschen.

Weniger ins Gewicht fällt vermutlich die Eichung des Thermoelements, mit dem wir die Temperatur der Sektorenscheibe gemessen haben. Das eine Ende des Thermoelements musste sich für eine präzise Messung auf einer Temperatur von $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ befinden. Wir hatten nicht die Möglichkeit, die Temperatur des

von uns verwendeten Eiswassers zu messen, jedoch sollte diese nicht über $\vartheta = 2^\circ\text{C}$ betragen haben. Der Temperaturfühler kommt dann auch vermutlich sehr rasch auf die geforderte Temperatur.

Eine weitere, allerdings eher kleine Fehlerquelle ist das Ablesen der Werte in der Tabelle. Da immer etwas grobe Schritte in der Tabelle angegeben sind, müssen unsere Messwerte durch Interpolation in eine Temperatur umgerechnet werden. Im Vergleich zu den übrigen Fehlerquellen ist diese aber vermutlich vernachlässigbar.

Denkbar ist auch, dass die Stellung der Scheibe, die wir von Hand und per Augenmaß eingestellt haben, eine Rolle gespielt hat. Die Sektorenscheibe befand sich ja zu den Zeitpunkten der Messung der Strahlungsleistung einer Oberfläche nicht immer in der exakt gleichen Stellung. Dadurch erhalten wir eine schwer zu quantifizierende statistische Streuung der Messwerte. Abhilfe hätte hier eine andere Messmethode schaffen können, bei der wir für jeden Sektor eine eigene Messreihe aufgenommen hätten, anstatt die Sektorenscheibe vor jedem Messwert zu drehen. Das hätte aber eine recht lange Zeit in Anspruch genommen, da wir ja nach jedem Messvorgang die Abkühlphase der Scheibe hätten abwarten müssen – welche man aber möglicherweise auch durch Verwendung einer Kühlung mit Hilfe des vorhandenen Eises hätte verkürzen können. Es ist aber fraglich, ob dieser Mehraufwand zu einer messbaren Verbesserung geführt hätte.

Letztendlich gelten auch hier alle weiteren, bereits in der Diskussion aus der vorherigen Aufgabe genannten Fehlerquellen. Hervorzuheben ist hier noch die Tatsache, dass sich die Umgebung nicht zwangsläufig im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Und auch hier hat sich natürlich das Problem der trägen Messung der Spannung U_{Th} ergeben.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass der Versuch eher demonstrativen Charakter hat, da eine quantitative Angabe aufgrund der vielen systematischen Unwägbarkeiten schwer möglich ist. Obwohl der statistische Fehler aufgrund der wenigen Messpunkte größer ist als in der vorherigen Aufgabe, sollte der systematische Fehler des Messaufbaus immer noch klar dominieren.

3: Temperatur einer Glühlampe

Messung

In dieser Aufgabe ging es darum, mit Hilfe eines optischen Pyrometers die wahre Temperatur der Glühwendel einer Glühlampe in Abhängigkeit des durch sie fließenden Stromes zu bestimmen. Wir gingen hierzu wie in der Vorbereitung beschrieben vor. Da aber die Glühwendel der zu untersuchenden Lampe einen recht kleinen Winkel im Pyrometer einnahm, war der Helligkeitsabgleich etwas schwieriger als von uns vorher angenommen. Es war nicht so wie erwartet, dass wir einen Hintergrund mit einer bestimmten Helligkeit und die Glühwendel des Pyrometers im Vordergrund zu sehen bekamen, sondern vielmehr zwei Leuchtflecken, die zudem nicht überall die gleiche Helligkeit besaßen. Die Vorgehensweise, dass der Strom durch die Pyrometerlampe solange hochgeregelt wird, bis die Glühwendel vor dem Hintergrund der zu untersuchenden Lampe verschwindet, konnte nicht verwendet werden.

Um eine möglichst objektive Beurteilung zu erhalten, haben wir jeweils abwechselnd den Strom eingestellt und so ohne das Wissen des vorherigen Wertes des anderen erneut die Helligkeit abgeglichen. Die Messwerte ergaben sich dann durch Mittelung der beiden von uns eingestellten Werte.

Die Messwerte, die wir aufgenommen haben, sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

I_{Probe} [A]	I_{Pyro} [A]
2,5	2,37
2,8	2,52
3,1	2,72
3,4	2,84
3,7	3,1
4,0	3,52

Um nun die Temperatur der Glühlampe ermitteln zu können, mussten wir die in der Vorbereitungshilfe gegebene Grafik verwenden, in der die Differenz von wahrer und „schwarzer“ Temperatur für den Werkstoff Wolfram aufgetragen ist.

Es ergeben sich dann für die Ströme durch die Glühlampe die folgenden Werte für die wahre Temperatur:

I_{Probe} [A]	T_w [K]
2,5	1715
2,8	1810
3,1	1920
3,4	2002
3,7	2150
4,0	2370

Da wir wie in der Vorbereitung beschrieben für die Temperatur T eine lineare Abhängigkeit von dem Strom I durch die Glühwendel erwarten, haben wir eine lineare Regression durch die obigen Punkte berechnet. Allerdings haben wir hierbei noch weiter vorausgesetzt, dass sich die Glühwendel bei einem Strom von $I = 0$ ja auf Raumtemperatur befinden muss. Der y -Achsenabschnitt der Geraden ist damit fest vorgegeben. Um die Regression einfacher berechnen zu können, haben wir hier die Differenz der wahren Temperatur zur Raumtemperatur von $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ aufgetragen. Es müsste sich dann eine Ursprungsgerade ergeben.

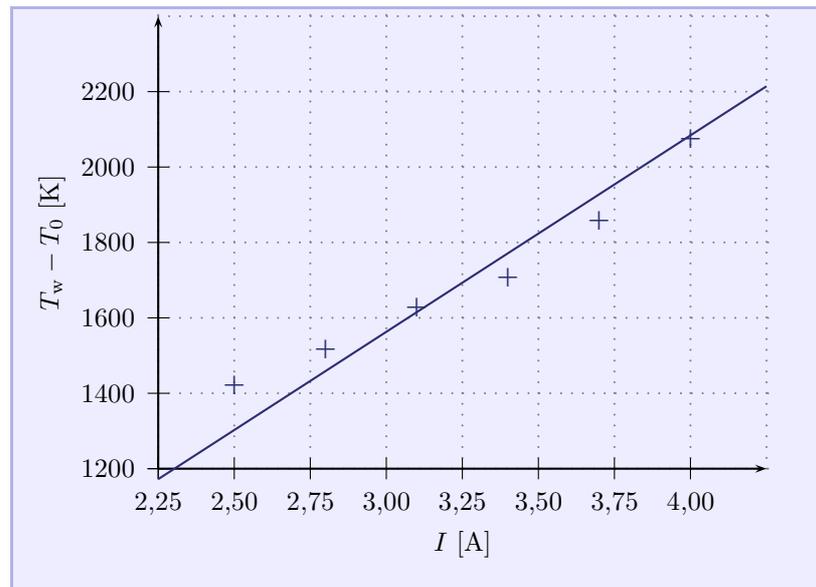
Wir erhalten durch Regression diese Geradengleichung:

$$y(x) = mx + c$$

$$m = 521 \frac{\text{K}}{\text{A}} \pm 9 \frac{\text{K}}{\text{A}}$$

$$c := 0$$

Diese Werte können wir nun veranschaulichen:



Die Linearität der Messwerte ist erstaunlich gut. Die Standardabweichung der Steigung m beträgt wie zuvor dargestellt nur $9\frac{\text{K}}{\text{A}}$ oder etwa 1,7%.

Die Steigung m der Geraden gibt wie in der Vorbereitung beschrieben eine Art „Wirkungsgrad“ der Lampe an. Dieser ist aber schwierig zu vergleichen, da ja auch die Oberfläche der Glühwendel wie schon in der Aufgabe zuvor beschrieben eine entscheidende Rolle spielt.

Mögliche Fehlerquellen

Wie bereits eingangs erwähnt, ist der Helligkeitsabgleich wohl mit Abstand die größte Fehlerquelle in diesem Versuch. Um diesen Fehler zu verringern, haben wir das oben beschriebene Verfahren angewendet. Abhilfe könnte hier ein besseres Pyrometer bringen. Es war vor Ort nicht möglich, das Pyrometer näher an die Glühlampe zu bringen, um das Bild der Glühwendel zu vergrößern. Um die Fehler des Experimentators zu umgehen, könnte man auch ein digitales Pyrometer verwenden, welches die Temperatur berührungslos misst.

Eine weitere Fehlerquelle ist hierbei die Messung der beiden Ströme. Dieser Fehler sollte aber recht gering sein. Durch die digitale Anzeige der Stromstärken ist der Ablesefehler sehr gering, da er ja nur durch falsches Einschätzen der Schwankungen der Anzeige entstehen kann. Die Messgenauigkeit des Strommessgerätes sollte auch eher gering sein, obwohl es nur ein eingebautes Messgerät in der Spannungsquelle und kein externes Messgerät war.

Eine große Fehlerquelle ist wohl auch, dass die Glühwendeln nicht überall die gleiche Helligkeit und dementsprechend nicht überall die gleiche Temperatur besitzen. Dadurch wird der Helligkeitsabgleich schwieriger. Zudem ist das eine Tatsache, die dazu führt, dass das STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz wie schon zuvor erwähnt seine Gültigkeit verliert, da sich der Körper ja nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befindet.