

Fachbereich Elektrotechnik und Informatik
Messtechnik und Sensorik

Temperaturmessung mit PT100 und Thermoelement

Praktikumsversuch 1

WiSe 19/20

Autor(en): Chris Klobke (chris.klobke@stud.th-luebeck.de)
Roman Weber (roman.weber@stud.th-luebeck.de)
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Jochen Abke (jochen.abke@th-luebeck.de)
Joachim Kaczmareck (joachim.kaczmareck@th-luebeck.de)
Version: 1.0
Versuchstermin: 14. November 2019

Bericht abgegeben am:	zu korrigieren bis:	testiert am:

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbereitung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Durchführung und Messergebnisse	3
2	Aufgabe 1	3
2.1	Widerstandsthermometer	3
2.1.1	Aufgabenstellung	3
2.1.2	Versuchsaufbau	3
2.1.3	Durchführung	4
2.1.4	Messergebnisse	4
2.1.5	Fazit	6
3	Aufgabe 2	7
3.1	Thermoelement	7
3.1.1	Aufgabenstellung	7
3.1.2	Versuchsaufbau	7
3.1.3	Durchführung	7
3.1.4	Messergebnisse	8
3.1.5	Fazit	9
4	Aufgabe 3	9
4.1	Einfluss des Leitungswiderstandes	9
4.1.1	Aufgabenstellung	9
4.1.2	Versuchsaufbau	9
4.1.3	Durchführung	10
4.1.4	Messergebnisse	10
4.1.5	Fazit	13
5	Aufgabe 4	14
5.1	Sprungantwort	14
5.1.1	Aufgabenstellung	14
5.1.2	Versuchsaufbau	14
5.1.3	Durchführung	14
5.1.4	Messergebnisse	14
5.1.5	Fazit	16

1 Vorbereitung

1.1 Aufgabenstellung

Zur Vorbereitung lag die Aufgabe erstens darin, den Widerstand der Pt100 bei einer Raumtemperatur von 25°C und zweitens die Spannung des Thermoelements bei selbiger Temperatur zu ermitteln.

1.2 Durchführung und Messergebnisse

a)

Mithilfe der Taylorreihe und den Temperaturkoeffizienten des Pt100, $\alpha = 3,90802 \cdot 10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$ und $\beta = -5,80195 \cdot 10^{-7}^{\circ}\text{C}^{-2}$, lässt sich der Widerstandswert des Pt100 bei einer Temperatur von $T = 25^{\circ}\text{C}$ bestimmen.

$$\begin{aligned} R_t &= R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2) \\ R_t &= 100\Omega \cdot (1 + 3,90802 \cdot 10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1} - 5,80195 \cdot 10^{-7}^{\circ}\text{C}^{-2} \cdot 25^{\circ}\text{C}^2) \\ R_t &= 109,734\Omega \end{aligned}$$

b)

Da die Kirchhoffsche Maschenregel besagt, dass die Summe aller Teilspannungen null ergibt, lässt sich für die Masche eines Thermoelements folgende Gleichung aufstellen:

$$U_{A,B} + k_{B,A} \cdot T_M = 0$$

$k_{A,B} \cdot T_M$ ergibt hierbei das Spannungspotential zwischen den beiden Metallen des Thermoelements.

Nach Umstellen lässt sich die Spannung $U_{A,B}$ bestimmen.

$$U_{A,B} = k_{A,B} \cdot T_M = \frac{4,095\text{mV}}{100\text{K}} \cdot 25^{\circ}\text{C} = 1,024\text{mV}$$

2 Aufgabe 1

2.1 Widerstandsthermometer

2.1.1 Aufgabenstellung

Beim ersten Versuch bestand die Aufgabe daraus, die Widerstandswerte der vorhandenen zwei Pt 100-Widerstandsthermometer bei gegebenen Temperaturen zu messen. Zur Temperatur-Regulation stand ein Kalibrierofen zur Verfügung.

2.1.2 Versuchsaufbau

Die beiden Widerstandsthermometer (Pt 100 Ref und Pt 100) werden im Ofen platziert. Der kalibrierte Referenz Pt 100 wird mit einer Vierleitertechnik am Multimeter angeschlossen, der

unkalibrierte Pt 100 mit einer Zweileitertechnik.

Der Referenz Pt 100 dient hierbei zur exakten Bestimmung der Temperatur innerhalb des Ofens.

2.1.3 Durchführung

Als erstes werden die Widerstandswerte der beiden Widerstandsthermometer bei Raumtemperatur aufgenommen. Anschließend wird die Temperatur innerhalb des Ofens so eingestellt, dass neben des Widerstandswertes bei Raumtemperatur, Werte zwischen 60°C und 300°C in Schritten von $\Delta T = 60\text{K}$ aufgenommen werden können.

2.1.4 Messergebnisse

Die Messwerte sind folgendem Diagramm und der Tabelle zu entnehmen.

T Ist/ $^{\circ}\text{C}$	Pt 100 Ref/ Ω	Pt 100/ Ω	Regression/ Ω
21,119	108,244	109,133	110,770
61,556	123,843	124,865	125,744
120,833	146,397	147,493	143,991
180,624	168,735	170,016	169,835
241,030	190,883	191,949	192,203
301,233	212,537	213,621	214,497

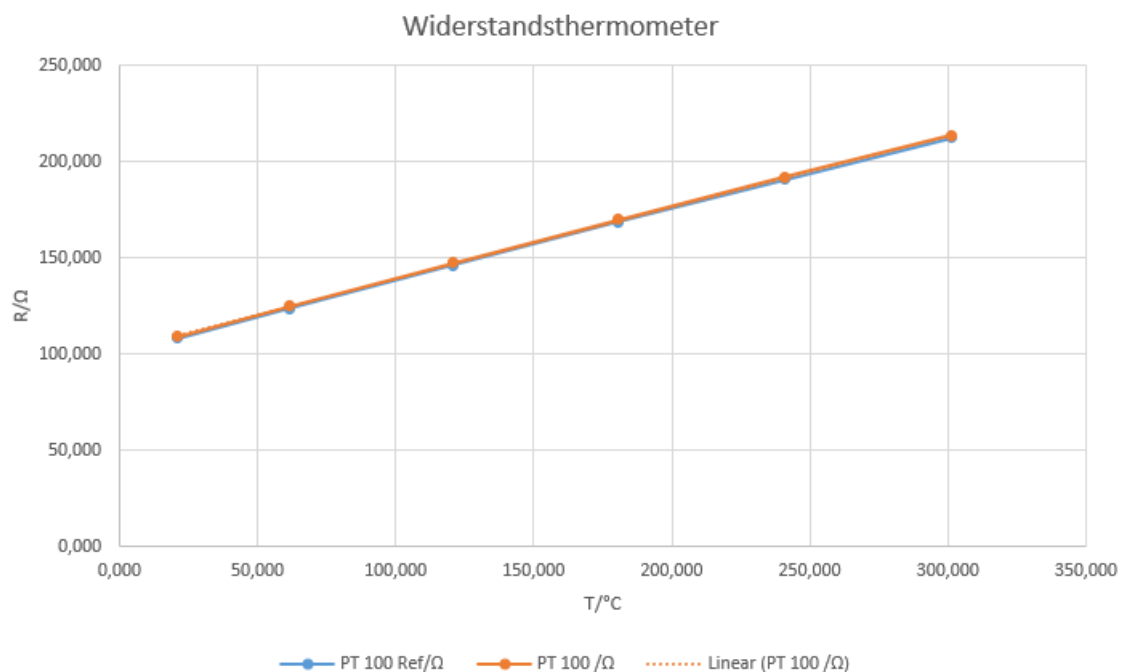


Abbildung 1: Pt 100 Messwerte

Regressionsgerade:

$$R(T) = a + bT = 101,91 + 0,3731 \frac{\Omega}{^{\circ}\text{C}} \cdot T$$

Der Parameter a steht hierbei für den Widerstandswert der Regression bei $T = 0^{\circ}\text{C}$.

m ist bei linearem Verlauf die Empfindlichkeit. Somit steigt der Widerstandswert des Pt 100 um $\frac{0,3731\Omega}{1^{\circ}\text{C}}$.

Mithilfe der Regressionsgeraden lässt sich ein Bestimmtheitsmaß R^2 ermitteln.

$$R^2 = 0,9998$$

Linearitätsfehler:

$$F_{Lin} = \frac{R_{Messung}(T) - R_{Regression}(T)}{R_{Messung}(T_{max}) - R_{Messung}(T_{min})} \cdot 100\%$$

$$F_{Lin} = \frac{170,016\Omega - 169,301\Omega}{213,621\Omega - 109,133\Omega} \cdot 100\%$$

$$F_{Lin} = 0,684\%$$

Folgend ist der Linearitätsfehler in Abhängigkeit der Temperatur zu erkennen.

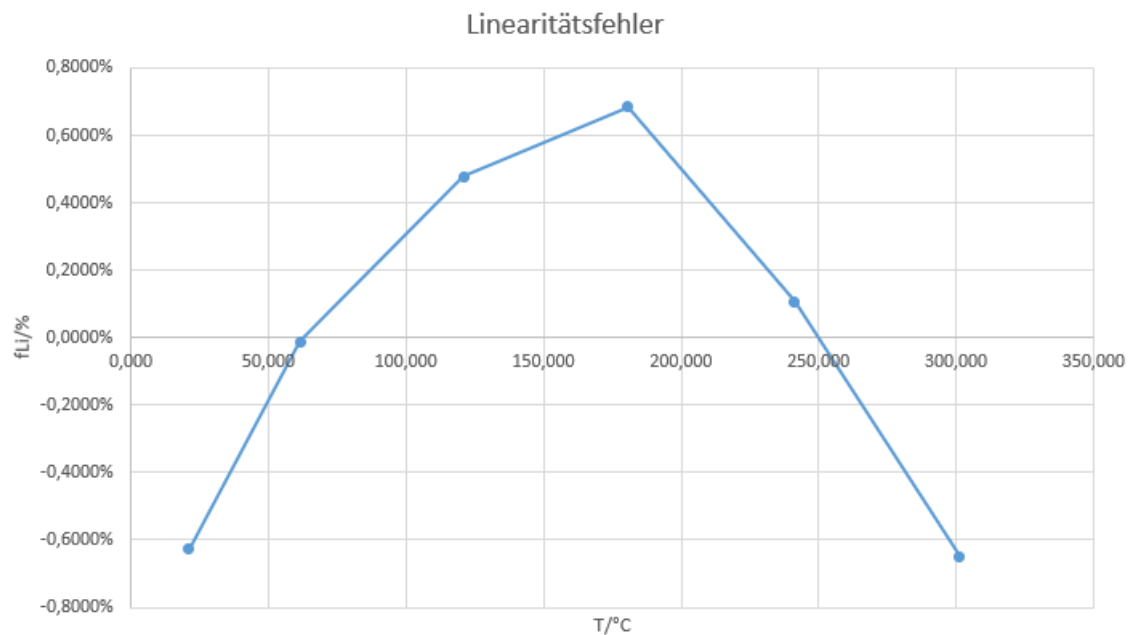


Abbildung 2: Fehlerkennlinie

Berechnung der Konstanten:

Zur Bestimmung der Konstanten der Widerstandsthermometer wird folgendes Polynom betrachtet:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2)$$

Da bei niedrigen Temperaturen der quadratische Term zu vernachlässigen ist, kann dieser zur Vereinfachung weggelassen werden.

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$$

Mit den zwei niedrigsten Temperaturen der gemessenen Werte können zwei Gleichungen erstellt und somit das α errechnet werden.

$$\alpha = 3,855 \cdot 10^{-3}$$

Anhand dieses Alphas lässt sich anschließend R_0 bestimmen.

$$R_0 = \frac{R}{1+\alpha T} = \frac{124,865\Omega}{1+3,855 \cdot 10^{-3} \cdot 61,5564^\circ C}$$

$$R_0 = 100,917^\circ C$$

Mithilfe von R_0 und α lässt sich β bestimmen. Hierzu wird $T_{300} = 301,233^\circ C$ bestimmt.

$$\beta = \frac{R_{300} - R_0(1 + \alpha \cdot T_{300})}{R_0 \cdot T_{300}^2}$$

$$\beta = \frac{213,621\Omega - 100\Omega(1 + 3,855 \cdot 10^{-3} \cdot 301,233)}{213,621 \cdot 301,233^2}$$

$$\beta = -1,2919 \cdot 10^{-7}$$

Mit dem selbigen Verfahren lassen sich diese Konstanten ebenfalls für den Pt 100 Ref bestimmen. Die Konstanten für beide Widerstandsthermometer werden in der folgenden Tabelle dargestellt.

	R_0/Ω	$\alpha/^\circ C^{-1}$	$\beta/^\circ C^{-2}$
Datenblatt	100	$3,9080 \cdot 10^{-3}$	$-5,80195 \cdot 10^{-7}$
PT100	100,917	$3,855 \cdot 10^{-3}$	$-1,2319 \cdot 10^{-7}$
PT100 Ref	100,066	$3,86 \cdot 10^{-3}$	$-1,9390 \cdot 10^{-7}$

2.1.5 Fazit

Wie zu erwarten, ist das kalibrierte Referenz-Widerstandsthermometer Pt 100 Ref genauer als der nicht kalibrierte Pt 100. Grund hierfür ist unter anderem, der Einsatz der Zweileitertechnik beim nicht kalibrierten Pt 100, während beim Pt 100 Ref die Vierleitertechnik zum Einsatz kommt.

Zu erkennen ist dies vor allem an den konstanten Temperaturkoeffizienten, da sowohl R_0 , als auch α des kalibrierten Widerstandsthermometer nur gering von den aus dem Datenblatt angegebenen Konstanten abweicht. Auch die Werte des nicht kalibrierten Pt 100 weichen nur leicht von den idealen Werten ab. Ein signifikanter Unterschied zum kalibrierten ist jedoch gerade bei den dargestellten Messwerten zu erkennen. Die Zweileitertechnik weist dort eine leicht positive Differenz zu jedem Idealwert auf. Grund dafür ist der in der Zweileitertechnik relevante Leitungswiderstand.

Außerdem zu erkennen ist, dass die Konstante β bei beiden Widerstandsthermometern stark vom Idealwert abweicht. Das liegt daran, dass der quadratische Koeffizient bei, in diesem Versuch vorkommenden Maximaltemperaturen, kaum eine Rolle spielt. Dieser ist jedoch vor allem bei Temperaturen bis zu 850°C relevant.

3 Aufgabe 2

3.1 Thermoelement

3.1.1 Aufgabenstellung

Bei diesem Versuch sollen die Spannungen des Thermoelements bei gegebenen Temperaturen aufgenommen werden. Zur Temperatur-Regulation stand auch hier ein Kalibrierofen zur Verfügung.

3.1.2 Versuchsaufbau

Das Thermoelement befindet sich auch hier zu Beginn des Versuchs im Kalibrierofen. Dieses Thermoelement ist über zwei Leiterkabel direkt an das Digitalmultimeter angeschlossen.

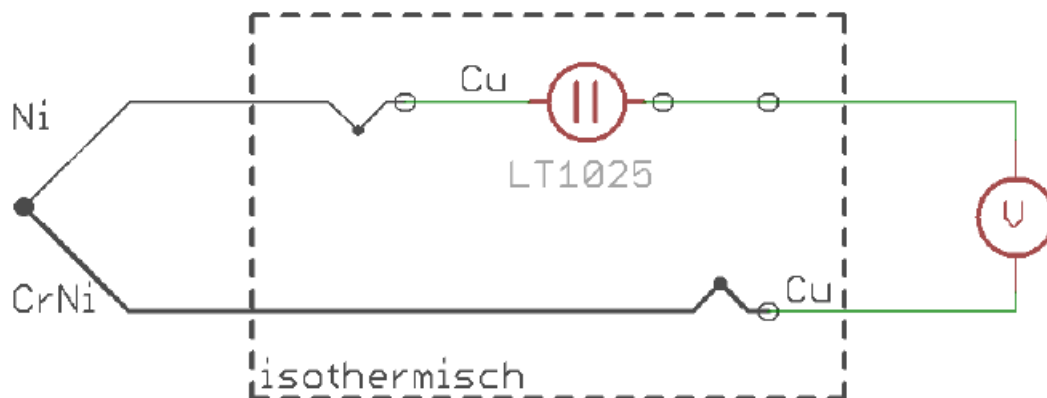


Abbildung 3: Thermoelement Schaltbild

3.1.3 Durchführung

Zu Beginn des Versuchs wird die Spannung am Thermoelement bei Raumtemperatur aufgenommen. Die Temperatur im Ofen wird mit $\Delta T = 60\text{K}$ erhöht und die Thermospannungen aufgenommen.

3.1.4 Messergebnisse

Die aufgenommenen Messwerte sind dem folgenden Diagramm und der Tabelle zu entnehmen.

T Ist/ $^{\circ}\text{C}$	Thermo/mV	Regression/mV
21,119	0,842	0,890
61,556	2,520	2,527
120,833	4,986	4,928
180,624	7,378	7,350
241,030	9,756	9,796
301,233	12,200	12,234

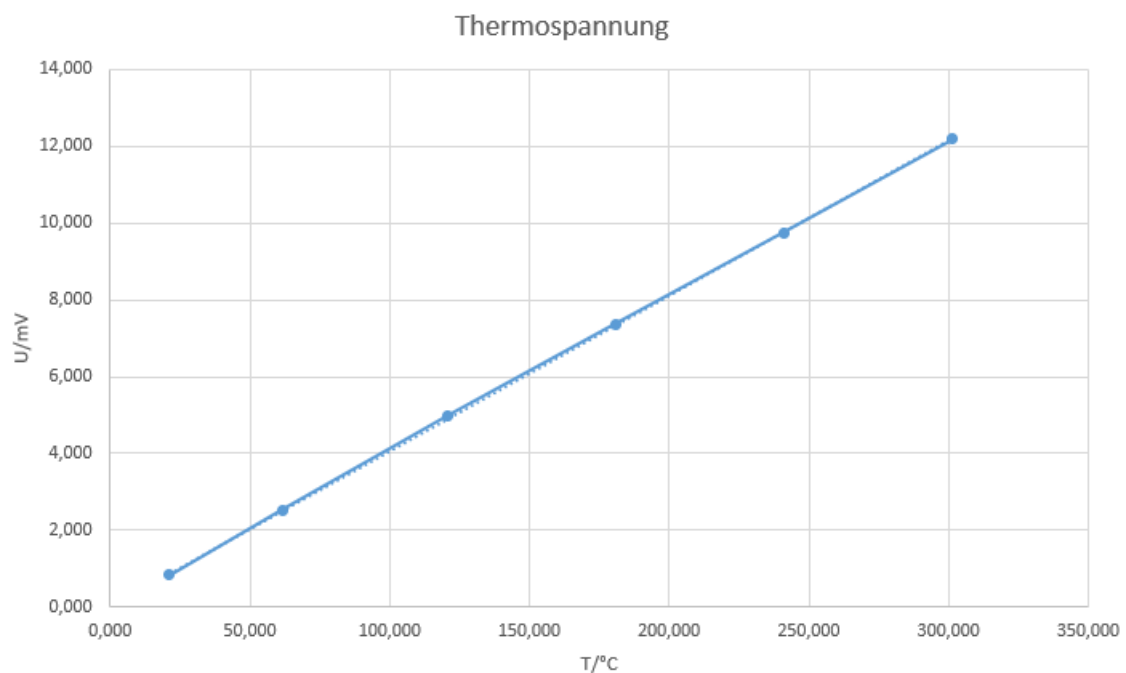


Abbildung 4: Thermoelement Spannungskennlinie

Regressionsgerade:

$$U_{th}(T) = U_{th}(T = 0^{\circ}\text{C}) + a \cdot T \quad U_{th}(T) = 0,0344 + 0,0405 \cdot T$$

Der Parameter U_{th} steht hierbei für die Thermospannung bei einer Temperatur von $T = 0^{\circ}\text{C}$, während a die Empfindlichkeit der Regressionsgeraden angibt. Die Empfindlichkeit des Thermoelements beträgt $\frac{0,0405\text{mV}}{1^{\circ}\text{C}}$.

Linearitätsfehler:

$$F_{Lin} = \frac{U_{Messung}(T) - U_{Gerade}(T)}{U_{Messung}(T_{max}) - U_{Messung}(T_{min})} \cdot 100\%$$

$$F_{Lin} = \frac{4,986mV - 4,928mV}{12,200mV - 0,842mV} \cdot 100\%$$

$$F_{Lin} = 0,511\%$$

3.1.5 Fazit

Zu erkennen ist, dass sowohl der Pt 100 als auch das Thermoelement ihre größten Abweichungen zur Regression im mittleren Temperaturbereich besitzen ($120^{\circ}C - 140^{\circ}C$). Bei einer Temperatur von $120^{\circ}C$ ist die Abweichung des Thermoelements mit 0,511% sogar größer als die des Pt 100 (0,479%). Ansonsten ist das Thermoelement jedoch, vor allem im höheren Temperaturbereich, deutlich genauer.

4 Aufgabe 3

4.1 Einfluss des Leitungswiderstandes

4.1.1 Aufgabenstellung

In diesem Versuch wird untersucht wie sich der Leitungswiderstand auf die Zweileiter- Vierleiter- und die Direktmessung auswirkt.

4.1.2 Versuchsaufbau

Im ersten Teil der Aufgabe wird eine Wheatstonsche Brücke mit Zweileitertechnik und dem PT100-Simulator anstatt eines PT100 aufgebaut.

Um herauszufinden welchen Einfluss die Leitungswiderstände R_L auf die Messung haben, werden diese durch stufenweise einstellbare Widerstände simuliert.

Der Versuchsaufbau, ist im zweiten Teil wie in der folgenden Abbildung dargestellt aufzubauen.

Im letzten Teil der Aufgabe wird dann der PT100-Simulator mit Vierleitertechnik direkt an das digitale Multimeter angeschlossen.

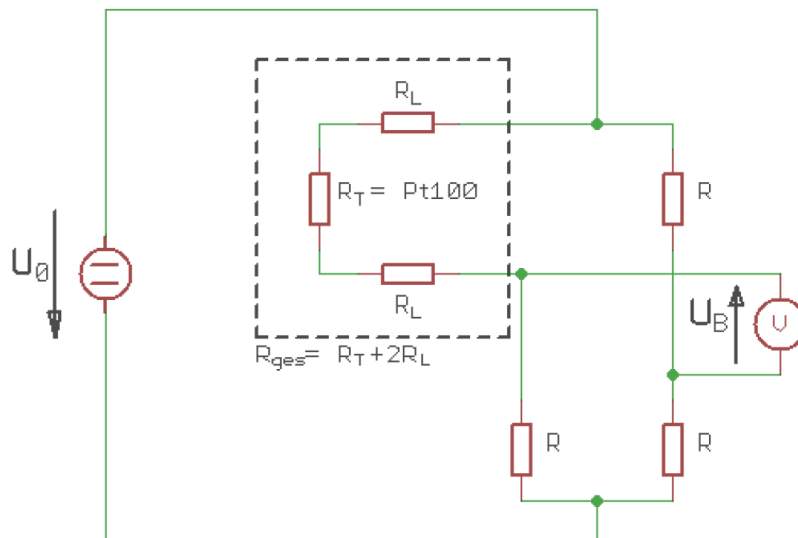


Abbildung 5: Wheatstonsche Brücke mit Zweileitertechnik

4.1.3 Durchführung

Nach korrektem Aufbau der Wheatstonschen Messbrücke wird die Spannungsspeisung U_0 auf 0V und der PT100-Simulator auf 100°C eingestellt. Als nächstes werden die Potenziometer die die Leitungswiderstände simulieren auf 0Ω eingestellt. Zu dem Zeitpunkt wird die Brückenspannung notiert. Die Potenziometer werden daraufhin auf 1Ω ; $5,1\Omega$; 10Ω und $22,1\Omega$ eingestellt.

Nach erfolgreicher Messung wird dann die Vierleitertechnik aufgebaut und die Stromspeisung auf $I_0 = 10\text{mA}$ eingestellt. Daraufhin werden dann die Potenziometer wie beim Aufgabenteil zuvor erhöht und die Messwerte aufgenommen.

Die Messung mit dem PT100-Simulator direkt am Multimeter wird auf die selbe Art und Weise durchgeführt.

4.1.4 Messergebnisse

Die aufgenommenen Messwerte werden in der folgenden Tabelle Dargestellt.

R_L/Ω	U_B/mV	U_T/V	DMM/ Ω
0	167,203	1,385	138,412
1	170,564	1,385	138,412
5,1	198,582	1,385	138,412
10	228,791	1,385	138,413
22,1	293,792	1,385	138,421

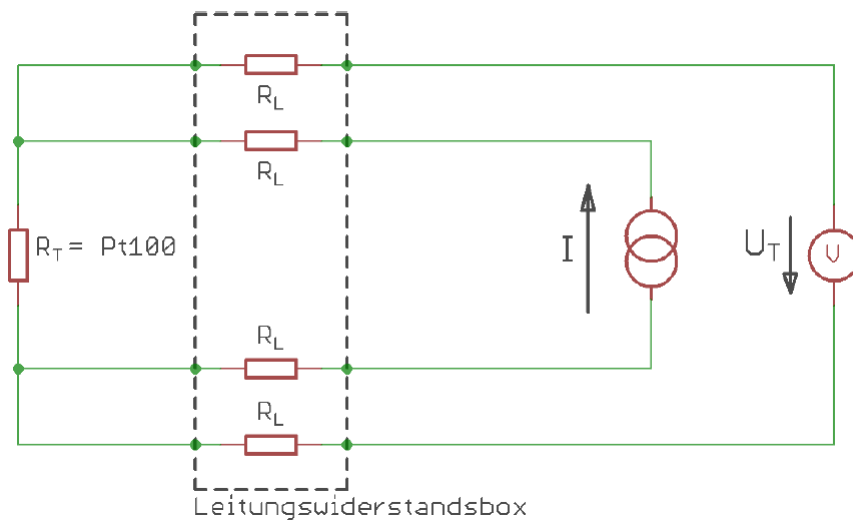


Abbildung 6: Vierleitertechnik

Um nun aus den gemessenen Spannungen die Widerstandswerte zu berechnen werden folgende Formeln benötigt:

Wheatstonschen Brücke:

$$R(PT100) = \frac{U_0 + 2U_B}{U_0 - 2U_B} \cdot 100\Omega$$

4-Leitertechnik:

mit $R = 100\Omega$

$$R = \frac{U_T}{I}$$

Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

R_B entspricht dem Wert der Wheatstonschen Brück und R_T entspricht dem Wert der Vierleitertechnik.

R_L/Ω	R_B/Ω	R_T/Ω
0	140,155	135,5
1	141,128	135,5
5,1	149,558	135,5
10	159,333	135,5
22,1	183,203	135,5

Um nun die entsprechenden Temperaturen der Widerstandswerte zu errechnen muss die folgende quadratische Gleichung nach T umgestellt werden.

$$R_T = R_0(1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2)$$

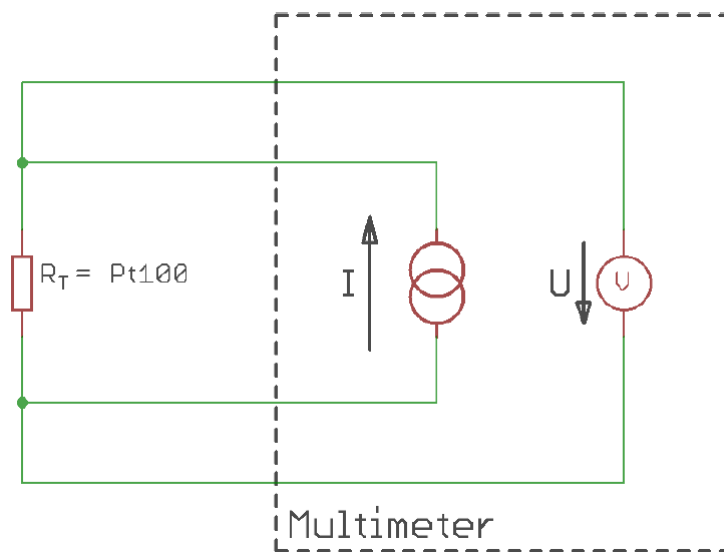


Abbildung 7: Widerstandsmessung mit dem Multimeter

Die errechneten Temperaturwerte werden in folgender Tabelle veranschaulicht.

R_L/Ω	$T_B/^{\circ}C$	$T_T/^{\circ}C$	$T_{DMM}/^{\circ}C$
0	104,367	92,098	99,768
1	106,938	92,098	99,768
5,1	129,293	92,098	99,768
10	155,409	92,098	99,771
22,1	220,095	92,098	99,792

Anhand diesen Temperaturwerten und der folgenden Formel lassen sich die jeweiligen Messfehler errechnen.

$$F(R_L) = \frac{T'(R_L) - 100^{\circ}C}{100^{\circ}C} \cdot 100\%$$

R_L	$F_B/\%$	$F_T/\%$	$F_{DMM}/\%$
0	4,367	-7,902	-0,232
1	6,938	-7,902	-0,232
5,1	29,293	-7,902	-0,232
10	55,409	-7,902	-0,229
22,1	120,095	-7,902	-0,208

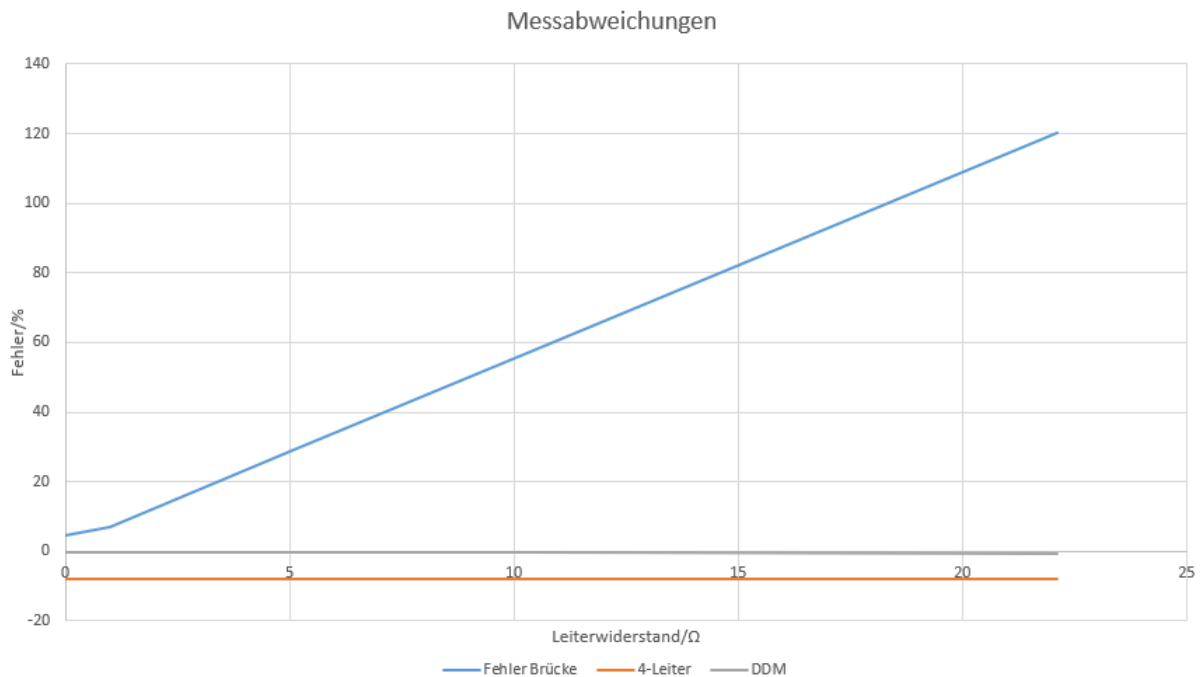


Abbildung 8: Messabweichungen

4.1.5 Fazit

An diesem Versuch ist sehr gut zu erkennen, dass die Messabweichungen bei Zweileitertechnik im Gegensatz zu der Vierleitertechnik bei steigendem Leitungswiderstand stark steigen. Die Messwerte bei der Vierleitertechnik hingegen bleiben bis auf die dritte Nachkommastelle gleich. Wenn der Messwiderstand jedoch direkt an das Multimeter angeschlossen wird, ist eine minimale Änderung des Messfehlers zu bemerken. Dies ist dadurch zu erklären, dass das Messgerät nur einen sehr kleinen Strom ausgibt der bei hohen Widerständen nicht aufrecht gehalten werden kann.

Bei Auswahl des Messverfahrens sollte darauf geachtet werden wie weit der Messwiderstand von dem Messgerät entfernt ist und wie genau die Messung durchgeführt werden soll. Wenn die Messung sehr präzise benötigt wird und der Messwiderstand weit entfernt ist sollte dementsprechend auf die Vierleitertechnik zurück gegriffen werden. Ist der Messwiderstand jedoch sehr dicht an dem Messgerät ist die Zweileitertechnik ausreichend.

5 Aufgabe 4

5.1 Sprungantwort

5.1.1 Aufgabenstellung

In diesem Versuch wird das Zeitverhalten des Pt 100-Widerstandsthermometers und eines NiCr-Ni-Thermoelements mithilfe eines kochenden Wasserbads untersucht.

5.1.2 Versuchsaufbau

Der Pt 100 und das Thermoelement, welches elektronisch kompensiert wird, befinden sich zu Versuchsbeginn an einem Metallstab. Beide befinden sich bei Raumtemperatur. Das Wasserbad befindet sich auf einer Heizvorrichtung, mit der dieses zum Kochen gebracht werden kann.

5.1.3 Durchführung

Gleichzeitig werden das Widerstandsthermometer und das Thermoelement in ein kochendes Wasserbad platziert und mithilfe einer Computerschnittstelle und einer Software die Temperaturen der Bauteile dokumentiert.

5.1.4 Messergebnisse

In der folgenden Grafik ist das zeitliche Temperaturverhalten des Pt 100 und des NiCr-Ni-Thermoelements zu erkennen.

Berechnung t_{90} und t_{10} :

$$\begin{aligned}\Delta t_{Pt100} &= t_{Pt100_{max}} - t_{Pt100_{min}} = 96^{\circ}C - 20,3^{\circ}C = 75,7^{\circ}C \\ \Delta t_{Thermo} &= t_{Thermo_{max}} - t_{Thermo_{min}} = 95,8^{\circ}C - 20,5^{\circ}C = 75,3^{\circ}C\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T(t_{Pt100_{10}}) &= \Delta t_{Pt100} \cdot 10\% + t_{Pt100_{min}} \\ T(t_{Pt100_{10}}) &= 75,7^{\circ}C \cdot 10\% + 20,3^{\circ}C = 27,87^{\circ}C \\ &\Rightarrow t_{Pt100_{10}} = 5,11s\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T(t_{Thermo_{10}}) &= \Delta t_{Thermo} \cdot 10\% + t_{Thermo_{min}} \\ T(t_{Thermo_{10}}) &= 75,3^{\circ}C \cdot 10\% + 20,5^{\circ}C = 28,03^{\circ}C \\ &\Rightarrow t_{Thermo_{10}} = 5,12s\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T(t_{Pt100_{90}}) &= \Delta t_{Pt100} \cdot 90\% + t_{Pt100_{min}} \\ T(t_{Pt100_{90}}) &= 75,7^{\circ}C \cdot 90\% + 20,3^{\circ}C = 88,43^{\circ}C \\ &\Rightarrow t_{Pt100_{90}} = 2,14s\end{aligned}$$

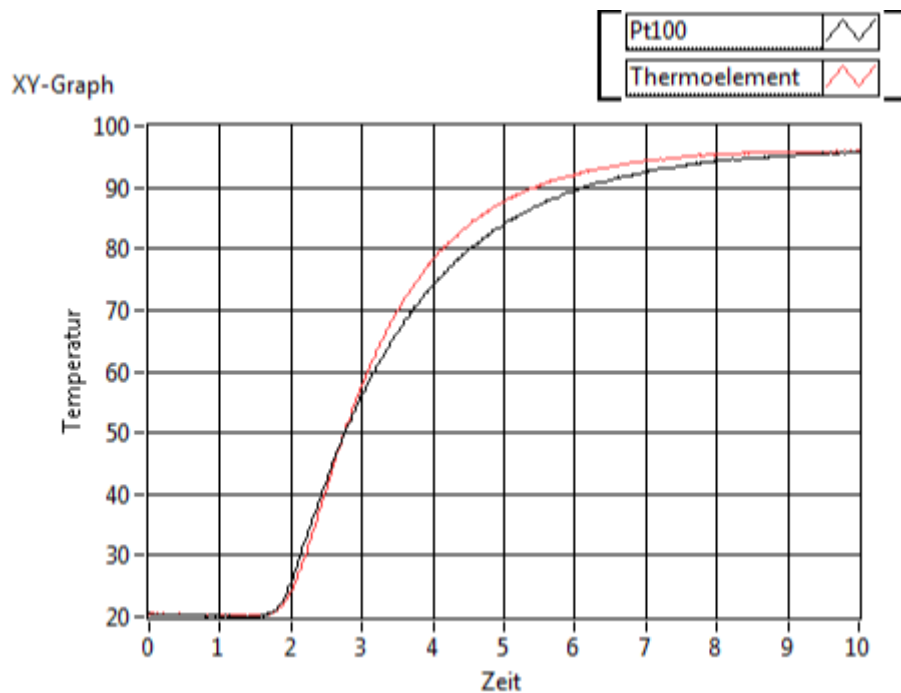


Abbildung 9: Temperaturverhalten

$$\begin{aligned}
 T(t_{Thermo90}) &= \Delta t_{Thermo} \cdot 90\% + t_{Thermo_{min}} \\
 T(t_{Thermo90}) &= 75,3^{\circ}C \cdot 90\% + 20,5^{\circ}C = 88,27^{\circ}C \\
 &\Rightarrow t_{Thermo90} = 2,075s
 \end{aligned}$$

Ansprechzeit:

$$\begin{aligned}
 t_{Pt100_{An}} &= t_{Pt100_{90}} - t_{Pt100_{10}} \\
 t_{Pt100_{An}} &= 5,11s - 2,14s = 2,97s
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_{Thermo_{An}} &= t_{Thermo_{90}} - t_{Thermo_{10}} \\
 t_{Thermo_{An}} &= 5,12s - 2,075s = 3,045s
 \end{aligned}$$

Berechnung τ :

$$\begin{aligned}
 \tau_{Pt100} &= \frac{t_{Pt100_{An}}}{\ln(9)} \\
 \tau_{Pt100} &= \frac{2,97s}{\ln(9)} = 1,352s
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_{Thermo} &= \frac{t_{Thermo_{An}}}{\ln(9)} \\
 \tau_{Thermo} &= \frac{3,045s}{\ln(9)} = 1,386s
 \end{aligned}$$

Berechnung $t_{0,90}$:

$$\begin{aligned}t_{Pt100} &= -\ln(0,1) \cdot \tau_{Pt100} \\t_{Pt100} &= -\ln(0,1) \cdot 1,352s = 4,50s\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}t_{Thermo} &= -\ln(0,1) \cdot \tau_{Thermo} \\t_{Thermo} &= -\ln(0,1) \cdot 1,386s = 4,58s\end{aligned}$$

5.1.5 Fazit

Es ist zu erkennen, dass die Kennlinien, trotz etwas größeren Differenzen zwischen 3 und 8 Sekunden, nahezu gleich sind. Bei ungefähr 10 Sekunden befinden sich der Pt 100 und das Thermoelement bei fast exakt der selben Temperatur. Auch anhand sehr ähnlichen Ergebnissen der Berechnungen ist festzustellen, dass sich Pt 100 und das Thermoelement sehr ähneln.

Somit ist zu dem Entschluss zu kommen, dass sich beide Bauelemente zur Temperaturmessung sehr gut eignen.