14.03.2022

372 - Wärmestrahlung

radioaktiv?

1.) Einleitung: Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts strahlt. Der Versuch 372 dient der Untersuchung dieser sogenannten Temperaturstrahlung. Genau gesagt sollen mithilfe einer Thermosäule einerseits die Abhängigkeit der Strahlung von der Oberflächenbeschaffenheit anhand eines Leslie-Würfels und andererseits die Temperaturabhängigkeit der Strahlung anhand einer Halogenlampe bestimmt werden.

Hinweis: Statt der in der Praktikumsanleitung verwendeten Frakturschrift für Absorptions-, Emissions-, Reflexions- und Transmissionsvermögen nutzen wir für bessere Lesbarkeit im Folgenden die griechischen Buchstaben α, ε, ϱ und τ.

2.) Voraufgaben:

372.A

$$\phi_1 + \varrho_1(\lambda,T)\cdot\phi_2 = \phi_2 + \varrho_2(\lambda,T)\cdot\phi_1 \quad \Big| \text{ Körper nicht transparent: } \tau = 0 \Rightarrow \varrho(\lambda,T) = 1-\alpha$$

$$\Leftrightarrow \phi_1 + \phi_2 - \alpha_1(\lambda,T)\,\phi_2 = \phi_2 + \phi_1 - \alpha_2(\lambda,T)\,\phi_1$$

$$\Leftrightarrow \alpha_1(\lambda,T)\cdot\phi_2 = \alpha_2(\lambda,T)\cdot\phi_1 \quad \Big| \text{ bilde totales Differential}$$

$$\Leftrightarrow \alpha_1(\lambda,T)\,d\phi_2 = \alpha_2(\lambda,T)\,d\phi_1 \quad \Big| \; d\phi = \varepsilon(\lambda,T)\,dA\,d\lambda$$

$$\Leftrightarrow \frac{\alpha_1(\lambda,T)}{\varepsilon_1(\lambda,T)} = \frac{\alpha_2(\lambda,T)}{\varepsilon_2(\lambda,T)} \checkmark$$

372.B

$$\lambda_{max}\cdot T = 2{,}8978\cdot 10^{-3}\,\mathrm{mK}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_S(\lambda_{max}) = \frac{2\pi h c^2}{\exp\left(\frac{hc}{2{,}8978\cdot10^{-3}\,\mathrm{mK}\cdot k_B}\right)-1}\cdot\frac{1}{\lambda_{max}^5} = \underbrace{\frac{2\pi\cdot 6{,}626\cdot 2{,}998^2\cdot 10^{-18}}{\exp\left(\frac{6{,}626\cdot 2{,}998}{2{,}8978\cdot 1{,}381}\right)-1}\,\frac{\mathrm{Jm}^2}{\mathrm{s}}}_{= 2{,}632\cdot 10^{-18}\,\frac{\mathrm{Jm}^2}{\mathrm{s}} := K \checkmark}\cdot \ldots$$

372.C

$$\frac{\phi}{A} = \varepsilon\sigma\left(T^4 - T_0^4\right)$$

Temperatur, ab der der Messfehler < 1 %: $T_0^4 < 0{,}01\cdot T^4 \Leftrightarrow T^4 > 100\,T_0^4$

$$\Leftrightarrow T > \sqrt{10}\cdot T_0 = 927\,\mathrm{K} = 654\,^\circ\mathrm{C} \checkmark$$

ok

3.) Messwerte: 372.a

Widerstand Halogenlampe: $R_0 = 0{,}4\ \Omega$, Raumtemperatur Anfang: $T_0 = (20{,}0 \pm 1{,}0$

Sensitivität der Thermosäule: $S = 26\ \frac{\mu V}{W/m^2}$

Offsetspannung:

t	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	1
$U_0(t)$ / mV	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,

160	170	180
1,6	1,6	1,6

t	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
U(t) / mV	-0,6	-78,6	-94,3	-98,8	-100,2	-101,3	-101,7	-102,2	-102,7	-103,1	-103,5	-103,8	-104,1	-104,4	-104,7	-104,9

160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
-105,2	-105,4	-105,5	-105,6	-105,7	-105,9	-106,2	-106,3	-106,5	-106,6	-106,7	-106,9	-107,0	-107,1	-107,1

Ermittlung der Ansprechzeit: $90\,\% \cdot (-107{,}1\,mV) = 96{,}39\,mV$

$\Rightarrow$ zwischen 20 und 30 Sekunden, zur Sicherheit wählen wir $\boxed{t_{Anspr.} = 30\,s}$

372.b $\Delta T = 1\,°C$, $\Delta U = 0{,}2\,mV$

Temperatur	26°C				30°C				35°C			
	m	s	w	p	m	s	w	p	m	s	w	p
Thermospannung U/mV	0,6	-1,6	-0,6	0,9	-0,2	-4,7	-4,5	0,4	-1,1	-8,8	-8,9	0,4
Offsetspannung U_0/mV	$U_{vorher} = +0{,}8$		$U_{nachher} = 0{,}2$		$U_{vorher} = +0{,}2$		$U_{nachher} = 0{,}6$		$U_{vorher} = +0{,}6$		$U_{nachher} = 0{,}8$	
	m	s	w	p	m	s	w	p	m	s	w	p
Thermospannung U/mV	-2,1	-13,3	-12,9	-0,8	-3,1	-17,9	-18,1	-0,9	-4,5	-22,9	-22,2	-2,2
Offsetspannung U_0/mV	$U_{vorher} = 0{,}6$		$U_{nachher} = 0{,}2$		$U_{vorher} = 0{,}2$		$U_{nachher} = 0{,}9$		$U_{vorher} = 0{,}9$		$U_{nachher} = 1{,}1$	
Temperatur	40°C				44°C				49°C			

Temperatur	54°C				59°				64°			
Thermospannung	m	s	w	p	m	s	w	p	m	s	w	p
U/mV	-5,5	-27,8	-28,2	-2,2	-6,9	-33,2	-32,5	-3,8	-8,3	-39,1	-39,4	-3,2
Offsetspannung U_0/mV	U_{vorher} = 1,1		$U_{nachher}$ = 0,2		U_{vorher} = 0,2		$U_{nachher}$ = 0,8		U_{vorher} = 0,8		$U_{nachher}$ = 1,2	

Temperatur	69°			
Thermospannung	m	s	w	p
U/mV				
Offsetspannung U_0/mV	U_{vorher} =		$U_{nachher}$ =	

Raumtemperatur: $T_0 = (21,0 \pm 1,0)\,°C$

Ende

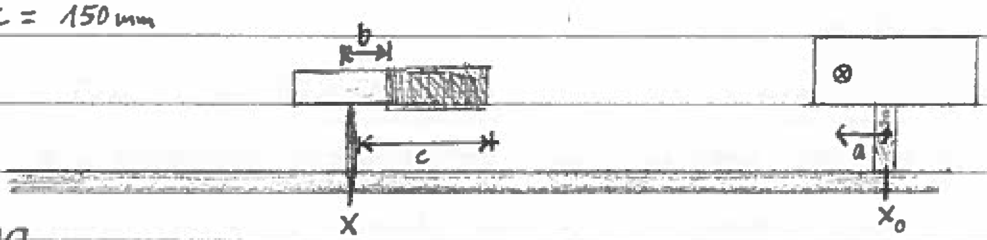
(I) $\Delta U_0 = 0,1\,V$, $\Delta I = 0,01\,A$

372.c Verstärker: 100, $U_0 = 12\,V$, $I = 4,31\,A$, $\Delta x = 1\,mm$, $x_0 = 950\,mm$

Position x [mm]	730	670	620	530	470	400	340	260	210
Thermo-Spannung U [mV]	-1159	-616	-352,3	-151,4	-97,9	-64,7	-48,3	-34,5	-28,5
ΔU [mV]	5mV		1mV			0,2mV			

a = 30 mm, b = 20 mm, Δa = Δb = 3 mm

c = 150 mm



(II)

Spannung U_L [V]	9,2	11,6	10,8	10,3	9,7	8,9	7,9	7,0	6,4	5,7
Strom I_L [A]	3,71	4,23	4,05	3,95	3,82	3,63	3,40	3,16	3,01	2,83
Thermo-Spannung U [mV]	-991	-1312	-1209	-1134	-1041	-922	-781	-655	-575	-491,6
	ΔU = 5 mV									

Abstand Lampe - Sensor: 160 mm

Ok [redacted]

4.) Theorie:

Einen Körper, der jegliche elektromagnetische Strahlung bei jeder Frequenz vollständig absorbiert (d.h. er hat ein Absorptionsvermögen von $\alpha = 1$) und gleichzeitig die größtmögliche Strahlungsleistung emittiert (denn nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz sind gute Absorber auch gute Emittenten), nennt man einen Schwarzen Körper. Es handelt sich dabei um einen hypothetischen Idealfall, der in der Natur nicht vorkommt. Die bestmögliche Realisierung erreicht man mit einem schwarzen Hohlraum, in dem einfallendes Licht so oft reflektiert wird, dass es fast mit Sicherheit absorbiert wird. Körper mit einem Absorptionsvermögen $0 < \alpha < 1$, das jedoch (zumindest in einem gewissen Bereich) frequenzunabhängig ist, nennt man Graue Körper.

Für das Emissionsvermögen eines Schwarzen Körpers gilt das Plancksche Strahlungsgesetz:

$$\varepsilon_S(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_0 T}} - 1}$$

Es zeigt, dass für verschiedene Wellenlängen und verschiedene Temperaturen des Körpers die abgestrahlte Leistung unterschiedlich hoch ist. Insgesamt nimmt die über den gesamten Spektralbereich emittierte Leistung mit steigender Temperatur stark zu. Dies wird uns von dem Stefan-Boltzmann-Gesetz vor Augen geführt:

$$\frac{\Phi}{A} = \int_0^\infty \varepsilon_S(\lambda, T)\, d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{mit } \sigma = 5{,}6704 \cdot 10^{-8} \, \frac{W}{m^2 K^4}$$

Gleichzeitig verschiebt sich die Wellenlänge, unter der am meisten abgestrahlt wird, für höhere Temperaturen hin zu kleineren Wellenlängen, was vom Wienschen Verschiebungsgesetz beschrieben wird:

$$\lambda_{max} \cdot T = \text{konst.} = 2{,}8978 \cdot 10^{-3}\, m K$$

Dies erklärt beispielsweise, warum Metalle, wenn wir sie erhitzen, zunächst rot und bei höheren Temperaturen dann gelb glühen.

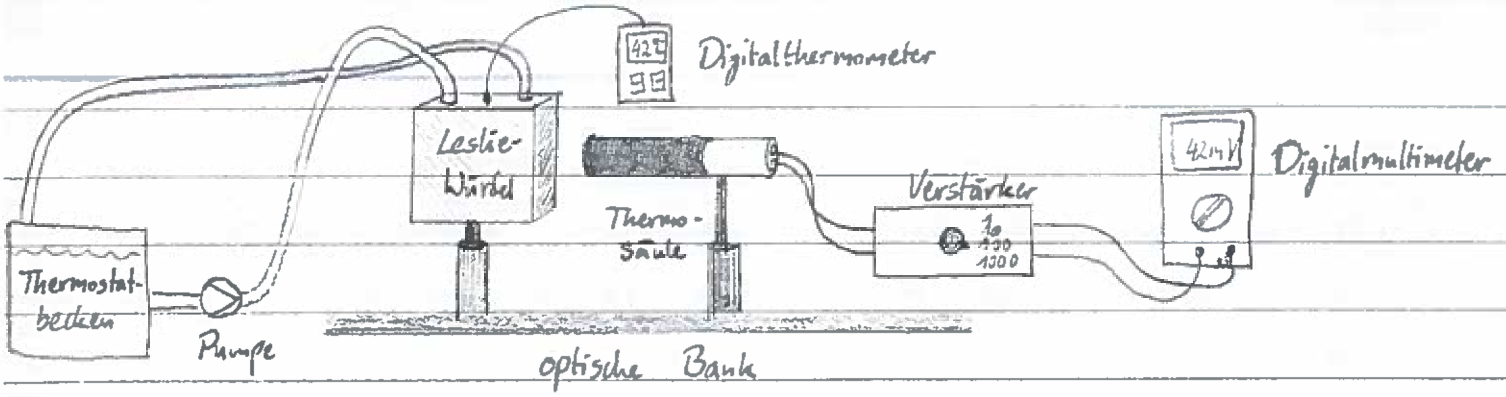
Das Plancksche Strahlungsgesetz enthält als Grenzfälle für sehr große und sehr kleine Wellenlängen die Strahlungsgesetze von Rayleigh und Jeans bzw. von Wien. Für letzteres macht man z.B. die Näherung, dass für kleine Wellenlängen $\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_0 T}} - 1} \approx e^{-\frac{hc}{\lambda k_0 T}}$ gilt.

Um im Versuch die Wärmestrahlung zu messen, benutzen wir eine Thermosäule. Dabei handelt es sich um mehrere in Reihe geschaltete Thermoelemente. Diese wiederum bestehen aus zwei Drähten unterschiedlicher Metalle, die am Messpunkt miteinander verbunden (i.d.R. verlötet oder verschweißt) sind. Durch den thermoelektrischen Effekt (Seebeck-Effekt) entsteht zwischen den Leitern eine Thermospannung, die in eine Temperaturdifferenz umgerechnet werden kann. Die Spannungen sind allerdings sehr klein und trotz der Hintereinanderschaltung der Thermoelemente in der Thermosäule müssen wir das Ausgangssignal noch verstärken, bevor wir es mit einem Digitalmultimeter messen können. ✓

5.) Durchführung und Auswertung:

372.a Bevor wir mit der Thermosäule Messwerte aufnehmen können, müssen wir zunächst herausfinden, nach welcher Zeit sie die Strahlung eines vor ihr stehenden Körpers vollständig registriert. Dazu gehen wir folgendermaßen vor: Wir verkabeln zunächst die Thermosäule mit dem Verstärker, den wir auf 100 stellen, und diesen wiederum mit dem Digitalmultimeter. Nun richten wir die Thermosäule auf eine Halogenlampe, schalten letztere ein und messen über 5 Minuten alle 10 Sekunden die angezeigte Spannung. Daraus ermitteln wir die Zeit, nach der die Spannung 90 % des Endwertes angenommen hat und setzen diese Zeit als sogenannte Ansprechzeit der Thermosäule fest. In unserem Fall waren dies 30 Sekunden. Alle Messwerte, die wir in den nachfolgenden Versuchsteilen mit der Thermosäule nehmen, lesen wir stets nach diesen 30 Sekunden ab.

372.b Wir wollen nun die Wärmestrahlung eines sogenannten Leslie-Würfels untersuchen. Dies ist ein metallischer Hohlwürfel, dessen vier vertikale Seitenflächen unterschiedlich beschaffen sind. Eine ist schwarz lackiert, eine andere weiß, wieder eine andere besteht aus mattiertem Metall und die letzte aus poliertem Metall. In dem Leslie-Würfel befindet sich Wasser, das über zwei Schläuche zu- und abfließen kann. Mit einem Thermostat-Becken kann das Wasser schrittweise erhitzt und mit einer Pumpe durch den Würfel geleitet werden. Wir stellen nun den Leslie-Würfel und die Thermosäule hintereinander auf die optische Bank und befestigen sie. Die Entfernung wählen wir dabei so, dass sich die Thermosäule so nah wie möglich am Würfel befindet, sich dieser jedoch noch ohne Probleme drehen lässt. Es ergibt sich folgender Aufbau:

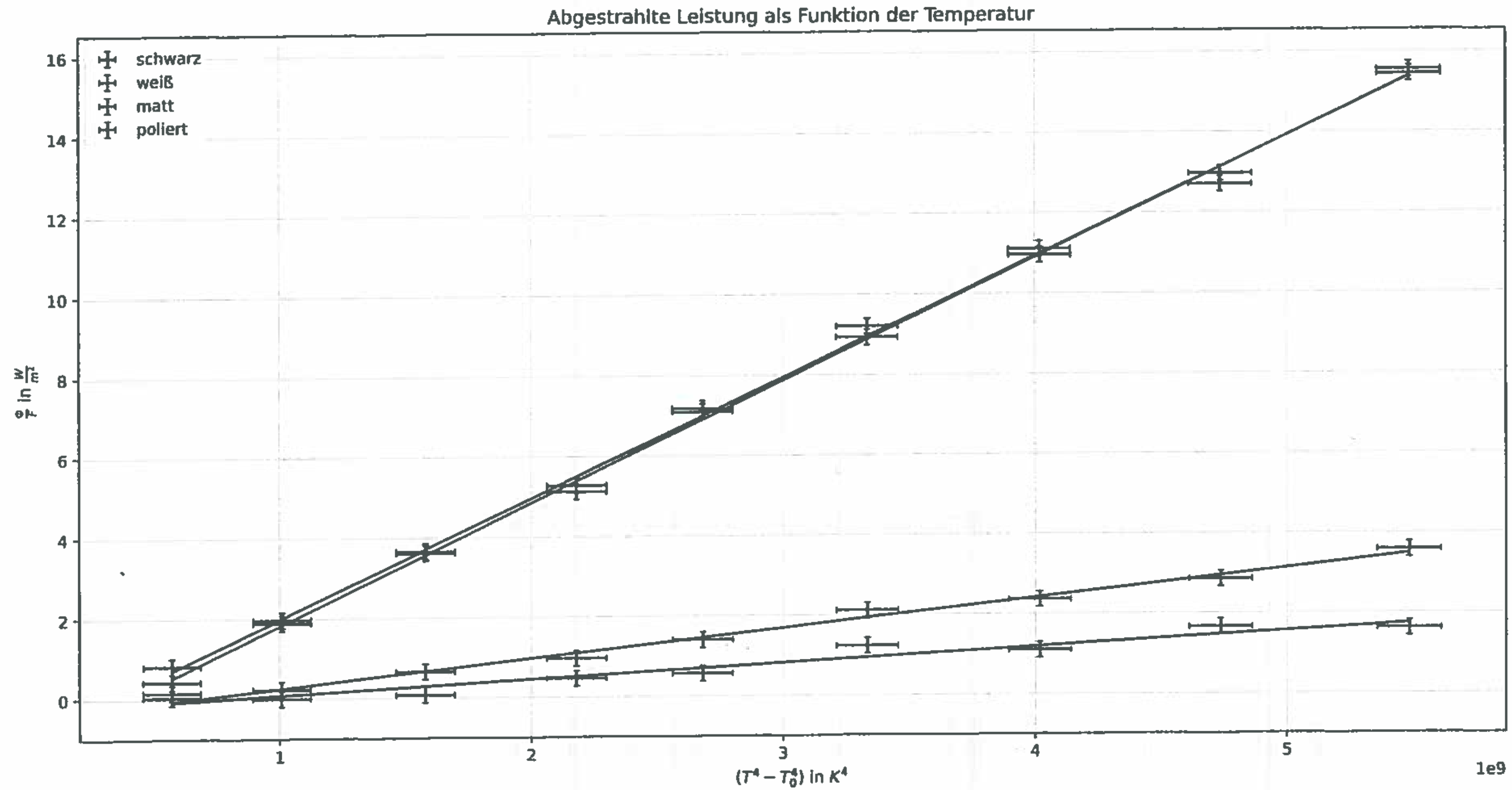


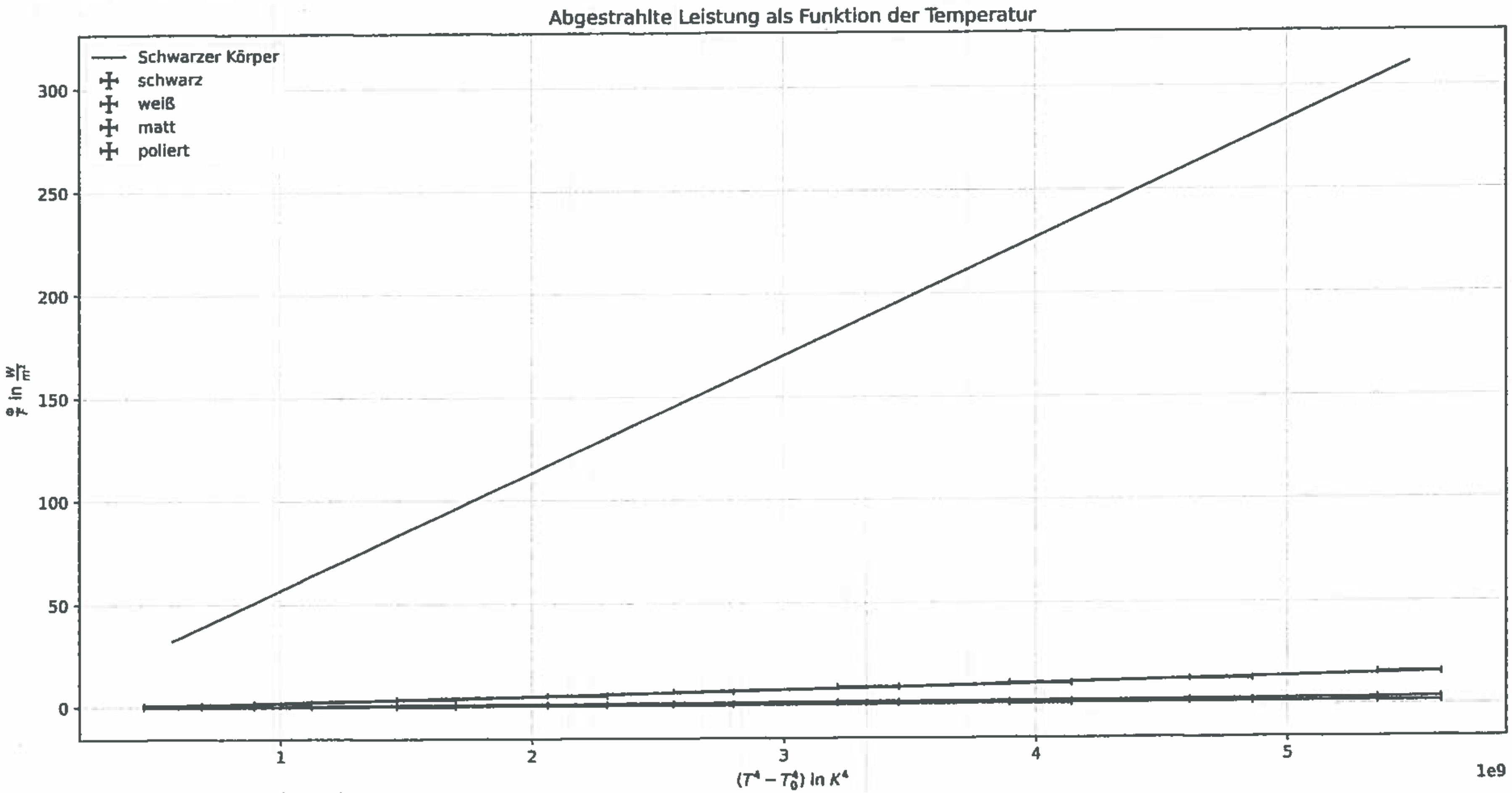
Nun erhöhen wir schrittweise die Wassertemperatur und messen für verschiedene Temperaturen mit der Thermosäule die Wärmestrahlung, die von jeder der Würfelseiten ausgeht.
Da sich die Umgebungstemperatur ständig um kleine Werte ändert, messen wir außerdem vor jeder Messreihe einmal die Offsetspannung U_0 der Thermosäule, indem wir sie um 180° vom warmen Würfel wegdrehen und sie mit einem Stück schwarzer Pappe abschirmen. Den Mittelwert der Offsetspannung vor einer Messreihe und der danach (= vor der nächsten Messreihe) ziehen wir später von den gemessenen Spannungen ab.
Wir wollen nun die abgestrahlte Leistung $\frac{\Phi}{A}$ über $T^4-T_0^4$ auftragen, um damit das um die Umgebungstemperatur T_0 korrigierte Stefan-Boltzmann-Gesetz (siehe 372.C) zu bestätigen und das Emissionsvermögen ε der Seitenflächen zu ermitteln. Mit dem Verstärkungsfaktor V und der Sensitivität S der Thermosäule gilt:

$$\frac{\Phi}{A} = \frac{U-U_0}{V \cdot S}$$

Da wir die Polung der Thermosäule in unserer Messung vertauscht und somit negative Spannungen gemessen haben, nehmen wir im Zähler $U-U_0$ noch den Betrag.
Die Umgebungstemperatur T_0 lag am Anfang der Messung bei 20°C und am Ende bei 21°C. Wir wählen T_0 für die Auftragung daher zu $(20{,}5 \pm 1{,}0)$°C.
Auf der folgenden Seite sind die berechneten abgestrahlten Leistungen für alle Seitenflächen dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde die Kurve für den idealen Schwarzen Körper in ein zusätzliches Diagramm gezeichnet.

T[K]	$(T^4-T_0^4)$[K^4]	$\Delta(T^4-T_0^4)$[K^4]	Φ/A[W/m^2] (s)	Φ/A[W/m^2] (w)	Φ/A[W/m^2] (m)	Φ/A[W/m^2] (p)	$\Delta(\Phi/A)$[W/m^2]
299.15	0.57e9	0.11e9	0.81	0.42	0.04	0.15	0.19
303.15	1.01e9	0.12e9	1.96	1.88	0.23	0.00	0.19
308.15	1.58e9	0.12e9	3.62	3.65	0.65	0.08	0.19
313.15	2.18e9	0.12e9	5.27	5.12	0.96	0.46	0.19
317.15	2.68e9	0.12e9	7.10	7.17	1.40	0.56	0.19
322.15	3.33e9	0.12e9	9.19	8.92	2.12	1.23	0.19
327.15	4.02e9	0.12e9	10.94	11.10	2.37	1.10	0.19
332.15	4.74e9	0.13e9	12.96	12.69	2.85	1.65	0.19
337.15	5.46e9	0.13e9	15.42	15.54	3.58	1.62	0.19





Abgestrahlte Leistung als Funktion der Temperatur
Schwarzer Körper
schwarz
weiß
matt
poliert
300
250
200
150
100
50
0
1
2
3
4
5
1e9
$(T^4 - T_0^4)$ in K^4

Für die Geradenfits gilt folgendes:

schwarz: $\frac{\Phi}{F} = (2{,}99 \pm 0{,}03) \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2 K^4} \cdot (T^4 - T_0^4) - (1{,}02 \pm 0{,}11) \frac{W}{m^2}$

weiß: $\frac{\Phi}{F} = (3{,}02 \pm 0{,}05) \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2 K^4} \cdot (T^4 - T_0^4) - (1{,}22 \pm 0{,}16) \frac{W}{m^2}$

matt: $\frac{\Phi}{F} = (7{,}2 \pm 0{,}2) \cdot 10^{-10} \frac{W}{m^2 K^4} \cdot (T^4 - T_0^4) - (0{,}48 \pm 0{,}08) \frac{W}{m^2}$

poliert: $\frac{\Phi}{F} = (3{,}7 \pm 0{,}4) \cdot 10^{-10} \frac{W}{m^2 K^4} \cdot (T^4 - T_0^4) - (0{,}29 \pm 0{,}14) \frac{W}{m^2}$

Insgesamt treffen die Geraden unsere Messwerte innerhalb des Fehlerbereichs recht gut. Man erkennt deutlich, dass die schwarz-lackierte und die weiß-lackierte Fläche am meisten abstrahlen, während die polierte Fläche selbst bei der höchsten Temperatur von 64°C noch weniger abstrahlt als die schwarze oder weiße bei 30°C. Auffällig ist, dass die Geraden nicht exakt durch den Ursprung laufen, wie man es nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz erwartet hätte. Der Grund dafür liegt wahrscheinlich in der womöglich zu ungenau bestimmten Offsetspannung, die sich außerdem aufgrund beispielsweise der Wärmestrahlung unserer Körper ständig ändert.
Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz $\frac{\Phi}{A} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4)$ können wir nun von der Geraden-Steigung auf den Emissionsgrad ε schließen, indem wir durch σ teilen. Wir finden:

$\varepsilon_s = 0{,}0526 \pm 0{,}0006$

$\varepsilon_w = 0{,}0533 \pm 0{,}0009$

$\varepsilon_m = 0{,}0127 \pm 0{,}0004$

$\varepsilon_p = 0{,}0065 \pm 0{,}0007$

Wir stellen also fest, dass scheinbar völlig unterschiedliche Oberflächen (schwarz und w[eiß]) annähernd denselben Emissionsgrad haben. Dies liegt daran, dass wir im Versuch [die] Emissionseigenschaften im Infrarot-Bereich untersucht haben und in diesem Wellenlängenbereich weisen die schwarze und weiße Oberfläche tatsächlich etwa die gleichen Eigenschaften auf, während dies im Sichtbaren offensichtlich nicht der Fall ist. Den kleinsten Emissionsgrad hat die polierte Metallfläche, was auf das große Reflexionsvermögen zurückzuführen ist. Denn wegen $\rho = 1 - \alpha$ muss dann das Absorptionsvermögen und nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz schließlich auch das Emissionsvermögen klein sein. Sehr schön!

372.c Wir wollen nun die abgestrahlte Leistung einer Halogenlampe und ihre Abhängigkeit
(I) vom Abstand r untersuchen. Dazu richten wir die Thermosäule direkt auf die Halogenlampe und legen an letztere Spannung und Strom so an, dass sie mit maximaler Leistung (etwa 50 W) abstrahlt. Nun variieren wir den Abstand zwischen Lampe und Thermosäule und notieren uns für jeden Abstand die angezeigte Spannung. Die Positionen x, die wir in den Messwerten aufgenommen haben, entsprechen dabei den Positionen der Optikreiterkanten auf der optischen Bank. Von dort haben wir nochmal den genauen Abstand zur Lampe und zum Detektor gemessen. Der Abstand r berechnet sich also folgendermaßen:

$$r = (x_0 - a) - (x + b) \qquad \text{(siehe Skizze im Messwerte-Teil)}$$

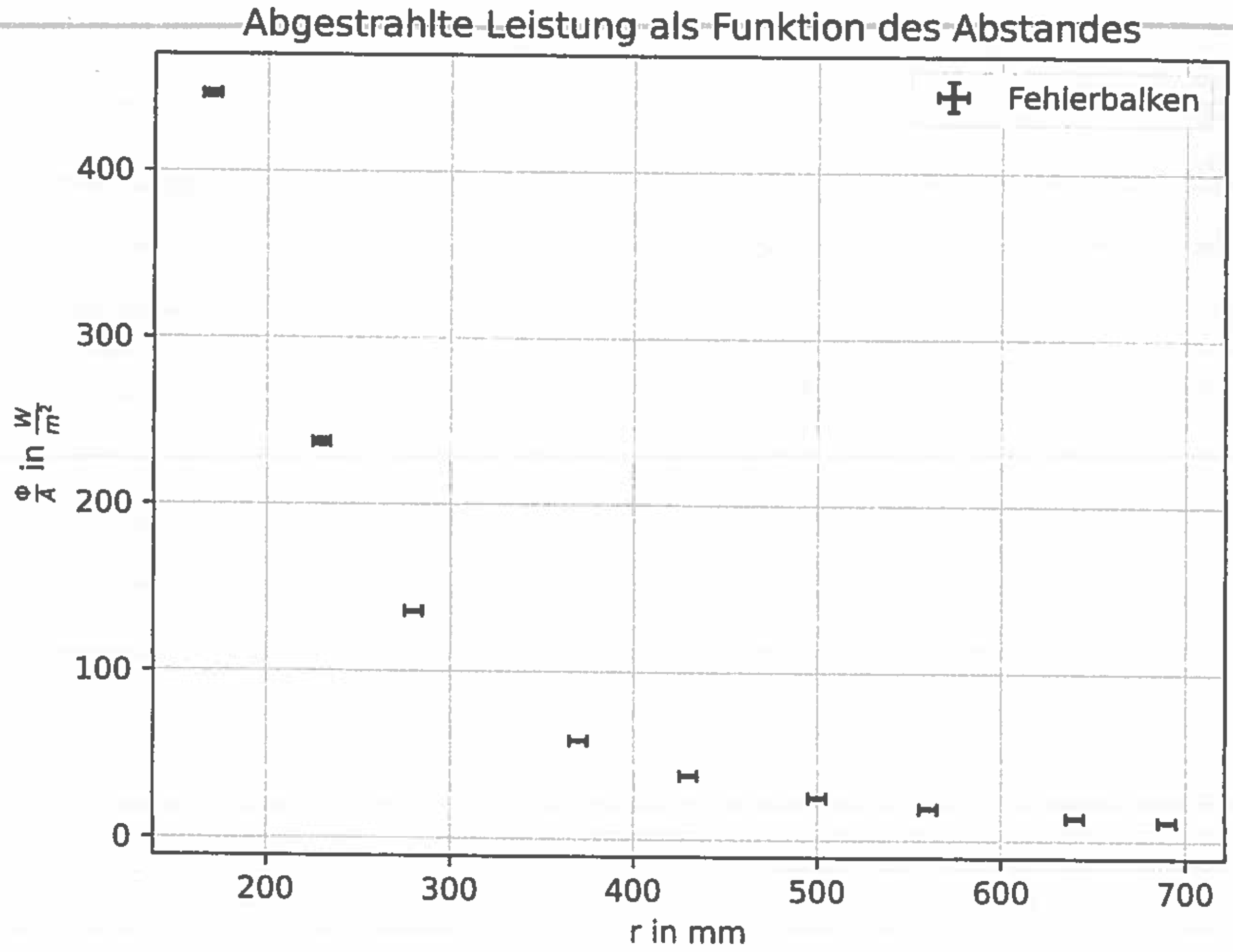
Die abgestrahlte Leistung $\frac{\Phi}{A}$ berechnen wir wieder über:

$$\frac{\Phi}{A} = \frac{|U - U_0|}{V \cdot S}$$

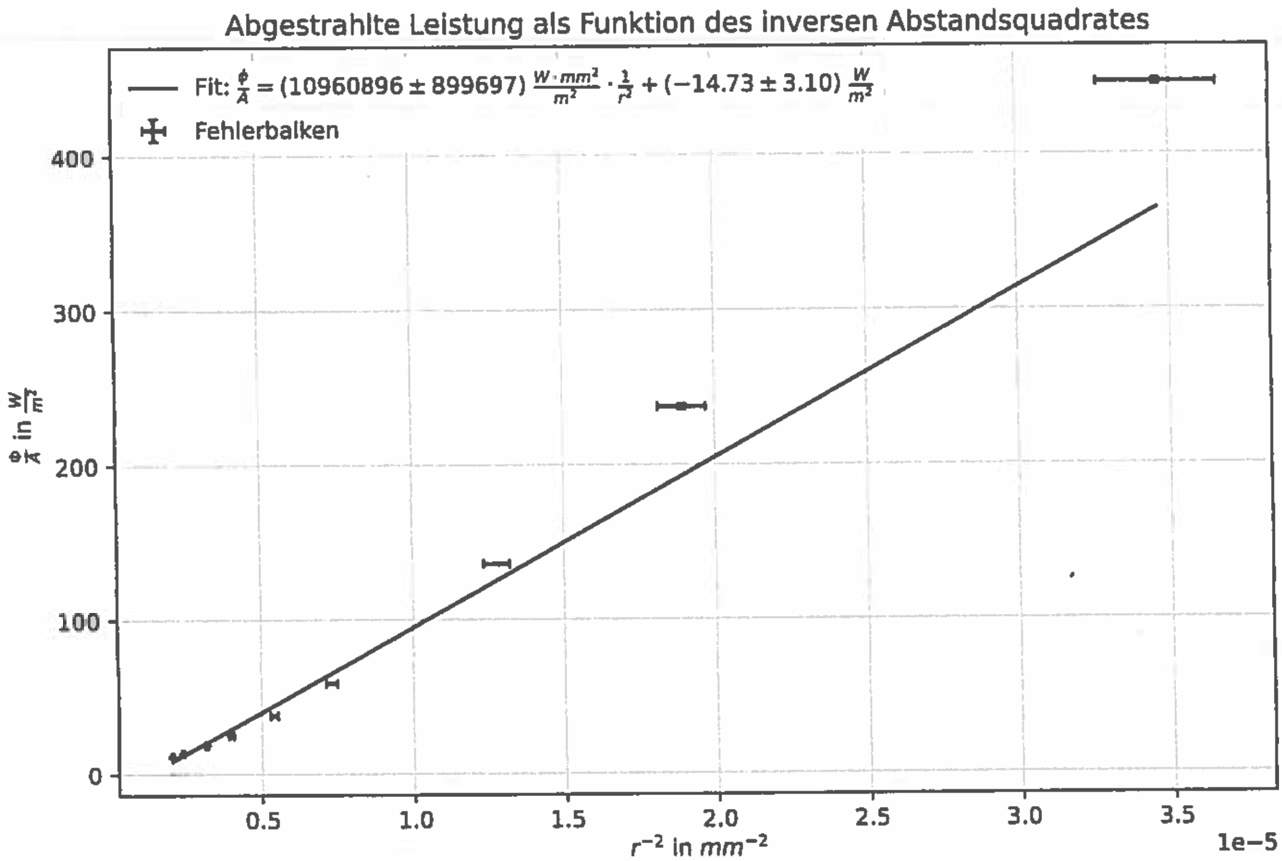
Die Offsetspannung U_0 nehmen wir im Folgenden als konstant an. Wir wählen $U_0 = 1{,}2\,mV$, den letzten in Aufgabe 372.b gemessenen Wert. Der Verstärkungsfaktor beträgt nach wie vor 100. Damit ergeben sich folgende Werte:

r[mm]	Δr[mm]	(Φ/A)[W/m²]	Δ(Φ/A)[W/m²]
170.0	4.8	446.23	1.92
230.0	4.8	237.38	1.92
280.0	4.8	135.96	0.38
370.0	4.8	58.69	0.38
430.0	4.8	38.12	0.38
500.0	4.8	25.35	0.08
560.0	4.8	19.04	0.08
640.0	4.8	13.73	0.08
690.0	4.8	11.42	0.08

Im Diagramm auf der folgenden Seite sind die Strahlungsleistungen über dem Abstand aufgetragen.



Anhand dieses Plots kann man vermuten, dass es sich um eine $\frac{1}{r^2}$- Abhängigkeit handelt.
schön
Tragen wir also $\frac{\Phi}{A}$ gegen $\frac{1}{r^2}$ auf, so erwarten wir eine Gerade:



Der Geradenfit bestätigt unsere Erwartungen nur mäßig. Zwar stimmt er für große Abstände (und damit kleine Werte von $\frac{1}{r^2}$) noch gut mit unseren Messwerten überein, doch für kleine Entfernungen zwischen Lampe und Thermosäule sind die tatsächlich gemessenen Strahlungsleistungen deutlich höher als sie nach dem $\frac{1}{r^2}$-Zusammenhang sein dürften. Für die Diskrepanz kann ich mir mehrere Gründe vorstellen: Zum einen kann es an der üblichen Ungenauigkeit liegen, die von der Wärmestrahlung unserer Körper und einer leicht schwankenden Umgebungstemperatur herrührt. Zum anderen könnte es auch daran liegen, dass die Thermosäule ja die Temperaturdifferenz zwischen Sensor und Gehäuse misst und sich das Gehäuse unmittelbar vor der Halogenlampe vermutlich ebenfalls erwärmt. gut

372.c (II) Im letzten Versuchsteil wollen wir noch den Emissionsgrad der Halogenlampe bestimmen. Dazu stellen wir die Thermosäule wieder in einem kleinen, festen Abstand vor die Lampe und messen die Thermospannung U, während wir am Netzgerät die an der Lampe anliegende Spannung sowie den sie durchfließenden Strom ändern. Ganz zu Anfang des Versuchs haben wir mit einem Digitalmultimeter den Widerstand R_0 der Lampe im kalten Zustand gemessen. Mit steigender Temperatur ändert sich der Widerstand folgendermaßen:

$$R \approx R_0 \left(1 + \alpha (T - T_0) + \beta (T - T_0)^2\right)$$

Da wir die Temperatur der Glühwendel nicht kennen, wohl aber den Widerstand R nach dem Ohmschen Gesetz ausrechnen können und auch die beiden Koeffizienten α und β bekannt sind, können wir die Formel nach T umstellen und zur Berechnung der Glühwendeltemperatur benutzen. Es gilt:

$$\frac{R}{R_0} = 1 + \alpha T - \alpha T_0 + \beta T^2 + \beta T_0^2 - 2\beta T T_0$$

$$\Leftrightarrow \frac{R}{R_0} = 1 + (\alpha - 2\beta T_0) T + \beta T^2 - \alpha T_0 + \beta T_0^2$$

$$\Leftrightarrow \beta T^2 + (\alpha - 2\beta T_0) T + \beta T_0^2 - \alpha T_0 - \frac{R}{R_0} + 1 = 0$$

$$\Leftrightarrow T^2 + \frac{\alpha - 2\beta T_0}{\beta} T + \frac{\beta T_0^2 - \alpha T_0 - \frac{R}{R_0} + 1}{\beta} = 0$$

$$\Rightarrow \quad T_{1,2} = -\frac{\alpha}{2\beta} + T_0 \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2\beta} - T_0\right)^2 - \frac{1}{\beta} + \frac{\alpha}{\beta}T_0 - T_0^2 + \frac{R}{\beta R_0}}$$

$$= -\frac{\alpha}{2\beta} + T_0 \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{4\beta^2} - \frac{1}{\beta} + \frac{R}{R_0\beta}}$$

Durch Ausprobieren findet man, dass nur die Lösung mit dem "+" ein positives und das physikalisch sinnvolles Ergebnis liefert.

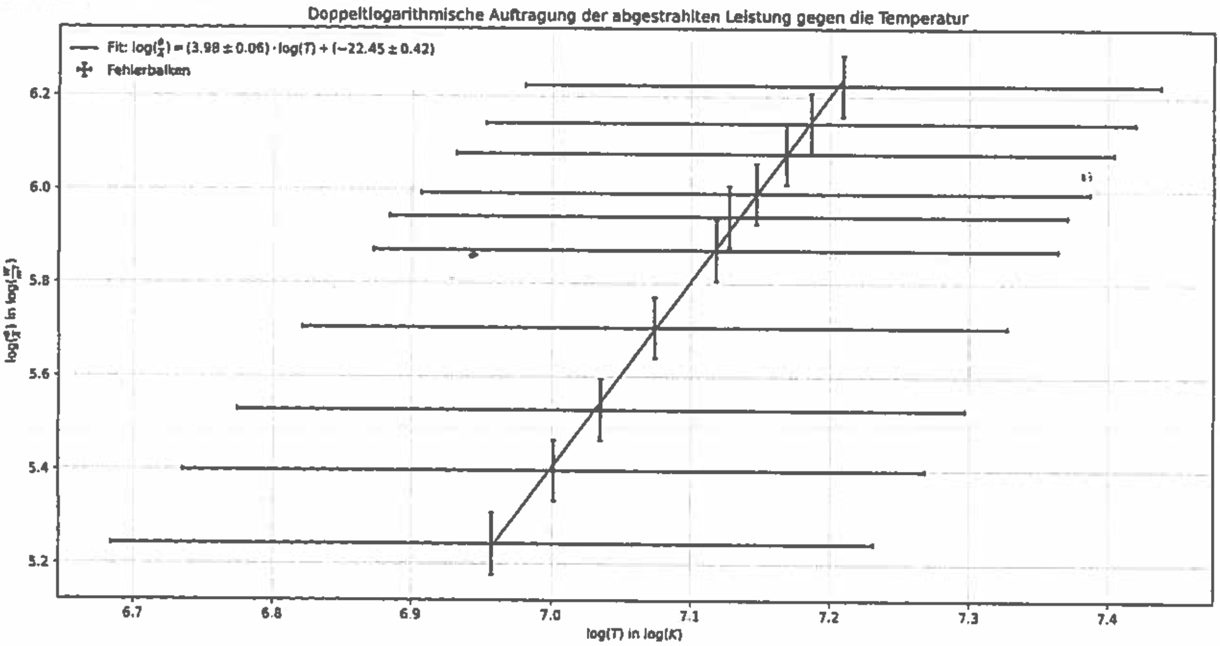
Nun berechnen wir anhand dieser Formel und den jeweiligen Widerständen $R_L = \frac{U_L}{I_L}$ die Temperaturen. Die abgestrahlte Leistung $\frac{\Phi}{A}$ berechnen wir wieder nach der mittlerweile bekannten Formel.

R[Ω]	ΔR[Ω]	T[K]	ΔT[K]	(Φ/A)[W/m²]	Δ(Φ/A)[W/m²]
2.74	0.02	1351.58	9.86	505.08	1.92
2.67	0.03	1321.22	10.34	465.46	1.92
2.61	0.03	1297.37	10.64	436.62	1.92
2.54	0.03	1269.63	11.04	400.85	1.92
2.48	0.03	1245.35	11.41	381.62	1.92
2.45	0.03	1233.87	11.68	355.08	1.92
2.32	0.03	1180.92	12.58	300.85	1.92
2.22	0.03	1135.70	13.64	252.38	1.92
2.13	0.03	1098.22	14.41	221.62	1.92
2.01	0.04	1050.52	15.45	189.54	1.92

Nun betrachten wir wieder das Stefan-Boltzmann-Gesetz. Wegen der hohen Temperatur der Glühwendel (> 927 K), beträgt die Abweichung bei Vernachlässigung der Umgebungstemperatur weniger als 1% (siehe 372 C). Logarithmieren wir die Gleichung (wir wählen den natürlich Logarithmus) so ergibt sich:

$$\frac{\Phi}{A} = \varepsilon\sigma T^4 \quad \Leftrightarrow \quad \lg\left(\frac{\Phi}{A}\right) = \lg\left(\varepsilon\sigma T^4\right) = 4\lg(T) + \lg(\varepsilon\sigma)$$

Wenn wir $\lg\left(\frac{\Phi}{A}\right)$ gegen $\lg(T)$ auftragen, erwarten wir also eine Gerade mit Steigung und einen y-Achsenabschnitt, aus dem wir den Emissonsgrad der Halogenlampe bestimmen können. Der folgende Plot zeigt unser Ergebnis:



Tatsächlich beträgt die Steigung ungefähr 4, was für die Richtigkeit des Ergebnisses spricht.
schön

Nun gilt: Literaturwert ≈ 0.2 − 0.3

$$\lg(\varepsilon\sigma) = (-22{,}45 \pm 0{,}42)$$

$$\Leftrightarrow \varepsilon = \frac{1}{\sigma} \cdot e^{(-22{,}45 \pm 0{,}42)} = 0{,}0032 \pm 0{,}0016$$

Einordnung? Diskussion? Fehlerquellen?

6.) Fazit Im Versuch 372 haben wir uns mit Wärmestrahlung auseinandergesetzt, die wir mithilfe einer Thermosäule messen konnten. Am Beispiel des Leslie-Würfels haben wir gelernt, dass die Strahlung, die ein Körper emittiert, von seiner Oberflächenbeschaffenheit abhängt und dass Flächen, die im Sichtbaren scheinbar völlig unterschiedlich sind, in anderen Wellenlängenbereichen gleiche Emissionseigenschaften haben können. Bei der Untersuchung der Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Entfernung zum strahlenden Objekt haben wir festgestellt, dass es sich dabei annähernd um einen $1/r^2$-Zusammenhang handelt.
Im letzten Versuchsteil haben wir den Emissionsgrad einer Halogenlampe zu $\varepsilon = 0{,}0032 \pm 0{,}0016$ bestimmt. Dieser Wert kommt mir relativ klein vor. Da ich jedoch keine Vergleichswerte gefunden habe, kann ich ihn nicht wirklich einordnen oder bewerten. Was ist mit der Bestätigung des S-B-Gesetzes?

Sehr schön! Bestanden 16.03.22 [redacted]