

Temperaturmessung mit Pt 100-Widerstandsthermometer und Thermoelement

1 Grundlagen: Pt 100-Widerstandsthermometer

Metalle und Halbleiter ändern unter Temperatureinfluss ihren elektrischen Widerstand. Damit wird die Temperaturmessung auf eine Messung des elektrischen Widerstandes zurückgeführt. Die typischen Temperaturkennlinien verschiedener Werkstoffe sind in Abbildung 1 dargestellt.

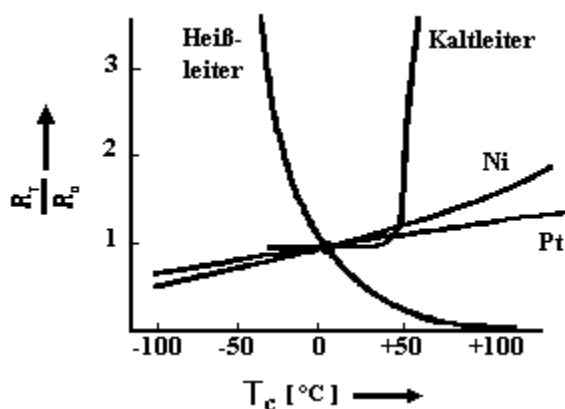


Abbildung 1: Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes verschiedener Werkstoffe

Bei Metallen steigt der elektrische Widerstand mit der Temperatur fast linear an. Die Kennlinie wird durch Polynome der Form

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2 + \gamma \cdot T^3 \dots]$$

Gleichung 1

wiedergegeben. Hierbei ist R_0 der Widerstand bei der Kalibriertemperatur $T = 0^\circ\text{C}$, und α , β und γ der lineare, quadratische bzw. kubische Temperaturkoeffizient.

1.1 Platin-Messwiderstände

Platinthermometer werden in einem weiten Temperaturbereich von -220°C bis $+850^\circ\text{C}$ angewendet. Sie sind in diesem Bereich korrosiv beständig und weisen zeitlich konstante und reproduzierbare Widerstandswerte auf. Der Kalibrierwiderstand R_0 beträgt bei 0°C meistens 100Ω . Das Platinthermometer wird dann Pt 100 genannt. Daneben sind auch Werte wie z.B. 1000Ω (Pt 1000) gebräuchlich. Der Widerstand folgt hier im

Temperaturbereich $0^\circ\text{C} < T < 850^\circ\text{C}$ der Gleichung (DIN 43760 und IEC 571):

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

Gleichung 2

$$\text{mit } \alpha = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{und } \beta = -5,80195 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

und im Bereich $-220^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$ der Gleichung:

$$R_t = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2 + \gamma \cdot T^3 \cdot (T - 100^\circ\text{C})]$$

α und β wie oben, $\gamma = -4,2735 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$

Gleichung 3

1.2 Messschaltungen für Widerstandsthermometer

1.2.1 Wheatstonesche Brücke mit Zweileiterschaltung

Zur Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern werden Brückenschaltungen nach dem Ausschlagverfahren immer dann verwendet, wenn Temperaturänderungen bezogen auf eine Kalibriertemperatur angezeigt werden sollen. Bei Platin- und Nickel-Widerständen ist das meistens 0°C , so dass die Temperaturmessung direkt in Celsius erfolgt.

Wird als Thermometerwiderstand ein Pt 100 verwendet, wird die Wheatstonesche Messbrücke nach Abbildung 2 um drei 100Ω -Widerstände ergänzt. Die Brückenspannung wird mit einem hochohmigen Digitalvoltmeter (DVM) gemessen.

Wie in Abbildung 2 eingezeichnet ist, müssen beim eigentlichen Widerstandsthermometer R_T auch die beiden Leitungswiderstände berücksichtigt werden. Sie können den Messwert gerade bei langen Leitungen zum Teil erheblich verfälschen. Jede Änderung des Leitungswiderstandes R_L ruft dieselbe Wirkung hervor, wie eine gleichgroße Änderung des Thermometerwiderstandes.

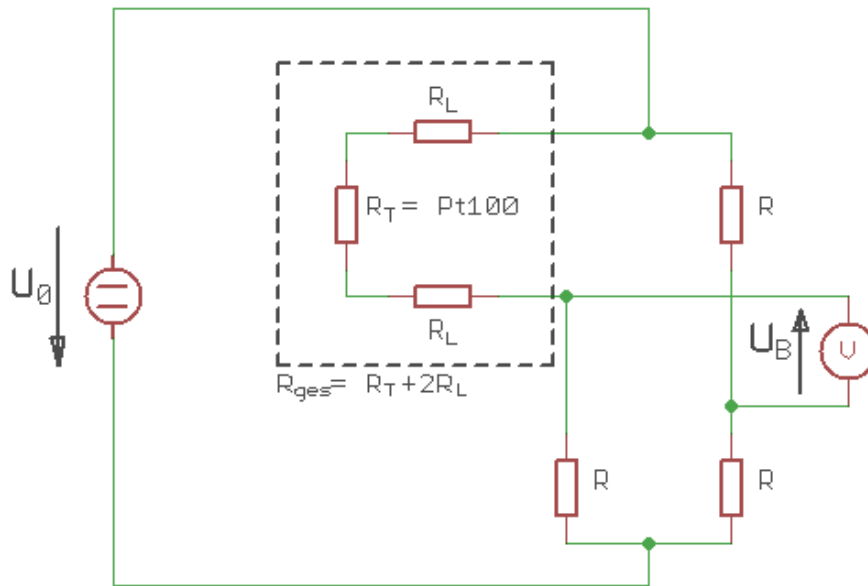


Abbildung 2: : Wheatstonesche Brücke mit Zweileitertechnik

Für die Brückenspannung U_B gilt:

$$U_B = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{R_{ges} - R}{R_{ges} + R} \quad \text{Gleichung 4}$$

Die Messgröße ist allerdings die Brückenspannung. Hieraus lässt sich der Gesamtwiderstand (Gleichung 5) berechnen.

$$R_{ges} = \frac{\frac{U_0}{2} + U_B}{\frac{U_0}{2} - U_B} \cdot R$$

Gleichung 5

Die im Laborversuch verwendete Messbrücke wurde mit Präzisionswiderständen von $R = 100 \, \Omega$ bestückt. Die Brücke ist somit bei $T = 0^\circ\text{C}$ und $R_L = 0$ abgeglichen und die Brückenspannung beträgt dann $U_B = 0 \, \text{V}$.

1.2.2 Vierleiterschaltung mit Konstantstromquelle

Eine optimale Schaltung für Widerstandsthermometer ist die Vierleiterschaltung (Abb. 3). Hier gehen weder die Leitungswiderstände noch die Änderungen der Leitungswiderstände in die Messung ein.

Der Thermometerwiderstand wird über zwei Leitungsanschlüsse mit eingepprägtem Strom gespeist. Die Spannung über dem Thermometerwiderstand wird über zwei weitere Leitungen abgenommen und hochohmig mit einem DVM gemessen. Aus der gemessenen Spannung U_t folgt :

$$R_t = \frac{U_t}{I} \quad \text{Gleichung 6}$$

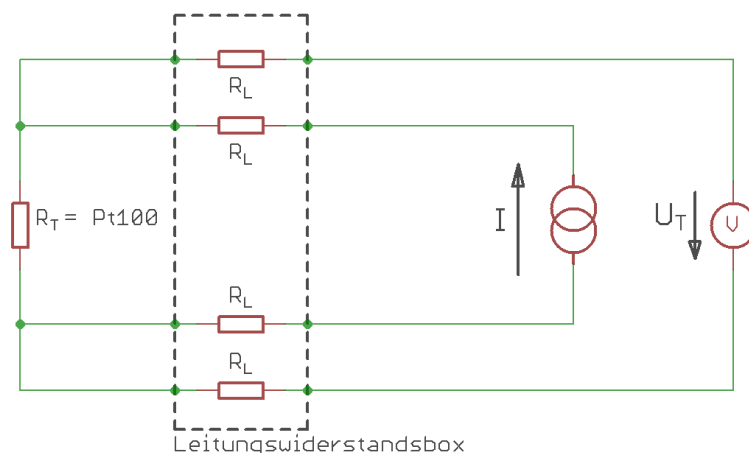


Abbildung 3: Vierleiterschaltung mit Konstantstrom-Speisung

2 Grundlagen: Thermoelemente

Ein Thermoelement ist ein spannungsgebender Temperatursensor. Es entsteht durch Verbindung zweier unterschiedlicher Materialien. Die Thermospannung ist proportional zur absoluten Temperatur an der Verbindungsstelle der beiden Materialien.

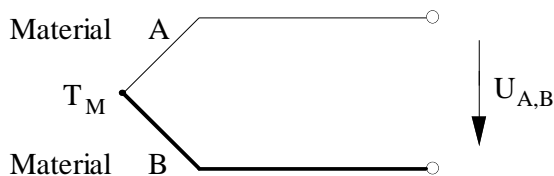


Abbildung 4: Thermoelement

Die Berechnungen der Thermospannung erfolgt mit der Kirchhoffschen Maschenregel:

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

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

Gleichung 7

$k_{A,B}$ ist die Thermoelementkonstante in mV/100K.

Diese Thermoelement-Grundschialtung ist allerdings nicht praxisgerecht, da durch die Messung der Spannung $U_{A,B}$ an den Kupferanschlüssen des Spannungsmessgerätes immer ein zweites Thermoelement bei der Labortemperatur von ca. 20°C entsteht.

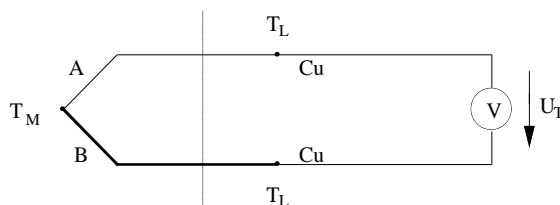


Abbildung 5: Thermoelement bei Raumtemperatur

Der Maschenumlauf liefert:

$$U_T + k_{Cu,B} \cdot T_L + k_{B,A} \cdot T_M + k_{A,Cu} \cdot T_L = 0$$

$$U_T = k_{A,B} (T_M - T_L)$$

Gleichung 8

Die Thermospannung am Voltmeter ist also proportional zur Temperaturdifferenz zwischen der Messstellentemperatur T_M und der Labortemperatur T_L . Auch diese Schaltung wird in der Praxis nicht (oder nur sehr selten) verwendet, da

1. die Labortemperatur als Bezugsgröße nicht konstant genug ist, und

2. die Thermospannung U_T meist direkt zur Temperatur in °C gewünscht wird. Um dieses Ziel zu erreichen, werden verschiedene Wege beschritten.

2.1 Schaltungen für Thermoelemente

2.1.1 Vergleichsstellenmessung mit konst. Temperatur bei $T_V = 0^\circ\text{C}$

Bei diesem Messprinzip wird ein zweites Thermoelement bei der konstanten Vergleichstemperatur (oder auch Bezugstemperatur) von $T_V = 0^\circ\text{C}$ eingesetzt:

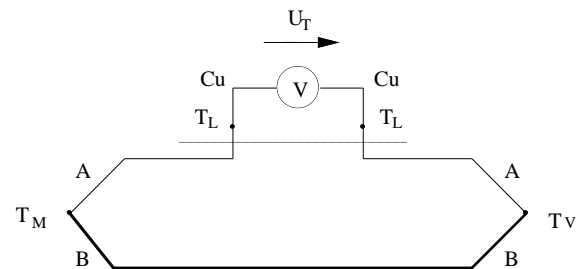


Abbildung 6: Thermoelement mit Vergleichstemperatur

$$U_T + k_{Cu,A} \cdot T_L + k_{A,B} \cdot T_V + k_{B,A} \cdot T_M + k_{A,Cu} \cdot T_L = 0$$

$$U_T = k_{A,B} (T_M - T_V) = k_{A,B} \cdot T_M$$

Gleichung 9

Das dritte Thermoelement an den Cu-Anschlüssen des Voltmeters ist unwirksam, solange beide Anschlüsse auf gleicher Temperatur liegen. Die Thermospannung ist jetzt proportional zur Temperatur der Messstelle in °C.

Die Messschaltung nach Abbildung 6 wird zusammen mit Gleichung 9 zur Definition der Kennlinien der verschiedenen Thermoelemente benutzt. Abbildung 7 zeigt die Temperaturabhängigkeit der Thermospannungen bezogen auf 0°C für einige gebräuchliche Thermoelemente.

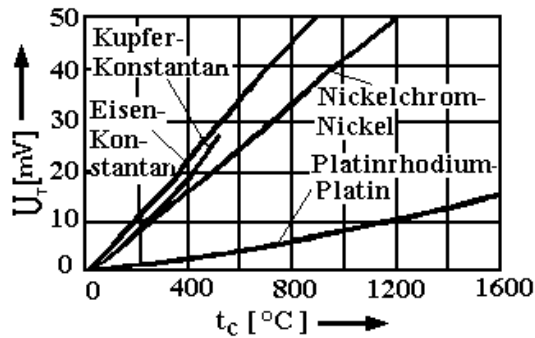


Abbildung 7: Temperaturabhängigkeit der Thermospannungen

Die verschiedenen Typen der Thermoelemente sind in der DIN IEC 584 und DIN 43710 genormt:

Typ K	Nickel-Chrom, Nickel	$k=4,095\text{mV}/100\text{K}$
Typ E	Nickel-Chrom, Kupfer-Nickel	$k=6,317\text{mV}/100\text{K}$
Typ T	Kupfer, Kupfer-Nickel (Konstantan)	$k=4,277\text{mV}/100\text{K}$
Typ J	Eisen, Kupfer-Nickel (Konstantan)	$k=5,268\text{mV}/100\text{K}$
Typ S	Platin 10%, Rhodium-Platin	$k=0,645\text{mV}/100\text{K}$

Die in der Tabelle angegebenen Werte für die Thermoelementkonstante k sind jeweils ein Mittelwert, da, wie auch Abbildung 7 zeigt, die Kennlinie der Thermoelemente nicht linear ist.

2.1.2 Vergleichsstellenkorrektur mit elektr. Kompensationsschaltung

Zur Erzeugung der Vergleichsstellentemperatur von $T_V = 0^\circ\text{C}$ nach 2.1.1 kann ein Eiswasserbad verwendet werden. Es gibt aber auch spezielle Eispunktthermostate, die einfach einzusetzen sind. Trotzdem ist die gesamte Methode sehr umständlich. Wesentlich einfacher in der Anwendung, und Bestandteil aller speziellen elektronischen Temperaturmessgeräte, ist eine elektronische Korrektur der gemessenen Thermoelementspannung auf eine Vergleichsstellentemperatur von $T_V = 0^\circ\text{C}$.

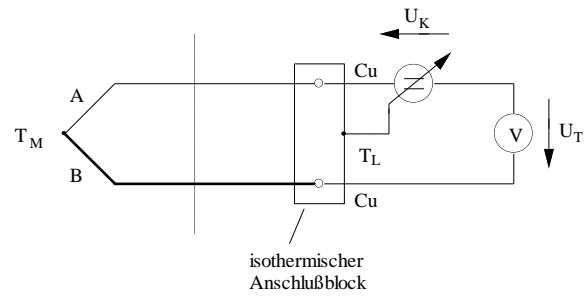


Abbildung 8: Thermoelement mit elektronischer Korrektur

In der Messschaltung Abbildung 8 ist das Thermoelement beim Temperaturmessgerät an einen isothermischen Anschlussblock angeschlossen. Dieser hat eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit, so dass man annehmen darf, dass sich beide Thermoelementanschlüsse auf gleicher Labortemperatur T_L befinden. Die Temperatur des Anschlussblocks wird gemessen und steuert eine Spannungsquelle U_K , die in Reihe zum Thermoelement geschaltet ist. Die Kompensationsspannung U_K ist jetzt so ausgelegt, dass insgesamt am Spannungsmessgerät eine Thermospannung U_T nach Gleichung 8, d.h. proportional zu der Temperaturdifferenz bezogen auf die Vergleichsstellentemperatur von $T_V = 0^\circ\text{C}$, entsteht:

$$U_T + k_{Cu,B} \cdot T_L + k_{B,A} \cdot T_M + k_{A,Cu} \cdot T_L - U_K = 0 \quad \text{Gleichung 10}$$

$$\text{mit} \quad U_T = k_{A,B} (T_M - T_V)$$

$$\text{und} \quad U_K = k_{A,B} (T_L - T_V)$$

Die Kompensationsspannungsquelle simuliert entsprechend Gleichung 10 elektronisch ein Thermoelement A B, welches die Labortemperatur bezogen auf die Vergleichsstellentemperatur von 0°C misst. Hierzu werden heute spezielle integrierte Spannungsquellen eingesetzt, die es passend für jeden Thermoelementtyp gibt. Diese integrierten Schaltungen werden direkt auf dem isothermischen Anschlussblock befestigt.

3 Versuchsaufbauten und Aufgabenstellungen

In diesem Versuch sollen ein Pt 100-Widerstandsthermometer und ein Thermoelement des Typs NiCr-Ni in einem Ofen untersucht werden. Die genaue Bestimmung der Ofentemperatur erfolgt mit einem bereits kalibrierten Pt 100-Widerstandsthermometer. Die Widerstands-Temperatur-Kennlinie liegt in Form einer Tabelle vor.

Die Widerstandsmessungen der beiden Pt 100-Widerstandsthermometer erfolgen mit Hilfe der Vierleitertechnik, wie sie in Abbildung 9 dargestellt ist. Die Stromquelle befindet sich im Messgerät. Auf dem Display des Messgerätes wird der Messwert direkt in Ohm angezeigt.

Die Abb. 10 zeigt den Versuchsaufbau zur Messung der Thermospannungen des Thermoelements NiCr-Ni. Bei dem NiCr-Ni-Thermoelement erfolgt die Messung mit Hilfe der elektronischen Eispunktkorrektur. Die Kompensationsspannung von typisch $40,95\mu\text{V}/^\circ\text{C} \cdot t_{\text{Labor}}$ wird mit dem IC LT1025 erzeugt.

3.1 Vorbereitende Aufgaben:

- Ermitteln Sie den Widerstand der Pt100 bei Raumtemperatur (25°C).
- Ermitteln Sie die Spannung des Thermoelements bei 25°C .

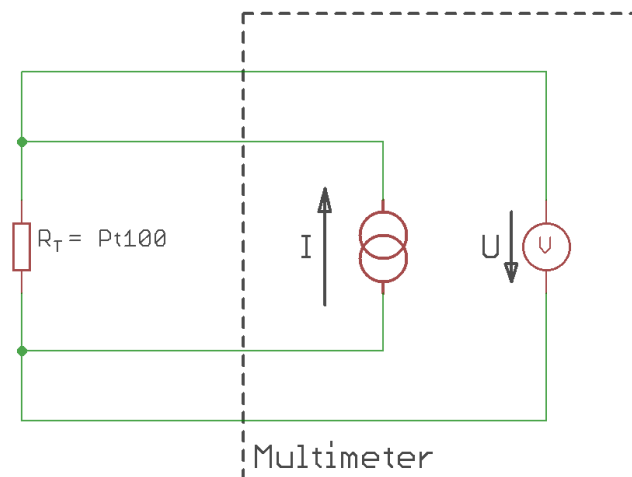


Abbildung 9: Widerstandsmessung in Vierleitertechnik mit dem Keithley DMM 199

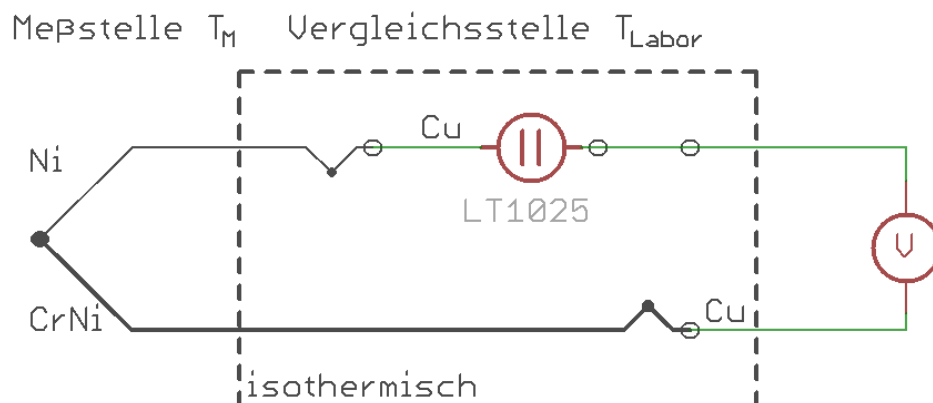


Abbildung 10: Thermoelement Ni-CrNi mit elektronischer Eispunktkorrektur

3.2 Aufnahme der Kennlinien von Pt 100-Widerstandsthermometern & Thermoelementen

Messen Sie die Widerstandswerte der beiden Pt 100- Widerstandsthermometer sowie die Thermospannung des Thermoelements bei den Temperaturen:

Raumtemperatur, 60°C, 120°C, 180°C, 240°C, 300°C.

Dazu werden die beiden Pt 100-Widerstandsthermometer und das Thermoelement in die entsprechenden Bohrungen der Probenhalterung des Kalibrierofens eingeführt und das Gerät eingeschaltet.

Die elektronische Vergleichsstellenkompensation ist auf dem Anschlussboard aufgebaut. Als Spannungsversorgung dient ein Steckernetzteil.

Die Widerstandswerte der Pt 100-Widerstandsthermometer und die Thermospannung des Thermoelements können direkt am Messgerät abgelesen werden.

Beim Betätigen der Taste 8 SCANNER erscheint die Frage nach dem Kanal CHANNEL ?. Durch

Drücken der Tasten 1 bis 4 wird der entsprechende Kanal ausgewählt. Dabei ist zu beachten, dass die INPUT-Taste gedrückt ist (REAR).

Hinweise zur Bedienung der Geräte:

Die Solltemperatur wird direkt am Gerät mit den Tasten ∇ / Δ eingestellt und mit ENTER / SET bestätigt. Der Kalibrierofen benötigt ca. 20 min., um die Ist-Temperatur auf den Sollwert einzuregulieren. Für höchste Messgenauigkeit muss das Temperaturgleichgewicht durch Beobachtung des Widerstandswertes des Pt 100-Widerstandsthermometers abgewartet werden.

Achtung!! der Kalibrierofen ist zum Abkühlen am Ende des Versuchs auf 20°C einzustellen und eingeschaltet zulassen!

Bestimmen Sie die exakten Temperaturen anhand der Kalibriertabelle.

3.3 Untersuchung des Einflusses von Leitungswiderständen mit Hilfe eines Pt 100-Simulators bei unterschiedlichen Messschaltungen

Für die Untersuchung der verschiedenen Messschaltungen wird ein Pt 100-Simulator eingesetzt.

Mit dem Pt 100-Simulator wird ein Pt 100-Widerstandsthermometer bei unterschiedlichen Temperaturen simuliert. Die Temperaturen sind von außen in festen Stufen schaltbar, der Widerstand ändert sich entsprechend.

Eingesetzt wird der Pt 100-Simulator als Pt 100-Widerstand in den vier Messschaltungen nach Abbildung 2 und 3. Es soll der Einfluss von Leitungswiderständen auf die Bestimmung der Temperatur ermittelt werden.

Hinweis: Stellen Sie alle Graphen in einem Diagramm dar!

Die Leitungswiderstände werden durch umschaltbare Festwiderstände erzeugt. Diese Festwiderstände befinden sich zusammen mit den dazugehörigen Umschaltern in einem separaten Gehäuse. Ebenso befindet sich die Wheatstone-Brücke in einem separaten Gehäuse.

Stellen Sie mit einem Pt 100-Simulators einen Temperaturwert von $T=100^\circ$ bei Veränderung der Leitungswiderstände $0\ \Omega$; $1\ \Omega$; $5,1\ \Omega$; $10\ \Omega$ und $22,1\ \Omega$ ein

- 1) Messen Sie die Spannung in der Wheatstoneschen Messbrücke in Zweileitertechnik mit Spannungsspeisung $U_0=2V$ (Abbildung 2).
- 2) Messen Sie die Spannung in Vierleitertechnik mit Stromspeisung $I_0=10\text{ mA}$ (Abbildung 3).
- 3) Messen Sie direkt den Widerstandswert des Pt 100-Simulators mit dem DVM Keithley 199 in Vierleitertechnik (Abbildung 9).

3.4 Aufnahme der Sprungantworten eines Pt 100 und eines NiCr-Ni-Thermoelementes

In diesem Versuch soll das Zeitverhalten eines Pt 100-Widerstandsthermometers und eines NiCr-Ni-Thermoelementes untersucht werden.

Beide Temperatursensoren sind an einer Metallhalterung befestigt, welche zur Aufnahme in ein kochendes Wasserbad bestimmt ist.

Die Messung des Pt 100-Widerstandes erfolgt mit Hilfe der Vierleiterschaltung mit einer Stromspeisung von 1 mA (Abbildung 3).

Die Messung der Thermospannung des NiCr-Ni-Thermoelementes erfolgt mit Hilfe einer elektronischen Kompensation (Abbildung 10).

Nehmen Sie mit dem PC die Sprungantworten des Pt 100-Widerstandsthermometers und des NiCr-Ni-Thermoelementes im kochendem Wasserbad auf.

Bringen Sie nun das Wasser zum Kochen und warten Sie bis sich die Wasserbläschen zurückgebildet haben. Starten Sie den PC und die Aufzeichnung. Dann tauchen Sie die Metallhalterung mit Widerstandsthermometer und Thermoelement in das Wasserbad ein.

Achten Sie darauf, dass Sie die Sensoren vor dem Eintauchen in das Wasserbad nicht in den Wasserdampf halten.

4 Auswertungen

4.1 Widerstandsthermometer

- 1) Dokumentieren Sie den Versuchsaufbau und die Durchführung und stellen Sie die Messwerte tabellarisch dar.
- 2) Stellen Sie die Widerstandswerte des Pt 100-Widerstandsthermometers in Abhängigkeit von den exakten Temperaturen graphisch dar.
- 3) Ermitteln Sie die Regressionsgerade:

$$R(T) = a + bT$$

Geben Sie dem Parametern der Geraden eine mathematische und eine physikalische Bedeutung.

Vergleichen Sie beide Parameter mit den idealen Werten.

- 4) Berechnen Sie den Linearitätsfehler F_{Lin} mit Hilfe der Formel

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

und stellen Sie die Fehlerkennlinie als Funktion der Temperatur dar.

Bewerten Sie Ihr Ergebnis.

- 5) Berechnen Sie außerdem für beide Widerstandsthermometer die Konstanten, welche folgende Gleichung erfüllen :

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

Hierbei sind die Konstanten R_0 , α und β zu bestimmen. Vorgehensweise: Bei niedrigen Temperaturen darf der quadratische Term vernachlässigt werden. Nehmen Sie die Messwerte für die Temperaturen Raumtemperatur und 60°C und bestimmen Sie daraus die Konstanten R_0 und α .

Bilden Sie jetzt die neue Messgröße

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

und errechnen Sie aus den ermittelten Werten für α und R_0 und dem Messwert bei der Temperatur von 300°C die Konstante β .

Deuten Sie Ihre Ergebnisse.

4.2 Thermoelement

- 1) Dokumentieren Sie den Versuchsaufbau und die Durchführung und stellen Sie die Messwerte tabellarisch dar.
- 2) Stellen Sie die Thermospannung des Thermoelements in Abhängigkeit von den exakten Temperaturen graphisch dar.
- 3) Ermitteln Sie die Regressionsgerade:

$$U_{th}(T) = U_{th}(T = 0^\circ C) + a \cdot T$$

Geben Sie dem Parametern der Geraden eine physikalische Bedeutung und deuten Sie die Ergebnisse Ihrer Auswertung.

- 4) Berechnen Sie den Linearitätsfehler und stellen Sie die Fehlerkennlinie als Funktion der Temperatur dar.

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

Deuten Sie das Ergebnis und Vergleichen Sie es mit dem PT100.

Dokumentieren Sie an welchem Messplatz Sie gemessen haben!

4.3 Einfluss des Leitungswiderstandes

- 1) Dokumentieren Sie den Versuchsaufbau und die Durchführung und stellen Sie die Messwerte tabellarisch dar.
- 2) Berechnen Sie aus den gemessenen Brückenspannungen den Widerstandswert des Pt 100-Widerstandsthermometers anhand der Formeln:

Aufgabe 2a)

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

mit $R = 100\Omega$

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

Aufgabe 2b)

- 3) Berechnen Sie aus den ermittelten Pt 100-Widerstandswerten die entsprechenden Temperaturen T' (R_L) mit Hilfe der Gl. (1).
- 4) Berechnen Sie anhand der Gleichung

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

die Messfehler in % vom Messwert. Tragen Sie die Messfehler in Abhängigkeit des Leitungswiderstandes in EINEM(!) Diagramm graphisch auf.

Deuten Sie Ihre Ergebnisse.

- 5) Formulieren Sie ein Fazit des gesamten Versuchs!

4.4 Sprungantwort

- 1) Dokumentieren Sie den Versuchsaufbau und die Durchführung.
- 2) Bestimmen Sie aus den aufgenommenen Sprungantworten die Zeitkonstante τ und die Zeit für einen Temperatursprung von 0 auf 90% des Endwertes, $t_{0,9}$ für das Pt 100-Widerstandsthermometer und das NiCr-Ni-Thermoelement.

Hinweis: Der Beginn der Sprungantwort ($t=0$) ist grafisch schwierig zu bestimmen. Berechnen Sie τ und $t_{0,9}$ indem Sie zuerst die Anstiegszeit $t_{10,90}$ aus dem Diagramm bestimmen. Zeichnen Sie die von Ihnen, aus dem Diagramm, entnommen Werte für T und t in das Diagramm ein.

Deuten Sie Ihre Ergebnisse.