
Atomphysik

Gruppe B14

Daniel Wendland

Philipp Bremer

Olexiy Fedorets

Jonathan Hermann

22. September 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theorie	1
3	Versuchsaufbau	3
4	Versuchsdurchführung	4
4.1	Kalibration	4
4.2	Messung	4
5	Auswertung	5
5.1	Kalibration	5
5.2	Lineare Regression an T^4	7
5.3	Bestimmung der Emissionskoeffizienten	8
5.4	Fit an T^x	9
6	Fazit	11
7	Anhang	12

1 Einleitung

In diesem Versuch soll durch Vermessung der sogenannten Wärmestrahlung eines Lesliewürfels das *Stefan-Boltzmann-Gesetz* überprüft werden.

$$P = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

Des weiteren soll herausgefunden werden welche Seite am ehesten einem schwarzen Strahler entspricht, dazu werden zunächst die Theorie und der Aufbau des Experiments betrachtet und dann auf die Auswertung eingegangen.

2 Theorie

Ein schwarzer Körper zeichnet sich dadurch aus, dass er jede Strahlung komplett absorbiert, also ist sein Absorptionskoeffizient $\alpha = 1$. Aus dem Kirchhoffschen Gesetz $\frac{E_\lambda(\lambda, T)}{\alpha_\lambda(\lambda, T)} = f(\lambda, T)$ folgt damit für das Emissionsvermögen eines schwarzen Körpers $E_{\lambda, s}(\lambda, T) = f(\lambda, T)$. Darüber lässt sich nun das Emissionsvermögen eines grauen Körper durch das Produkt aus Emissionskoeffizient und Emissionsvermögen eines schwarzen Körpers darstellen, also

$$E_\lambda(\lambda, T) = \epsilon_\lambda(\lambda, T) \cdot E_{\lambda, s}(\lambda, T) \quad (2)$$

So folgt sofort $\frac{\alpha_\lambda(\lambda, T)}{\epsilon_\lambda(\lambda, T)} = 1$. Dieser Zusammenhang erlaubt es Aussagen über Ähnlichkeiten zu schwarzen Körpern zu treffen in dem nur der Emissionskoeffizient betrachtet wird.

Nach Max Planck gilt für das Emissionsvermögen, in den Halbraum, eines schwarzen Strahlers das *Plancksche Strahlungsgesetz*

$$E_{\lambda, s} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1} \quad (3)$$

Dabei bezeichnet T die Temperatur des Körpers und k die Boltzmann-Konstante $k = 1,3806488 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$. Betrachtet man nun die Einheit des Emissionsvermögens fällt auf das gilt $[E_{\lambda, s}] = \frac{W}{m^3}$. Demnach ist das Emissionsvermögen eine Leistungsdichte. Aus dem *Planckschen Strahlungsgesetz* lassen sich zwei Dinge folgern:

1. Durch nullsetzen der Ableitung nach λ , also lösen des Extremwertproblems, ergibt sich das *Wiensche-Verschiebungsgesetz*

$$\lambda_{max} \cdot T = b = const. = 2898 \mu m K \quad (4)$$

2. Des weiteren folgt durch Integration über alle Wellenlängen, oder alternativ über die Frequenzen, das *Stefan-Boltzmann-Gesetz*. Dies ist für graue Körper

$$E_s(T) = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{mit} \quad \sigma = \frac{2\pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot h^3 \cdot c^2} = 5.670373 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \quad (5)$$

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz gilt mit $\epsilon = 1$, also idealem Emissionsfaktor, auch für schwarze Körper. Da unsere Messung mit der Thermosäule nach Moll durchgeführt wird, werden nur Leistungsdifferenzen gemessen. Deswegen ist also $E_s(T) = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4)$ zu betrachten mit der Raumtemperatur T_0 .

Aufgrund der Integration über λ gilt jetzt $[E_s(T)] = \frac{W}{m^2}$. Daraus folgt

$$P_{ideal} = A_{sender} \cdot \frac{A_{empf.}}{\pi r^2} \cdot \sigma \cdot (T_{messung}^4 - T_0^4) \quad (6)$$

Dabei bezeichnet A_{sender} die betrachtete Fläche des Strahlers, und $\frac{A_{empf.}}{\pi r^2}$ den Anteil des Raumwinkel am gesamten Halbraum, den der Empfänger einnimmt.

Um nun Aussagen über den Emissionskoeffizienten zu treffen betrachten wir in diesem Versuch den Quotient

$$\frac{U_{gemessen} \cdot v}{c} \cdot \frac{1}{A_{sender} \cdot \frac{A_{empf.}}{\pi r^2} \cdot \sigma \cdot (T_{messung}^4 - T_0^4)} = \frac{P_{gemessen}}{P_{ideal}} = \frac{\epsilon \cdot \sigma \cdot T^4}{\sigma \cdot T^4} = \epsilon \quad (7)$$

Dabei gelten die Einzelformeln links für den von uns betrachteten Bereich und die Formeln rechts für die gesamte Leistung, da jedoch Quotienten behandelt werden sind die Ausdrücke dennoch äquivalent. Hier bezeichnet c den Umrechnungsfaktor jeder Thermosäule (Tabelle 1), und $v = 10^{-4}$ den Verstärkungsfaktor.

3 Versuchsaufbau

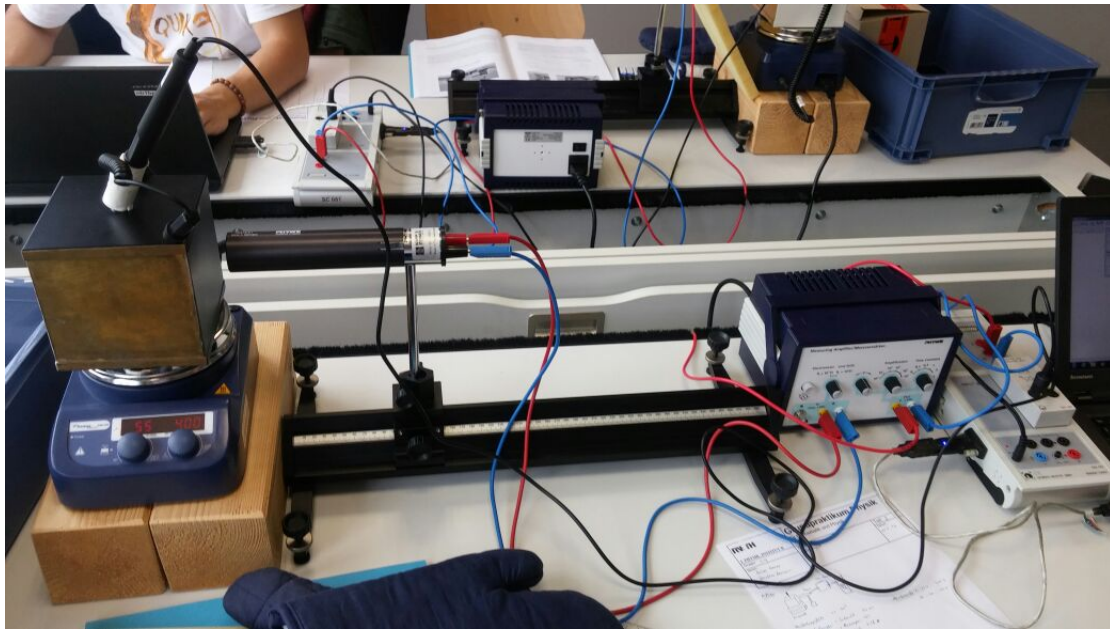


Abbildung 1: Versuchsaufbau

Der Aufbau des Versuchs besteht aus einem mit Wasser gefülltem Leslie-Würfel, welcher auf einer Heizplatte erhitzt wird. Der Würfel hat vier Seiten welche alle unterschiedlich beschichtet sind. Es gibt eine verspiegelte, eine weiße, eine schwarze und eine mit Messing beschichtete Seite. In dem Lesliewürfel befindet sich ein Rührfisch, welcher von einem Magneten in der Heizplatte rotiert wird, um das warme Wasser zu verteilen und damit eine gleichmäßige Erwärmung zu gewährleisten. Durch Löcher im Deckel des Würfels werden zwei Thermometer gesteckt. Das erste Thermometer liefert die Temperatur an die Heizplatte, welche grob die Temperatur des Würfels auf den eingestellten Wert bringen bzw. halten kann. Das zweite Thermometer liefert die Temperatur an die Temperaturbox des Cassys um eine genaue Temperaturmessung des Würfels zu realisieren. Vor allem bei dem zweiten Thermometer wurde darauf geachtet, dass dieses weder den Boden noch die Wände des Würfels berührt um die genaue Temperatur des Wassers zu bestimmen.

Vor dem Würfel befindet sich außerdem eine Thermosäule nach Moll. Bei dieser wurde vorher das Schutzglas entfernt und ein Schutzrohr befestigt. Die Thermosäule wird mit wenigen Zentimetern Abstand vor einer Seite des Würfels fest eingespannt. Als grobe Orientierung des Abstandes dient die Dicke einer Schaumstoffmatte, welche zwischen den Versuchen ebenfalls als Abschirmung der Wärmestrahlung des Würfels genutzt wird, damit sich die Thermosäule nicht über die Raumtemperatur aufheizt. Damit dies nicht geschieht wird die Säule selbst nicht angefasst um sie der Körperwärme nicht auszusetzen.

Die Thermosäule liefert zunächst eine Spannung an einen Messverstärker, welcher das Spannungssignal mit einem Faktor von 10^4 verstärkt und die Spannung dann weiter an das Sensor-Cassy gibt.

Temperatur im Würfel sowie die Spannung der Thermosäule können nun durch das Cassy ermittelt werden.

4 Versuchsdurchführung

Die Thermosäule misst die Differenz der einfallenden Strahlungsleistung vom Würfel zur Strahlungsleistung durch die Umgebungstemperatur. Diese wird dann bis auf einen Konstanten Faktor, welcher für beide Gruppen (unterschiedliche Thermosäulen) unterschiedlich ist, als Spannungssignal ans Cassy weitergeleitet.

4.1 Kalibration

Um zu gewährleisten, dass das Spannungssignal wirklich die Leistung der Umgebungstemperatur als Referenzpunkt hat, wird die Säule auf eine Wand gerichtet und das Spannungssignal durch Offset-Einstellungen am Spannungsverstärker auf 0V gesetzt.

$$P_{\text{gemessen}} = \frac{U_{\text{gemessen}} \cdot v}{c} \quad P_{\text{theoretisch}} = A_e \cdot \frac{\Omega}{\pi} \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \quad (8)$$

Wobei der Verstärkungsvorfaktor $v = 10^{-4}$ beträgt. Die Konstanten c sind in Tabelle 1 dargestellt.

	Seriennummer	Empfindlichkeit
Gruppe 1	120631	$c_1 = (0.160 \pm 0.0048) \frac{V}{W}$
Gruppe 2	130815	$c_2 = (0.221 \pm 0.0066) \frac{V}{W}$

Tabelle 1: Empfindlichkeiten der verwendeten Thermosäulen

Weiterhin wird eine Rauschmessung der Umgebungstemperatur sowie von Eiswasser und später siedendem Wasser durchgeführt. Die Rauschmessung der Umgebungstemperatur wird am Ende der folgenden Versuchsreihe wiederholt um sicher zu gehen, dass die Umgebungstemperatur konstant geblieben ist. Die Messungen bei $0^\circ C$ bzw. $100^\circ C$ werden zur Temperaturkalibrierung des Thermometers benötigt.

4.2 Messung

Zu Beginn der Versuchsreihe wird der Würfel auf $50^\circ C$ aufgeheizt. Nun wird für jede Seite des Würfels eine Messung von circa 6 Sekunden durchgeführt, welche 125 Messwerte für Temperatur im Würfel und Spannung an der Thermosäule aufnimmt. Wurde dies für alle 4 verschiedenen Seiten durchgeführt, erhitzt man den Würfel um $5^\circ C$ und wiederholt die 4 Messungen. Dieser Vorgang wird bis zur einer Endtemperatur von $95^\circ C$ wiederholt. Die genauen Einstellungen bei den Messungen mit dem Sensor-Cassy sind in Tabelle 2 dargestellt.

Messintervall	Messwertanzahl	Messzeit	Spannungsmessbereich
50ms	125	6.25s	-10V... + 10V

Tabelle 2: Einstellungen am Cassy

Der Spannungsmessbereich wurde nur bei der Gruppe 2 bei der schwarzen und weißen Seite des Würfels ab $70^\circ C$ auf $-30V$ bis $30V$ erhöht, wobei für $70^\circ C$ und $75^\circ C$ beide Bereichswerte gemessen wurden um zu überprüfen welche Auswirkung die Änderung des Spannungsmessbereich auf die Werte hat.

5 Auswertung

5.1 Kalibration

Zunächst wurde die Kalibrierung der Temperatur durchgeführt. Aus den beiden Rauschmessungen erhalten Mittelwerte, dargestellt in Tabelle 3.

Gruppe1	$T_{100^\circ} = (371.079 \pm 0.006)K$	$T_{0^\circ} = (274.453 \pm 0.009)K$
Gruppe2	$T_{100^\circ} = (370.936 \pm 0.011)K$	$T_{0^\circ} = (274.672 \pm 0.06)K$

Tabelle 3: Kalibrationsmessungen (gemittelt) beider Gruppen

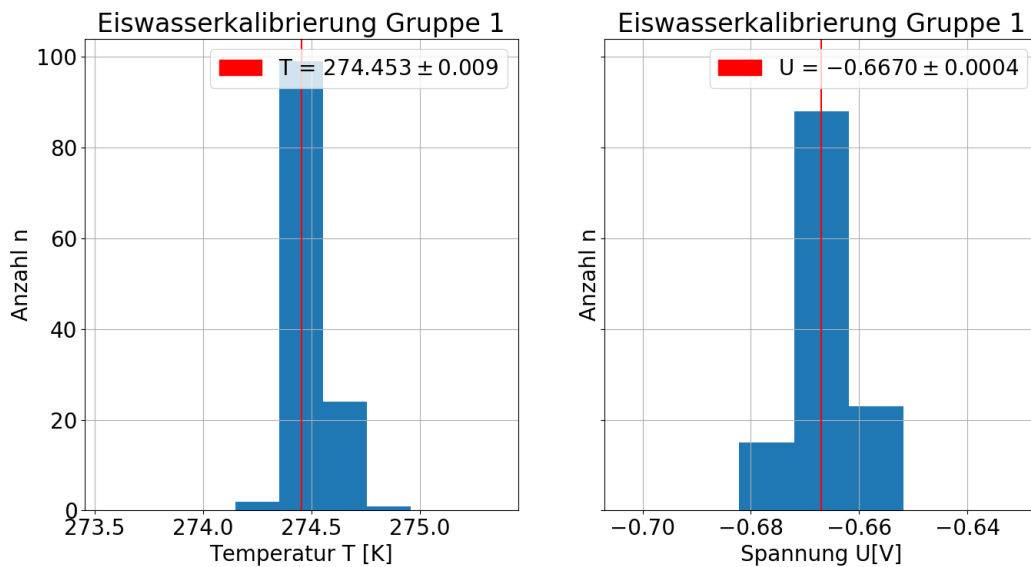


Abbildung 2: Gruppe 1 Eiswassermessung

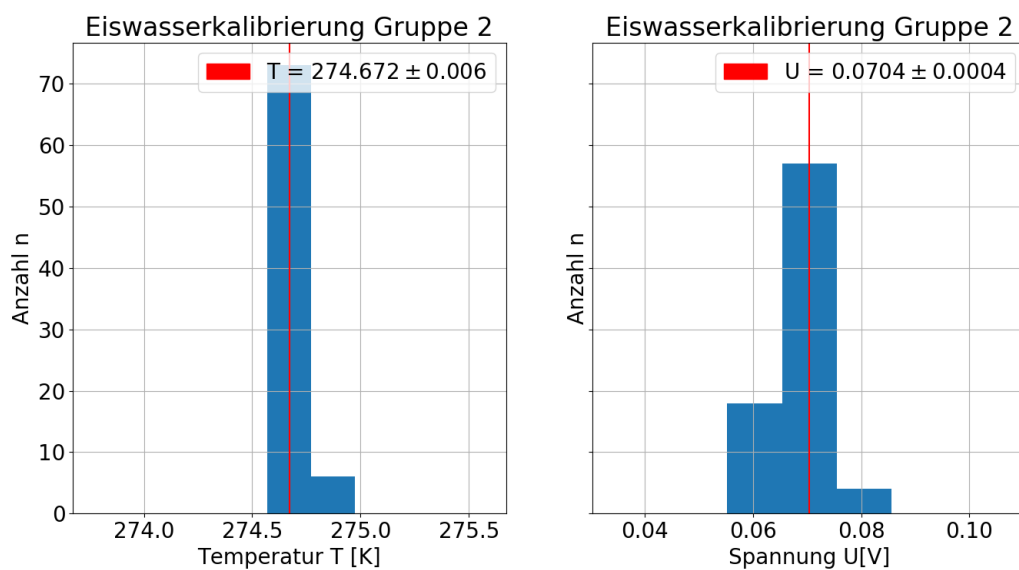


Abbildung 3: Gruppe 2 Eiswassermessung

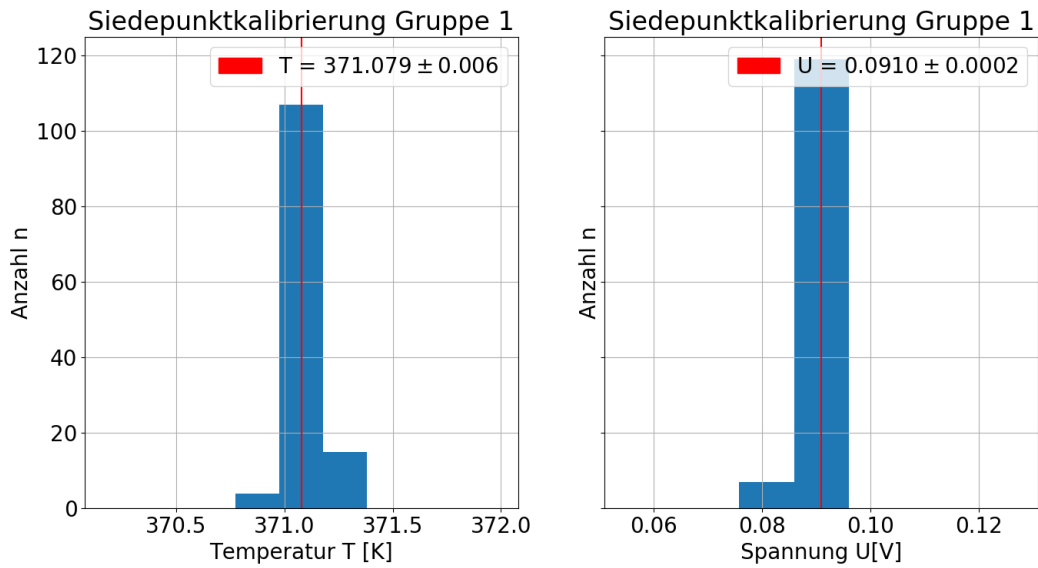


Abbildung 4: Gruppe 1 Siedemessung

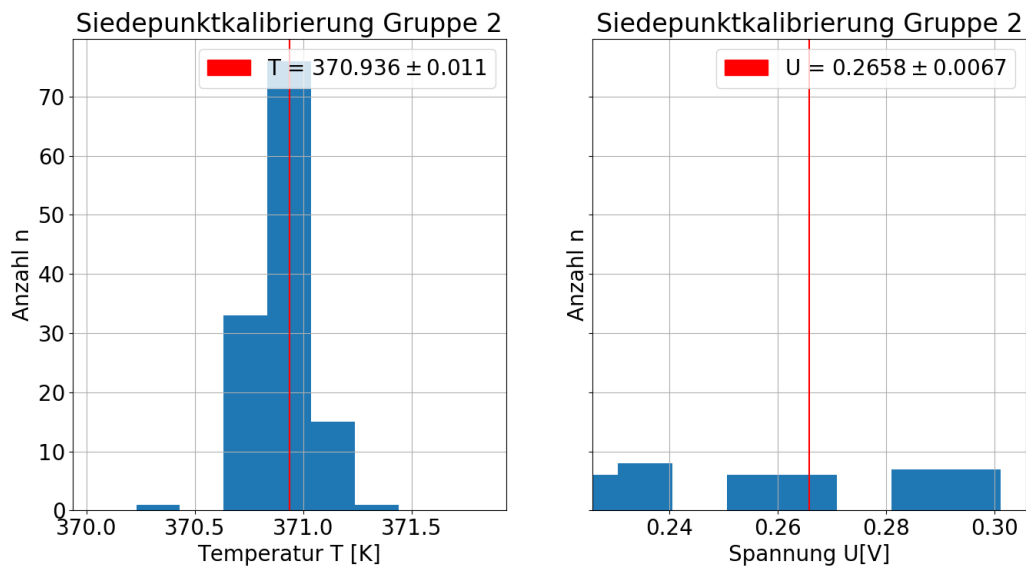


Abbildung 5: Gruppe 2 Siedemessung

Um mit Hilfe der Kalibration die realen Temperaturen aus den Gemessenen zu berechnen definieren wir

$$T_{real} = m \cdot T_{gemessen} + n$$

$$m = \frac{273.15K}{T_{100^\circ} - T_{0^\circ}} \quad n = 273.15K - m \cdot T_{0^\circ}$$

Mit dieser Formel wurden nun alle Messwerte der anderen Messungen kalibriert und die Auswertung mit T_{real} weitergeführt.

Gruppe 1	$m = 1.035$	$n = -10.89K$
Gruppe 2	$m = 1.039$	$n = -12.181K$

Tabelle 4: Kalibrationsergebnisse für $T_{real} = m \cdot T_{gemessen} + b$

Die kalibrierten Werte für die Raumtemperatur T_0 sind in Tabelle 5 dargestellt.

Gruppe 1	Gruppe 2
$T_0 = (297.501 \pm 0.005)K$	$T_0 = (298.053 \pm 0.006)K$

Tabelle 5: Kalibrationsergebnisse für Raumtemperatur T_0

5.2 Lineare Regression an T^4

Nun wird eine lineare Regression der Spannung $U(T)$ über $T^4 - T_0^4$ für jede Seite beider Würfel durchgeführt.

$$U(T) = a \cdot (T^4 - T_0^4) + b \quad (9)$$

Dafür werden Mittelwerte und Standardabweichung von U , T und T_0 aus den 125 kalibrierten Messwerten jeder Messung berechnet und für die lineare Regression verwendet. Da wir also Fehler auf x und y Werte haben, benutzen wir die zur Verfügung gestellte Praktikumsroutine `linear_regression_xy()`. Die Fehler auf die x Werte berechnen sich wie folgt:

$$x = T^4 - T_0^4 \quad \sigma_x = \sqrt{(4 \cdot T^3 \cdot \sigma_T)^2 + (4 \cdot T_0^3 \cdot \sigma_{T_0})^2} \quad (10)$$

Aus der linearen Regression bekommen wir Werte und Fehler für a und b für jede Seite 6. Beispielhaft ist das Ergebnis der linearen Regression für die weiße Seite des Leslie-Würfels bei Gruppe in Abbildung 6 dargestellt.

Seite	Gruppe 1	Gruppe 2
Schwarz	$a = (0.895 \pm 0.008) \cdot 10^{-9} \frac{V}{K^4}$ $b = (-0.21 \pm 0.06)V$ $\frac{\chi^2}{ndof} = 126$	$a = (1.373 \pm 0.017) \cdot 10^{-9} \frac{V}{K^4}$ $b = (0.03 \pm 0.11)V$ $\frac{\chi^2}{ndof} = 317$
Weiß	$a = (0.856 \pm 0.006) \cdot 10^{-9} \frac{V}{K^4}$ $b = (-0.06 \pm 0.04)V$ $\frac{\chi^2}{ndof} = 78$	$a = (1.318 \pm 0.023) \cdot 10^{-9} \frac{V}{K^4}$ $b = (0.15 \pm 0.15)V$ $\frac{\chi^2}{ndof} = 525$
Messing	$a = (0.062 \pm 0.005) \cdot 10^{-9} \frac{V}{K^4}$ $b = (0.05 \pm 0.03)V$ $\frac{\chi^2}{ndof} = 2714$	$a = (0.097 \pm 0.003) \cdot 10^{-9} \frac{V}{K^4}$ $b = (0.149 \pm 0.023)V$ $\frac{\chi^2}{ndof} = 2626$
Spiegel	$a = (0.0396 \pm 0.0018) \cdot 10^{-9} \frac{V}{K^4}$ $b = (0.105 \pm 0.011)V$ $\frac{\chi^2}{ndof} = 842$	$a = (0.061 \pm 0.003) \cdot 10^{-9} \frac{V}{K^4}$ $b = (0.132 \pm 0.025)V$ $\frac{\chi^2}{ndof} = 5190$

Tabelle 6: Ergebnisse der linearen Regression

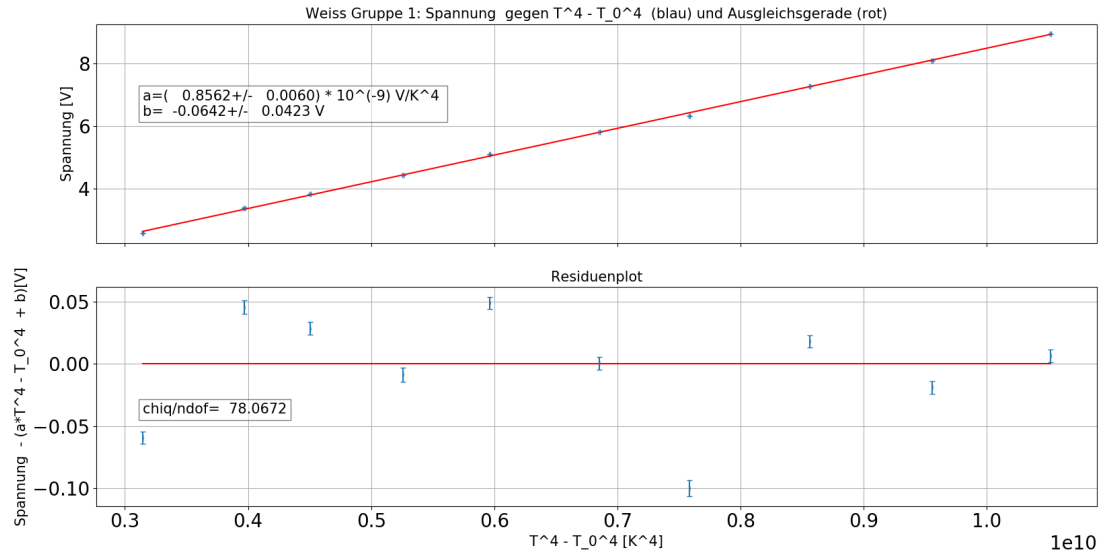


Abbildung 6: lineare Regression der Gruppe 1, weiße Seite

5.3 Bestimmung der Emissionskoeffizienten

Wir können mit den im Theorieteil hergeleiteten Formeln 7 nun die Emissionskoeffizienten einer Seite leicht aus der Steigung bestimmen.

$$\epsilon = \frac{\frac{U \cdot v}{c}}{P_{ideal}} = a \cdot \frac{\pi \cdot r^2 \cdot v}{A_s \cdot A_e \cdot \sigma \cdot c} \quad (11)$$

Die Fehler auf den Emissionskoeffizient ergeben sich aus:

$$\sigma_{\epsilon, stat} = \frac{vr^2\pi}{A_s A_e \sigma c} \cdot \sigma_a \quad \sigma_{\epsilon, sys} = \frac{avr^2\pi}{A_s A_e \sigma c^2} \cdot \sigma_c \quad (12)$$

Daraus berechnen sich die in Tabelle 7 durch $\epsilon \pm \sigma_{stat} \pm \sigma_{sys}$ dargestellten Ergebnisse.

Seite	Gruppe 1	Gruppe 2
Schwarz	$\epsilon = 0.905 \pm 0.008 \pm 0.027$	$\epsilon = 1.004 \pm 0.012 \pm 0.03$
Weiß	$\epsilon = 0.865 \pm 0.006 \pm 0.03$	$\epsilon = 0.964 \pm 0.016 \pm 0.029$
Messing	$\epsilon = 0.0627 \pm 0.0048 \pm 0.0019$	$\epsilon = 0.0706 \pm 0.0023 \pm 0.0021$
Spiegel	$\epsilon = 0.0400 \pm 0.0018 \pm 0.0012$	$\epsilon = 0.0449 \pm 0.0024 \pm 0.0013$

Tabelle 7: Ergebnisse für ϵ mit statistischen und systematischen Fehlern

Um die Ergebnisse der beiden Gruppen besser vergleichen zu können werden die Quotienten der Emissionskoeffizienten zur jeweiligen schwarzen Seite gebildet.

$$\epsilon_{rel} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{Schwarz}} \quad \sigma_{\epsilon_{rel}} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_{Schwarz}^2} \cdot \sigma_{\epsilon, Schwarz}\right)^2 + \left(\frac{1}{\epsilon_{Schwarz}} \cdot \sigma_{\epsilon, i}\right)^2} \quad (13)$$

Daraus folgen folgende Relativwerte in Tabelle 8.

Relativwerte zu Schwarz von	Gruppe 1	Gruppe 2
Weiß	$\epsilon_{rel} = 0.956 \pm 0.011 \pm 0.041$	$\epsilon_{rel} = 0.960 \pm 0.02 \pm 0.04$
Messing	$\epsilon_{rel} = 0.069 \pm 0.009 \pm 0.030$	$\epsilon_{rel} = 0.070 \pm 0.012 \pm 0.030$
Spiegel	$\epsilon_{rel} = 0.044 \pm 0.009 \pm 0.030$	$\epsilon_{rel} = 0.045 \pm 0.012 \pm 0.030$

Tabelle 8: Relativwerte der Emissionskoeffizienten

5.4 Fit an T^x

Zum Schluss wird noch ein weiterer Fit gemacht, durch den die 4-ter Potenz der Temperatur im *Stefan-Boltzmann Gesetz* 1 überprüft werden soll. Dafür fitten wir U an T^{p_2} mit den Fitparametern p_0, p_1 und p_2 .

$$U(T) = p_0 + p_1 \cdot T^{p_2} \quad (14)$$

Hierbei ist die Referenz zu T_0 in dem Parameter p_0 einbezogen. Für den Fit benutzen wir die Funktion `scipy.optimize.curvefit()`, welche ohne Fehler arbeitet¹. Dabei wurden die Anfangswerte zu p_0 und p_1 aus den vorher bestimmten Steigungen und Achsenabschnitten der linearen Regressionen gewählt.

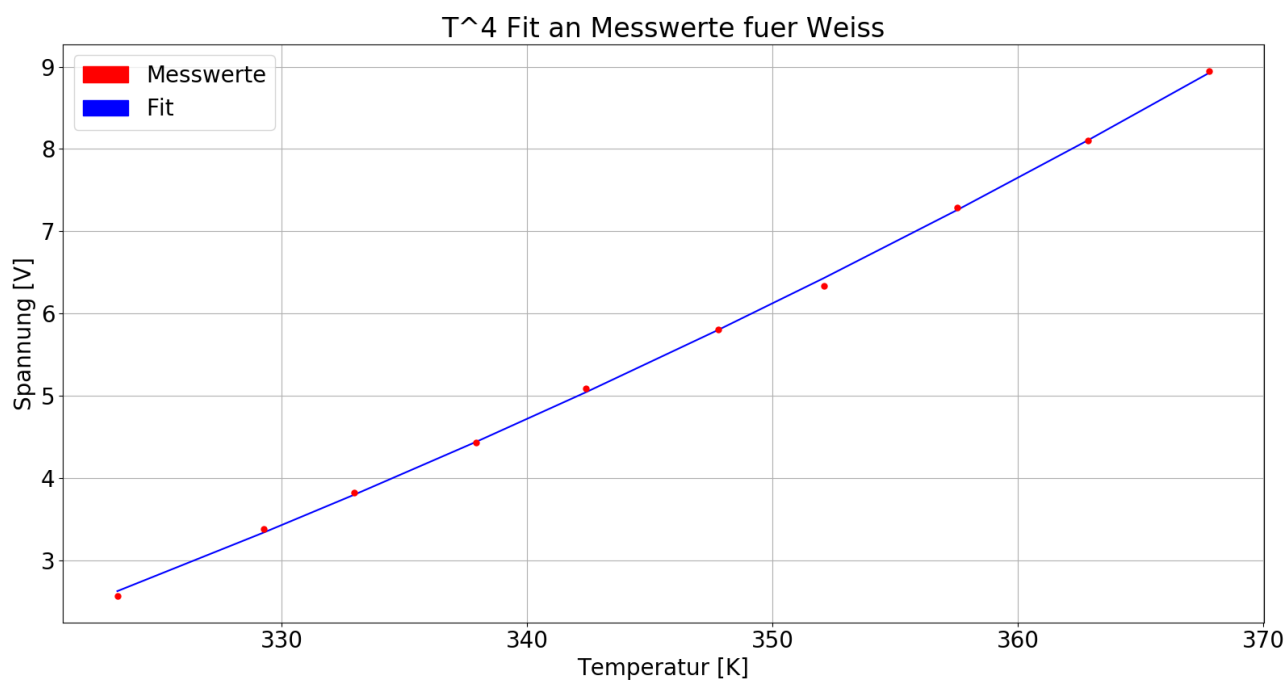
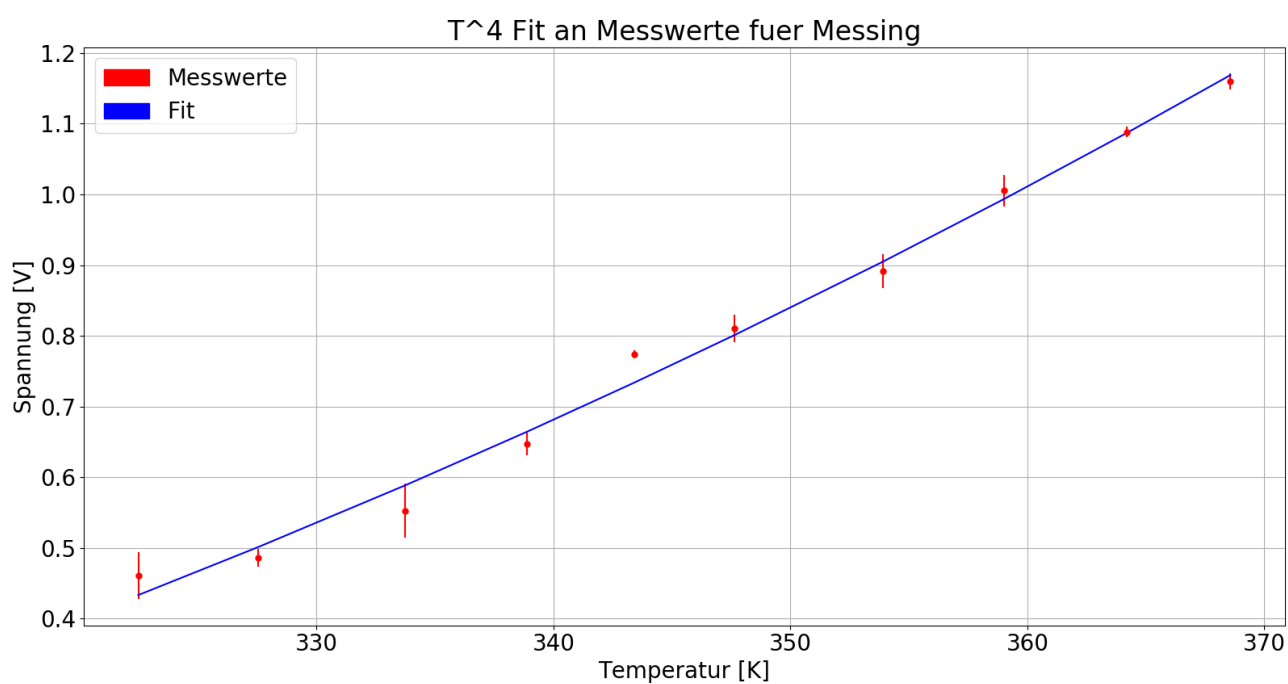
$$p_0 = b - a \cdot T^4 \quad p_1 = a$$

Bei dieser Auswertung konvergieren nur zwei Anpassungen. Bei der ersten Gruppe konvergieren die Werte der weißen Seite und bei der zweiten Gruppe die der Messing-Seite, zu sehen in Tabelle 9 :

$U = p_0 + p_1 \cdot T^{p_2}$	p_0	p_1	p_2
Gruppe 1 / Weiß	$(-7.0 \pm 1.5)V$	$(1.5 \pm 4.4) \cdot 10^{-9} \frac{V}{K^4}$	3.9 ± 0.5
Gruppe 2 / Messing	$(-0.7 \pm 0.7)V$	$(0.4 \pm 4.3) \cdot 10^{-9} \frac{V}{K^4}$	3.8 ± 1.9

Tabelle 9: Ergebnisse der Fitparameter für T^x -Anpassung

¹Die Funktion gibt zwar Fehler aus, wenn man jedoch Fehler auf die Werte übergibt, konvergiert die Routine nicht

Abbildung 7: T^x -Fit für die 1. Gruppe zur weißen SeiteAbbildung 8: T^x -Fit für die 2. Gruppe zur Messing-Seite

6 Fazit

Zunächst einmal ist auffällig, dass die $\frac{\chi^2}{ndof}$ bei den linearen Regressionen sehr groß sind. Außerdem sind die Werte für die Emissionskoeffizienten unrealistisch, da z.B. der Wert der zweiten Gruppe für die schwarze Seite über 1 liegt und damit unphysikalisch ist. Außerdem erwarten wir bei der weißen Seite dieser Gruppe einen nicht ganz so nah an 1 liegenden Wert.

Dies Auffälligkeiten könnten durch nicht berücksichtigte Fehler entstanden sein. Jedoch ist wahrscheinlich, dass die Empfindlichkeitsangaben der Thermosäule nicht sehr präzise sind. Denn diese Konstante fällt raus wenn wir uns die relativen Emissionskoeffizienten zur schwarzen Seite anschauen, da diese eine Abweichung von unter einer Standardabweichung haben.

Somit können wir festhalten, dass die diskrete Bestimmung der Emissionskoeffizienten aufgrund ungenauer Angaben der Empfindlichkeit nicht perfekt geklappt hat, aber die Messungen selbst erfolgreich waren, da sich bei den beiden Gruppen ähnliche Werte für die relativen Emissionskoeffizienten ergeben haben.

Die Auswertung durch den Fit an einen freien Exponenten für T war zwar durch Konvergenzprobleme in der Pythonroutine `scipy.optimize.curvefit()` nur bei 2 Messreihen erfolgreich, jedoch ist der Exponent durch die erreichten Werte angemessen bestätigt, da der Wert 4 innerhalb von einer Standardabweichung vom bestimmten Wert liegt (siehe Tabelle 9).

7 Anhang

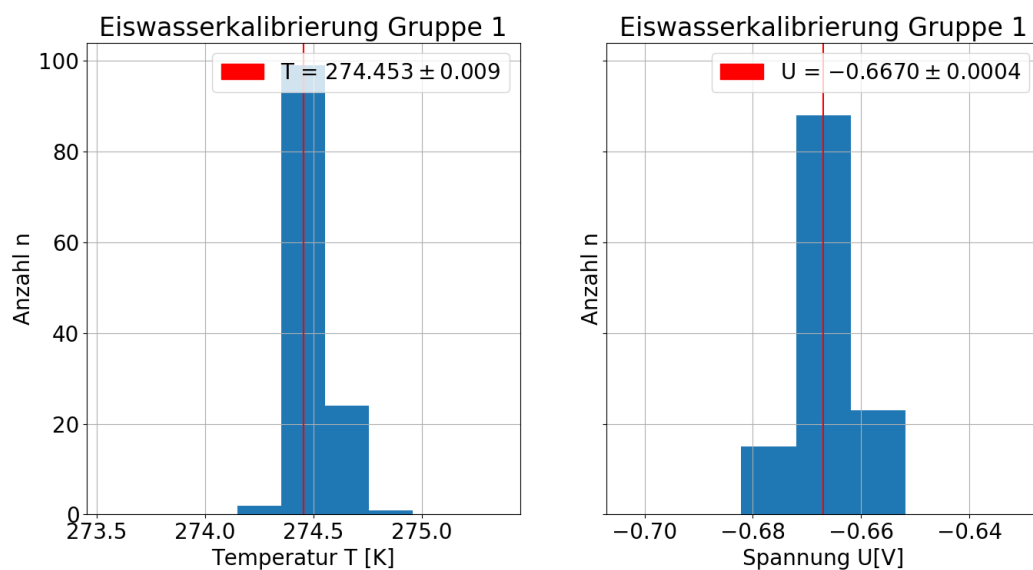


Abbildung 9: Gruppe 1 Eiswassermessung

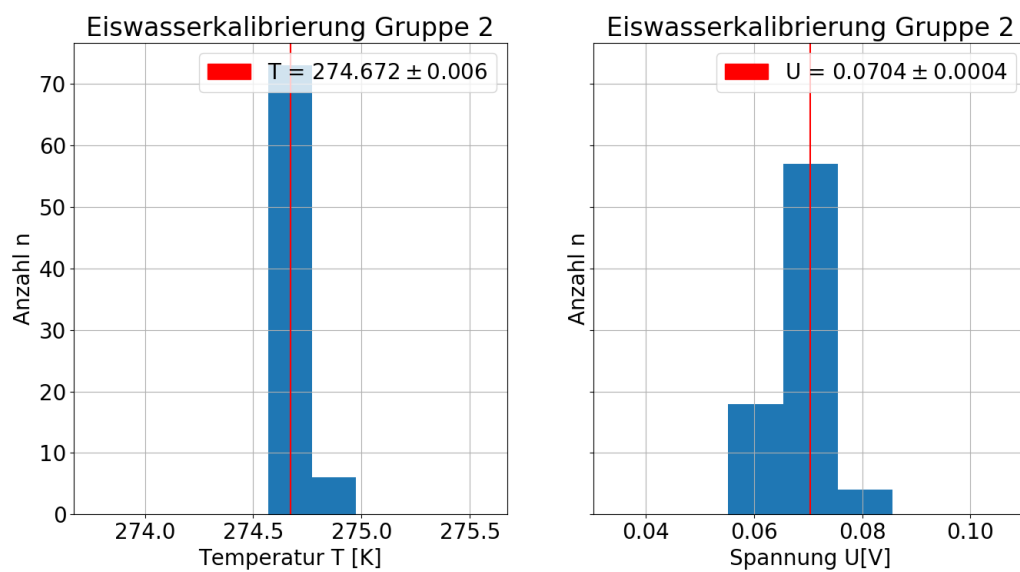


Abbildung 10: Gruppe 2 Eiswassermessung

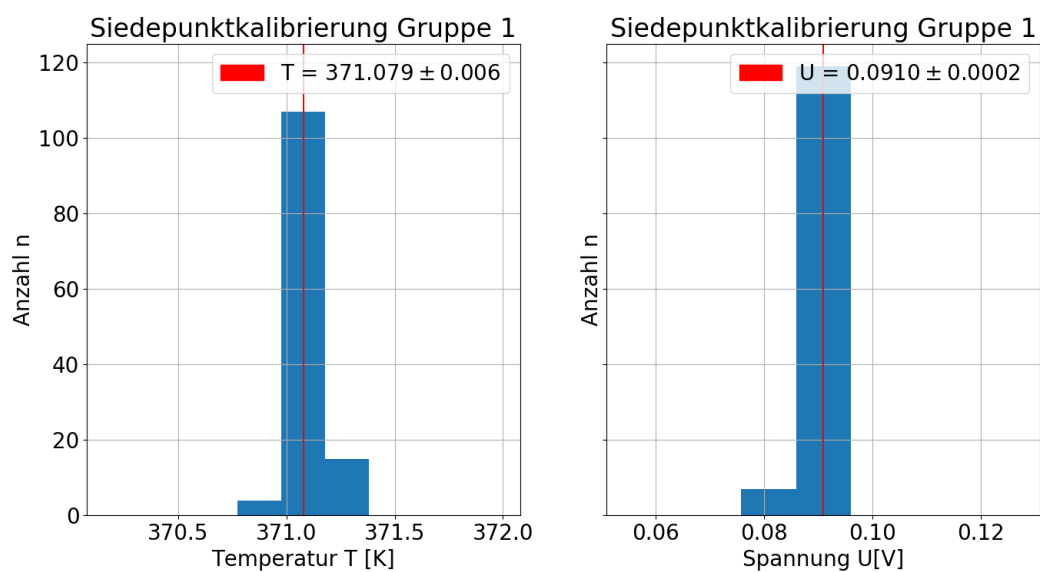


Abbildung 11: Gruppe 1 Siedemessung

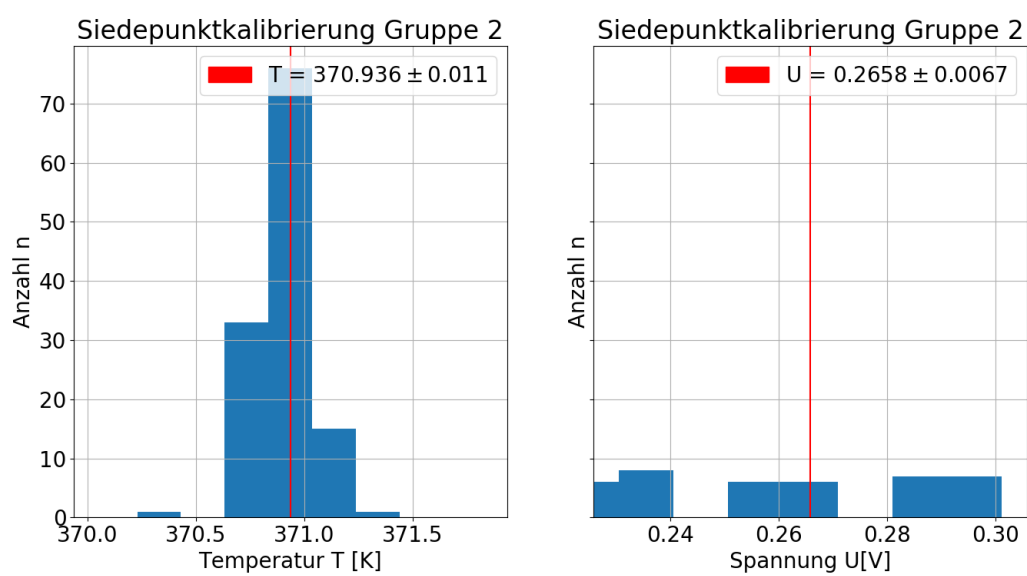


Abbildung 12: Gruppe 2 Siedemessung

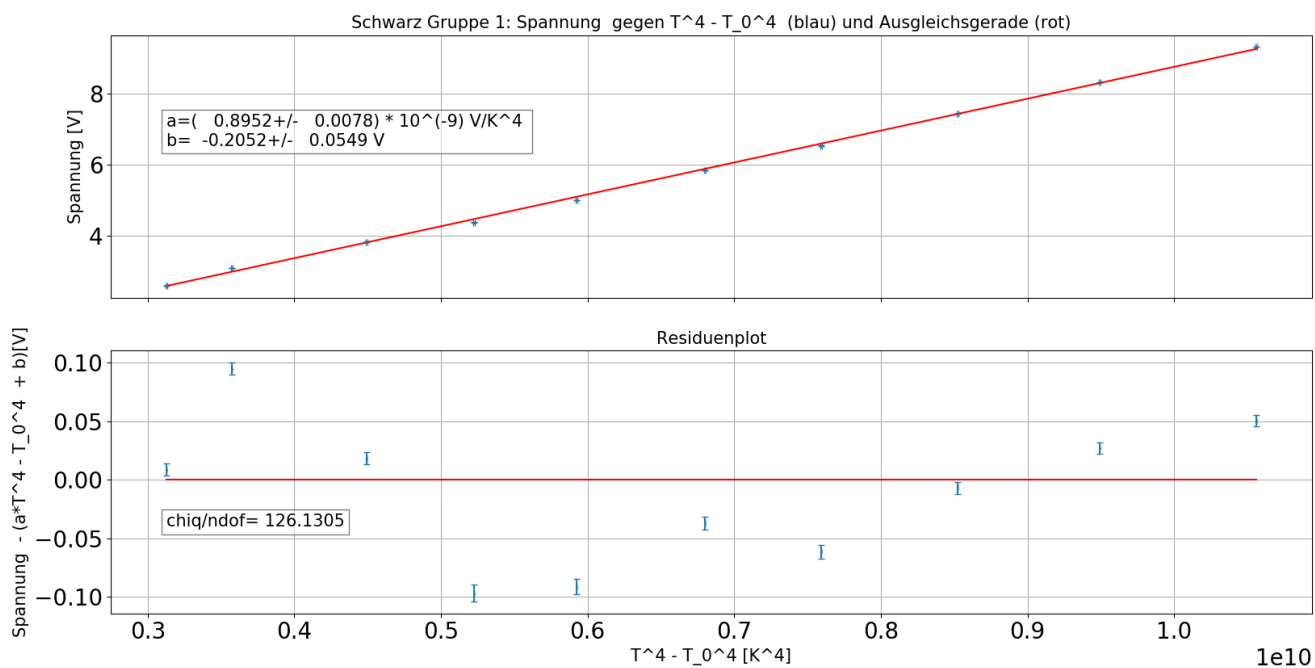


Abbildung 13: lineare Regression für die 1 Gruppe zur schwarzen Seite

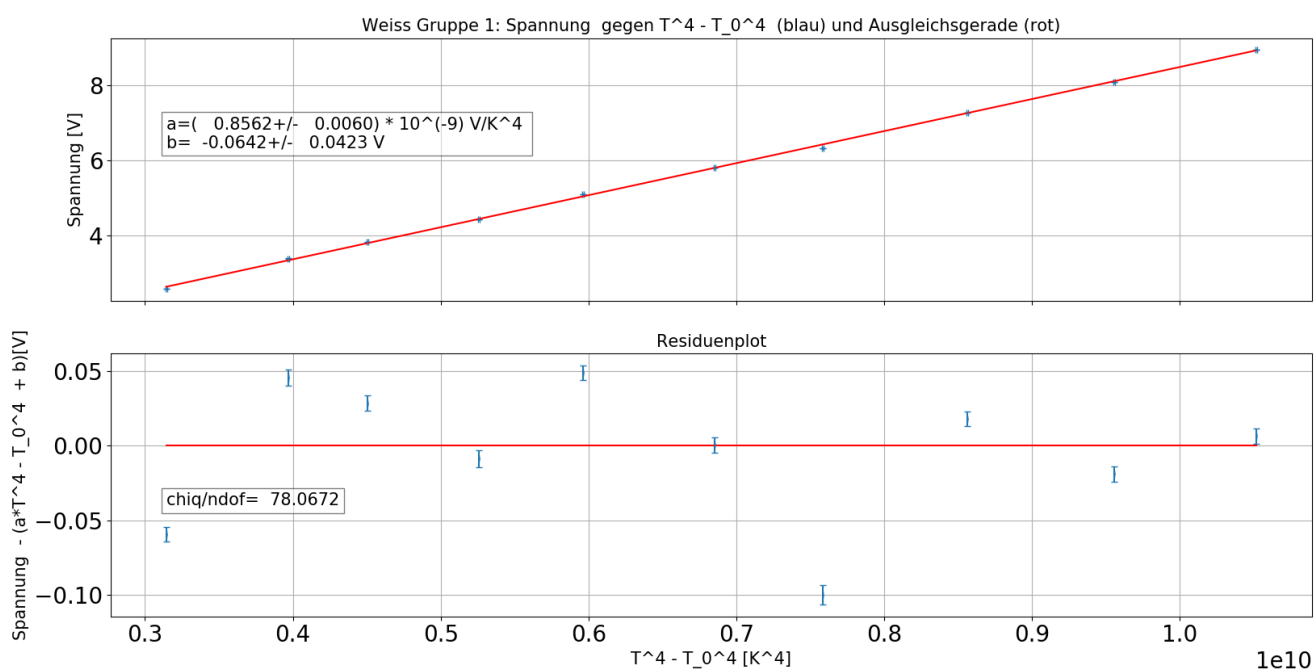


Abbildung 14: lineare Regression für die 1 Gruppe zur weißen Seite

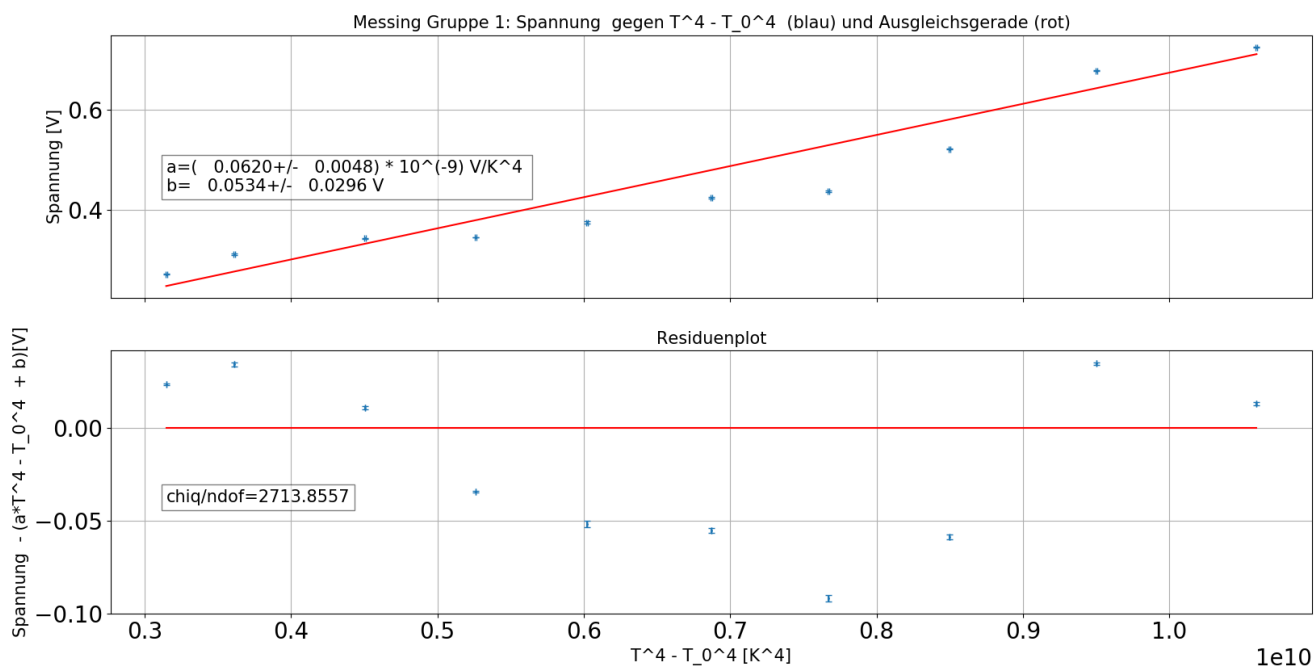


Abbildung 15: lineare Regression für die 1 Gruppe zur Messing-Seite

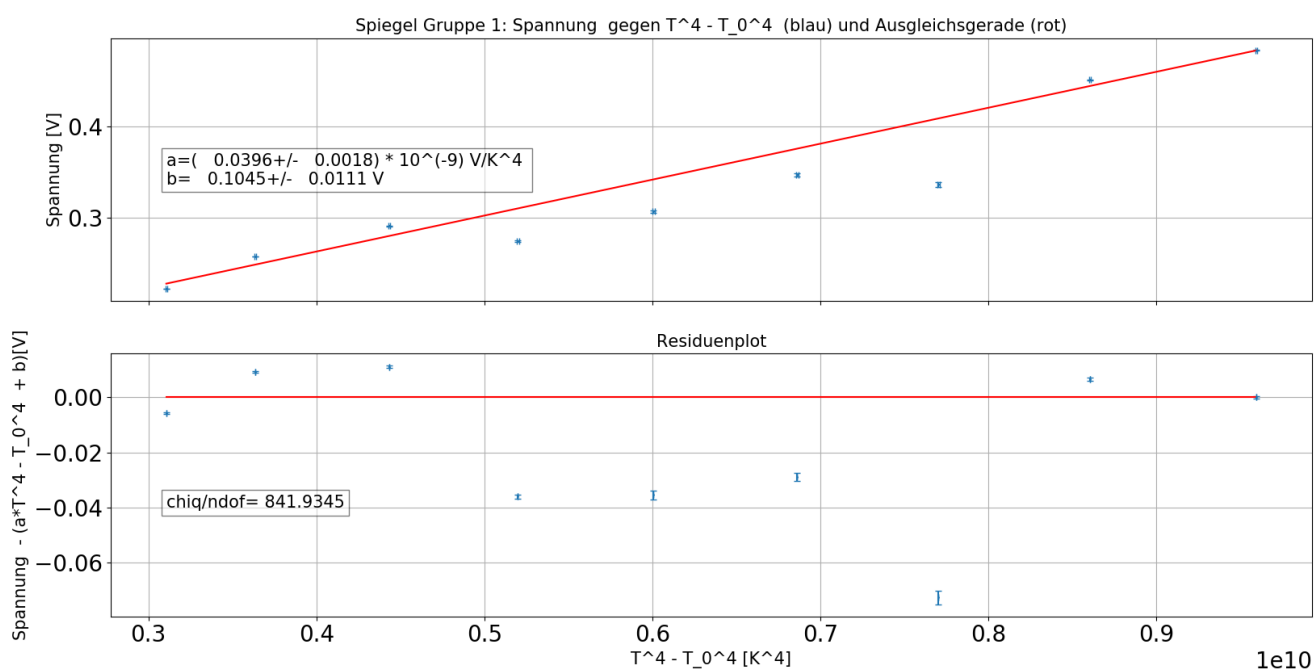


Abbildung 16: lineare Regression für die 1 Gruppe zur Spiegel-Seite

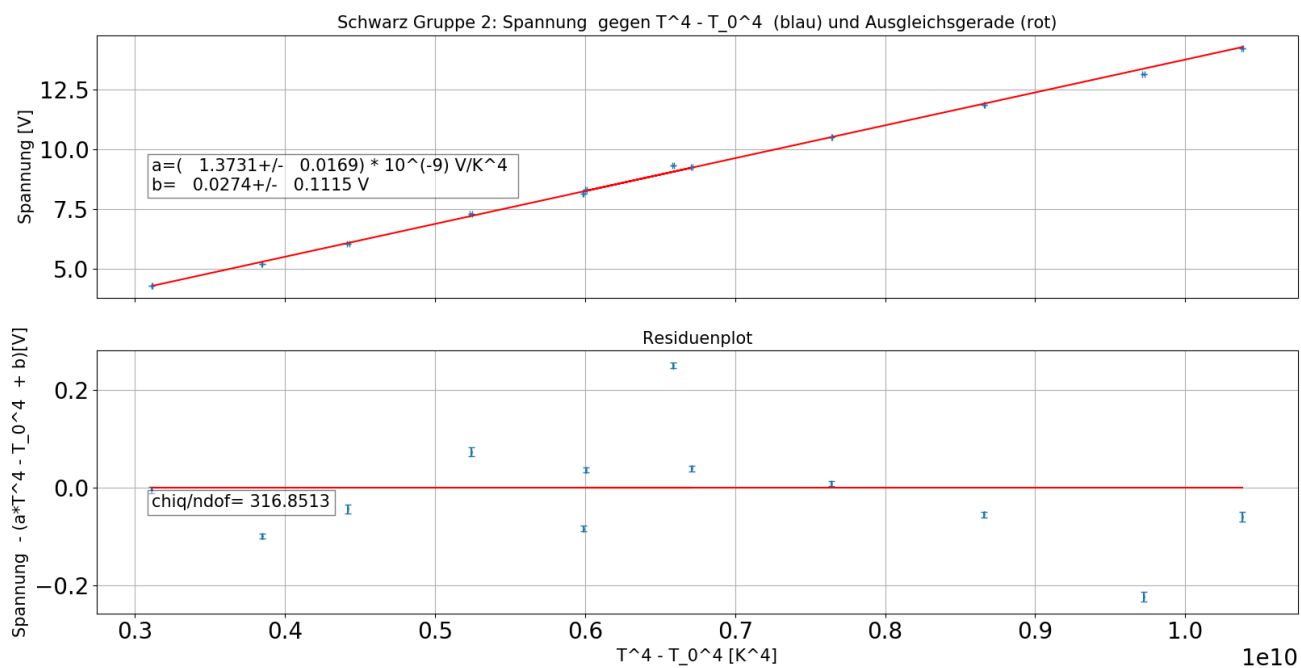


Abbildung 17: lineare Regression für die 2 Gruppe zur schwarzen Seite

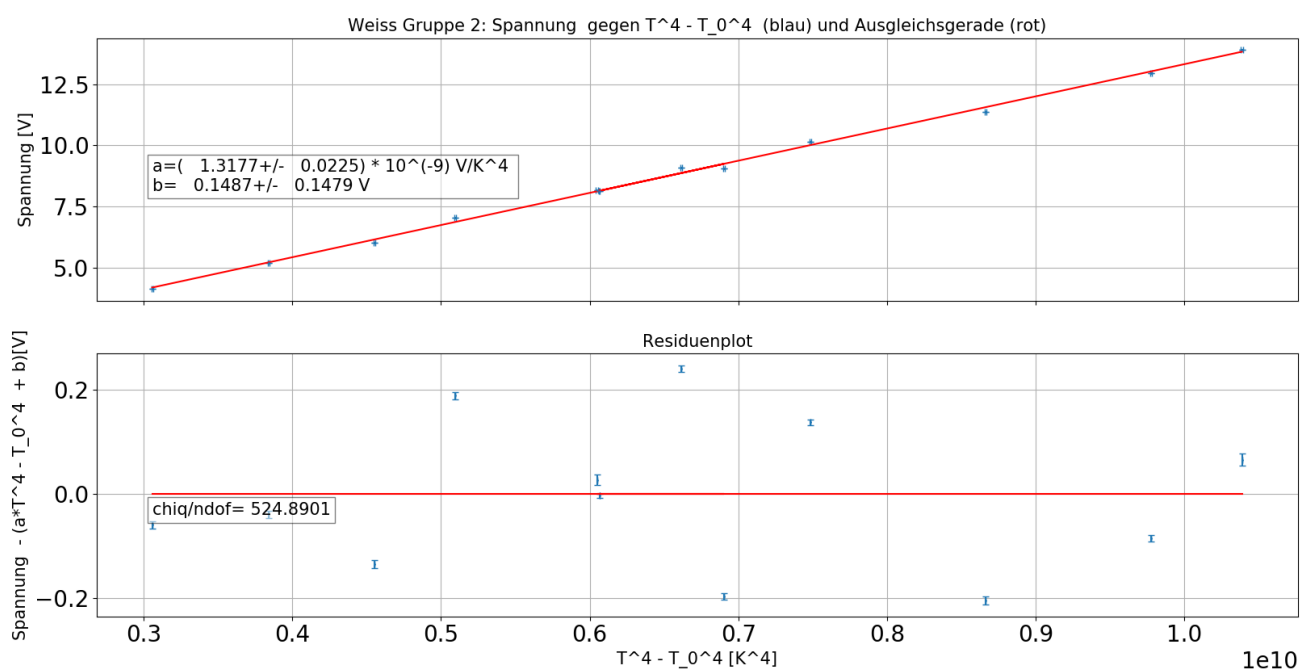


Abbildung 18: lineare Regression für die 2 Gruppe zur weißen Seite

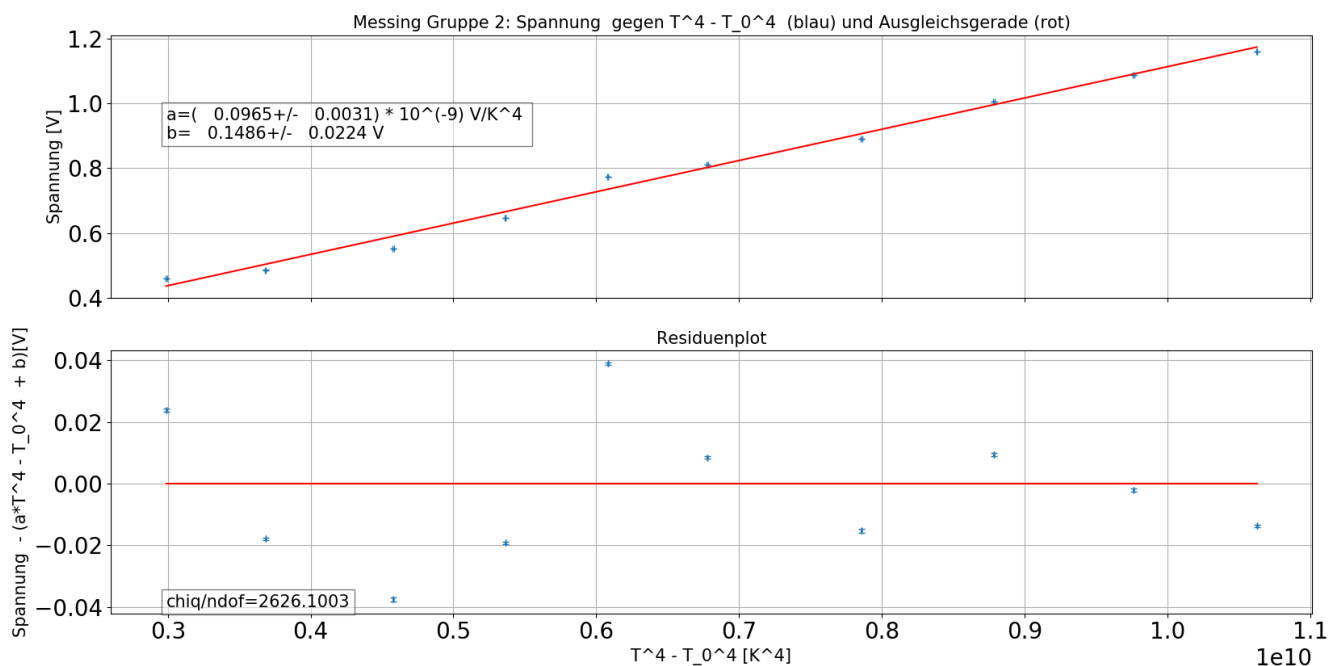


Abbildung 19: lineare Regression für die 2 Gruppe zur Messing-Seite

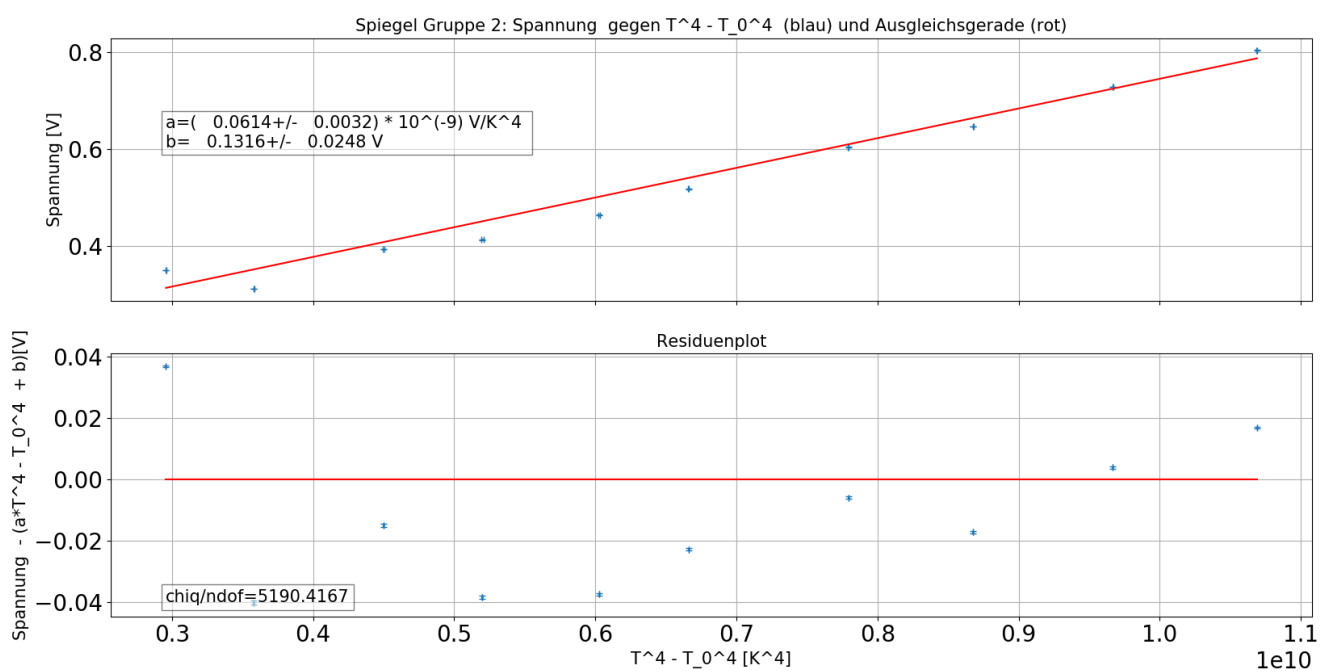
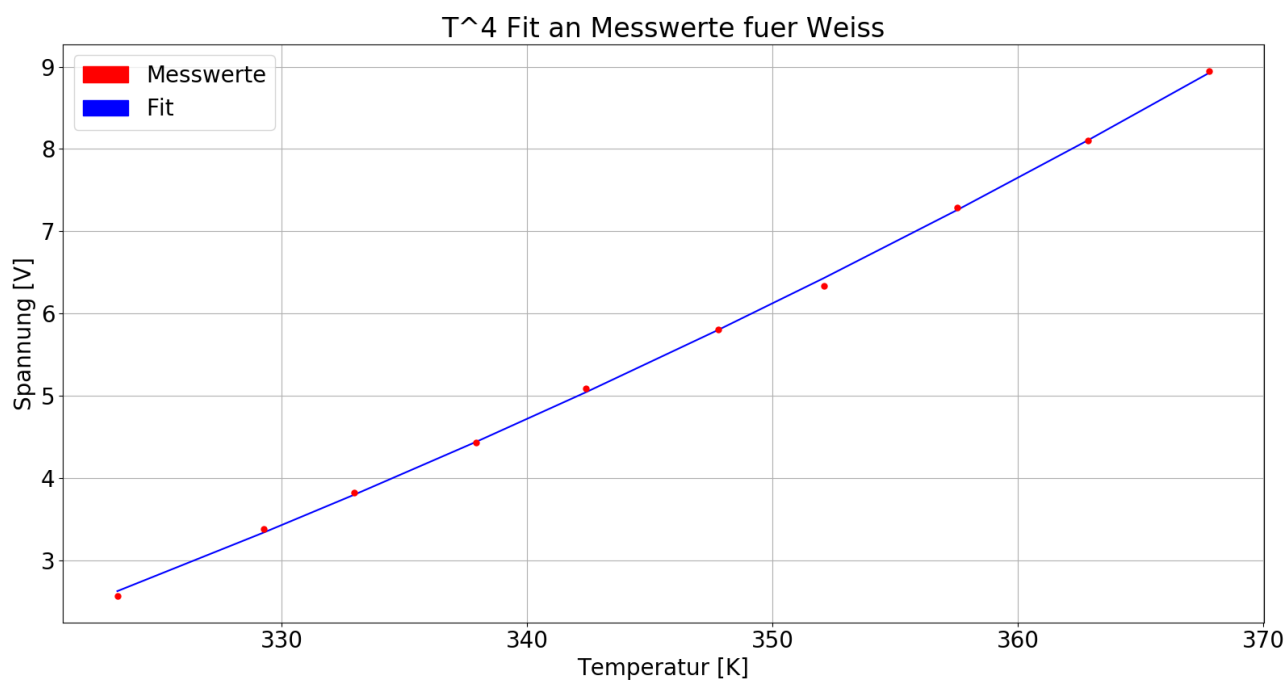
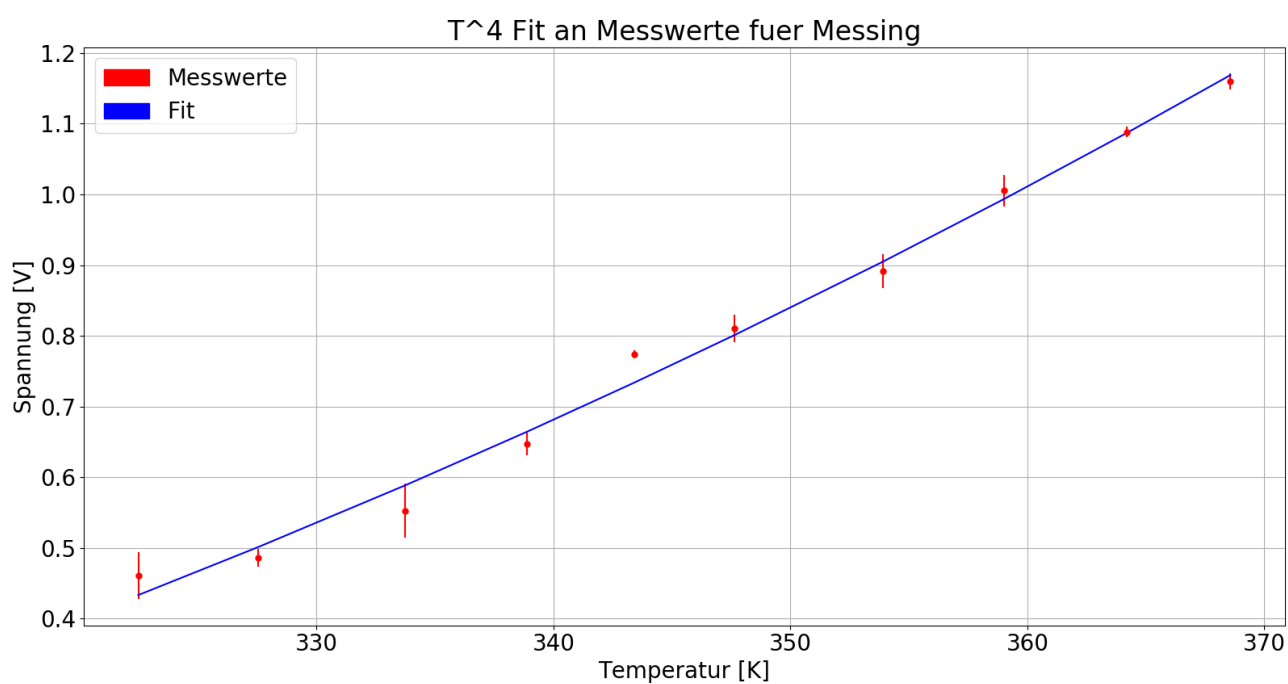


Abbildung 20: lineare Regression für die 2 Gruppe zur Spiegel-Seite

Abbildung 21: T^x -Fit für die 1 Gruppe zur weißen SeiteAbbildung 22: T^x -Fit für die 2 Gruppe zur Messing-Seite

Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau	3
2	Gruppe 1 Eiswassermessung	5
3	Gruppe 2 Eiswassermessung	5
4	Gruppe 1 Siedemessung	6
5	Gruppe 2 Siedemessung	6
6	lineare Regression der Gruppe 1, weiße Seite	8
7	T^x -Fit für die 1. Gruppe zur weißen Seite	10
8	T^x -Fit für die 2. Gruppe zur Messing-Seite	10
9	Gruppe 1 Eiswassermessung	12
10	Gruppe 2 Eiswassermessung	12
11	Gruppe 1 Siedemessung	13
12	Gruppe 2 Siedemessung	13
13	lineare Regression für die 1 Gruppe zur schwarzen Seite	14
14	lineare Regression für die 1 Gruppe zur weißen Seite	14
15	lineare Regression für die 1 Gruppe zur Messing-Seite	15
16	lineare Regression für die 1 Gruppe zur Spiegel-Seite	15
17	lineare Regression für die 2 Gruppe zur schwarzen Seite	16
18	lineare Regression für die 2 Gruppe zur weißen Seite	16
19	lineare Regression für die 2 Gruppe zur Messing-Seite	17
20	lineare Regression für die 2 Gruppe zur Spiegel-Seite	17
21	T^x -Fit für die 1 Gruppe zur weißen Seite	18
22	T^x -Fit für die 2 Gruppe zur Messing-Seite	18

Tabellenverzeichnis

1	Empfindlichkeiten der verwendeten Thermosäulen	4
2	Einstellungen am Cassy	4
3	Kalibrationsmessungen (gemittelt) beider Gruppen	5
4	Kalibrationsergebnisse für $T_{real} = m \cdot T_{gemessen} + b$	7
5	Kalibrationsergebnisse für Raumtemperatur T_0	7
6	Ergebnisse der linearen Regression	7
7	Ergebnisse für ϵ mit statistischen und systematischen Fehlern	8
8	Relativwerte der Emissionskoeffizienten	9
9	Ergebnisse der Fitparameter für T^x -Anpassung	9