

Elektrische Kennlinien von Thermometerwerkstoffen (*EIKeTherm*)

1 Versuchsziel

Bestimmung der Veränderung elektrische Parameter verschiedener Werkstoffe bei Temperaturänderung zur Anwendung als Temperatursensoren

2 Versuchsgrundlagen

Die Temperaturmessung ist die technologisch wichtigste Messgröße, da nahezu alle physikalischen Größen wie z.B. Dichte, elektrische Spannung bzw. Leitfähigkeit, Wärmestrahlung usw. temperaturabhängig sind, selbst wenn der Temperatureinfluss nur ein parasitärer Nebeneffekt beim Messen anderer Größen ist. Ein Großteil aller benötigter Messaufgaben entfallen auf die Temperaturmessung, z.B. in Schmelzen, bei chemischen Reaktionen, der Lebensmittelverarbeitung, der Energie- und Klimatechnik usw. So unterschiedlich die genannten Bereiche sind, so verschieden sind auch die physikalischen Wirkungsprinzipien und technischen Ausführungen von Temperatursensoren.

2.1 Temperatur

Die Temperatur ist eine Zustandsgröße. Sie beschreibt den Wärmezustand eines Körpers im thermodynamischen Gleichgewicht. Phänomenologisch betrachtet ist die Temperatur ein Maß für die Stärke des Schwingungszustands der Atome in einem festen, flüssigen oder gasförmigen Körper. Je stärker die Atome um ihre Position im Kristallgitter herum schwingen, desto höher ist die Temperatur und umgekehrt.

Zur Messung der Temperatur ist die Definition einer Temperaturskala nötig. Neben vielen historisch bedingten Einheiten, wie Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), Rankine ($^{\circ}\text{Ra}$) oder Réaumur ($^{\circ}\text{Ré}$), ist die physikalische SI-Einheit der Temperatur das Kelvin (K). Ein Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von reinem Wasser. Die absolute Temperatur wird mit T bezeichnet. Die zugehörige Kelvin-Skala beginnt beim absoluten Nullpunkt $T = 0\text{ K}$, bei dem die Atome keine Schwingung ausführen. Bei Normaldruck (101,325 kPa bzw. 1,013 25 bar) liegt der Gefrierpunkt von Wassers bei $T = 273,15\text{ K}$, der Siedepunkt bei $373,15\text{ K}$. Neben der absoluten Temperatur T gilt ebenso die Celsius-Temperatur ϑ mit der Einheit Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$):

$$\vartheta[^{\circ}\text{C}] = T[\text{K}] - 273,15 \quad (1)$$

Eine Temperaturdifferenz wird in K angegeben und ist in beiden Skalen gleich. Die Eichung von Temperaturmessgeräten erfolgt über Fixpunkte, insbesondere über sehr exakt bekannten Schmelz- und Siedepunkte geeigneter Substanzen, welche in der Internationalen Temperaturskala von 1990

(ITS-90) definiert sind [1, 2]. In physikalischen Formeln erfolgt die Temperatureingabe in Kelvin, sofern keine anderslautenden Forderungen angegeben sind.

2.2 Temperaturmessung

Durch die o.g. Temperaturabhängigkeit verschiedene Größen kann man diese bei bekanntem Zusammenhang von Temperatur und Messgröße zur Bestimmung der Temperatur verwenden. Es gibt eine Vielzahl von Wechselwirkungen, die in Abhängigkeit vom zu messenden Temperaturbereich dafür Verwendung finden.

Bei den Verfahren zur Temperaturmessung unterscheidet man zwischen:

- **Pyrometrie**, d.h. berührungslosen Strahlungsmessfühlern z.B. Pyrometer, Bolometer
- **Thermometrie**, d.h. den Berührungssensoren z.B. Flüssigkeitsthermometer, Bimetallthermometer, Widerstandsthermometer, Thermoelemente, Thermistoren etc.

Bei der im Praktikum verwendeten Thermometrie wird der Temperatursensor mit dem Medium oder der Oberfläche des Körpers, dessen Temperatur bestimmt werden soll, ins thermodynamische Gleichgewicht gebracht, d.h. der Temperatursensor nimmt die gleiche Temperatur wie das zu messende Objekt an. In der Regel wird somit nicht die Temperatur des Messobjektes, sondern die eigene Temperatur am jeweiligen „sensitiven“ Element mit einem temperaturabhängigen Effekt gemessen. Deshalb muss darauf geachtet werden, dass der Sensor des Temperaturfühlers die Temperatur des Messobjektes möglichst schnell und gut annimmt bzw. bei der Messung angenommen hat, ohne in den Wärmehaushalt des Objekts entscheidend einzugreifen. [3]

2.2.1 Thermoelement

Verschweißt man zwei Drähte aus unterschiedlichen Materialien, die sich in ihrer Leitfähigkeit bzw. Ladungsträgerdichte unterscheiden, an einem Punkt zusammen, so bildet sich aufgrund des diffusionsbedingten Elektronenausgleichsprozesses an der Kontaktstelle eine Potentialdifferenz U_1 zwischen den beiden Werkstoffen aus. Sind diese aber nun, so wie in Bild 1 dargestellt, an zwei Stellen miteinander verschweißt, so kann man eine Verbindungsstelle auf die zu messende Temperatur T_x und die andere auf eine Vergleichstemperatur T_V (z.B. Eiswasser, 0°C) bringen.

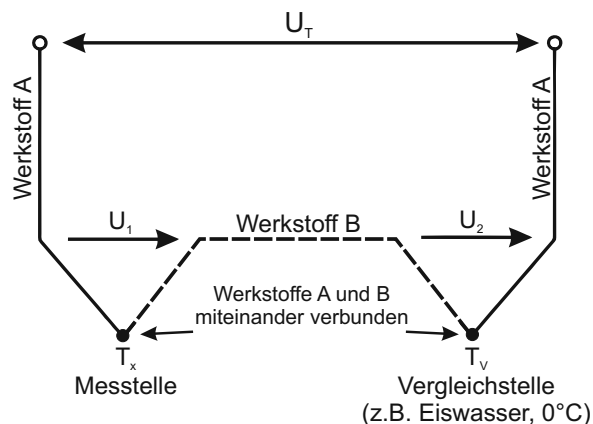


Bild 1: Prinzip der Temperaturmessung mit einem Thermoelement

Zwischen den beiden Kontaktstellen mit unterschiedlicher Temperatur entsteht ein vom Temperaturgefälle ΔT abhängiges Potentialgefälle $U_T = U_1 - U_2$ welches mit einem hochohmigen Messinstrument oder einer stromlos messenden Kompensationsschaltung gemessen werden kann. Die Höhe und die Veränderung der gemessenen Thermospannung hängt vom Temperaturunterschied und den im Thermoelement verwendeten Materialien, der sogenannten *Thermoempfindlichkeit* k_{A-B} (Thermoempfindlichkeit der Materialpaarung A-B) ab. Diese als *Seebeck-Effekt* bezeichnete temperaturabhängige Spannungserzeugung wird je nach Materialkombination für Temperaturen in einem Bereich von -250°C bis 3000°C ausgenutzt. Zum Schutz vor mechanischen Beschädigung und Korrosion werden Thermoelemente u.a. in keramische Schutzrohre eingebaut.

Der Seebeck-Effekt wird durch die *Thermoelektrische Spannungsreihe*, ähnlich der elektrochemische Spannungsreihe der Elemente, beschrieben. In dieser sind für die verschiedenen verwendbaren Materialien die im Zusammenspiel mit Platin (manchmal auch Kupfer) erreichbaren Thermoempfindlichkeiten k_{A-Pt} , d.h. messbare Spannungsänderung pro Kelvin (bzw. 100 Kelvin) Temperaturdifferenz, angegeben. Platin wird dabei als Referenz verwendet, um nicht für jede denkbare Kombination von zwei Werkstoffen die individuelle Thermoempfindlichkeit angeben zu müssen. Beispiele aus der thermoelektrischen Spannungsreihe sind in der folgenden Tabelle 1 angegeben.

Werkstoff	k_{A-Pt} [mV/100K]	Werkstoff	k_{A-Pt} [mV/100K]	Werkstoff	k_{A-Pt} [mV/100K]
Ge	+33.90	Cu	+0.76	Pd	-0.44
NiCr	+2.81	Rh, C	+0.70	Co	-1.33
Fe	+1.98	Al, Sn	+0.42	CuNi	-3.51
W	+1.12	Pt	± 0	Bi	-7.34
Au	+0.78	AuFe	-0.17	Si	-41.46

Tabelle 1: Thermoempfindlichkeiten k_{A-Pt} verschiedener Materialien im Vergleich zu Pt im Temperaturbereich $0 - 100^\circ\text{C}$, [1] [4]

Die Thermoempfindlichkeit k_{A-B} für die Materialpaarung A-B errechnet sich dann aus der Differenz der materialspezifischen Thermoempfindlichkeiten k_{A-Pt} bzw. k_{B-Pt} :

$$k_{A-B} = k_{A-Pt} - k_{B-Pt} \quad (2)$$

Beispiel: Für das Thermopaar Cu-CuNi (Thermoelement Typ T) ergibt sich ein $k_{Cu-CuNi}$ von

$$\begin{aligned} k_{Cu-CuNi} &= k_{Cu-Pt} - k_{CuNi-Pt} \\ k_{Cu-CuNi} &= +0,76 \text{ mV}/100\text{K} - (-3,51 \text{ mV}/100\text{K}) = 4,27 \text{ mV}/100\text{K} \end{aligned} \quad (3)$$

Dementsprechend verwendet man bevorzugt für Thermoelemente Materialpaarungen, welche in der thermoelektrischen Spannungsreihe weit auseinander liegen. Zudem sind die angegebenen k_{A-B} selbst ebenfalls temperaturabhängig! Häufige technisch eingesetzte Thermopaare sind beispielsweise Fe-CuNi (Thermoelement Typ J), NiCr-Ni (Typ K) oder Pt13Rh-Pt (Typ R). Die gemessene Thermospannung ergibt sich dann aus der resultierenden Thermoempfindlichkeit der verwendeten Materialpaarung multipliziert mit der Temperaturdifferenz zwischen der Mess- und Vergleichsstelle, Bild 1:

$$U_T = k_{A-B} \cdot (T_x - T_V) \quad (4)$$

2.2.2 Widerstandsthermometer

In Metallen ist die Konzentration an freien Elektronen und damit die elektrische Leitfähigkeit im Vergleich zu Halbleitern und Isolatoren sehr groß. Der elektrische Widerstand ist im wesentlichen von der Wechselwirkung der frei beweglichen Elektronen mit den Metallionen abhängig. Durch die Temperaturerhöhung nimmt die Zahl der Stöße zwischen Elektronen und Ionen zu, wodurch der Elektronenfluss behindert wird und somit der elektrische Widerstand steigt. Widerstandsthermometer bestehen mehrheitlich aus einer Metalldrahtwicklung oder aus einer dünnen Schicht auf einem isolierten Träger (z.B. Keramik) mit einer möglichst geringer Wärmekapazität und einem Normwiderstand R_0 bei der Bezugstemperatur T_0 (gebräuchlich sind 0°C , 20°C oder 25°C). Durch die Wärmeaufnahme bei Temperaturerhöhung stellt sich bei der zu messenden Temperatur T näherungsweise der Widerstand R ein.

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + a_W \cdot (T - T_0) + b_W \cdot (T - T_0)^2) \quad (5)$$

a_W (in K^{-1}) und b_W (in K^{-2}) sind die Temperaturkoeffizienten des Widerstandsmaterials, wobei b_W betragsmäßig um mehrere Größenordnungen kleiner ist als a_W und erst bei höheren Temperaturen die Kennlinie beeinflusst.

Widerstandsthermometer gibt es überwiegend aus Platin bzw. Nickel, aber auch aus Wolfram z.B. für Anwendungen bei höheren Temperaturen. Zudem werden die Metalle auf definierte Widerstände (z.B. $R_0 = 100 \Omega$, 500Ω , $1\,000 \Omega$ oder $10\,000 \Omega$) bei einer Referenztemperatur von 0°C gebracht. Der Messstrom ist üblicherweise in Abhängigkeit vom verwendeten Normwiderstandswert kleiner als 1 mA (Pt100). Für ein Pt1000 bzw. ein Pt10000 beträgt der typische Maximalstrom zur Widerstandsmessung $0,3 \text{ mA}$ bzw. $0,1 \text{ mA}$.

Einflussfaktoren auf das Messergebnis bei Widerstandsthermometern sind neben der Temperatur:

- Leitungsfehler - zusätzlicher Widerstand der Zuleitungen
- Isolationsfehler - Widerstandsänderung durch Korrosion o.ä.
- Parasitäre Thermospannungen - unterschiedliche Metalle als Zuleitungen und abweichende Temperaturen der Messleitungen
- Eigenerwärmung - Erwärmung der Zuleitungen durch den Messstrom und damit eine Verfälschung des gemessenen Widerstands

Beispielrechnung zur Eigenerwärmung:

Angenommen durch ein Pt1000 fließt ein Messstrom von $I = 1 \text{ mA}$ bei $\vartheta = 100^\circ\text{C}$ und der Widerstand eines Pt1000 bei 100°C beträgt $R_{100^\circ\text{C}, \text{Pt1000}} = 1\,385 \Omega$. Ein typischer Eigenerwärmungskoeffizient in Luft ist $EK = 10 \text{ mW/K}$.

Dann entsteht eine Temperaturerhöhung ΔT der Zuleitungen allein durch Messstrom:

$$\Delta T = \frac{P_{el, \text{Pt1000}}}{EK} = \frac{I^2 \cdot R_{100^\circ\text{C}, \text{Pt1000}}}{EK} = 0,14 \text{ K} \quad (6)$$

Durch die quadratische Abhängigkeit der Temperaturerhöhung ΔT von der Stromstärke I kann bereits für Ströme von einigen Hundert mA eine signifikante Temperaturerhöhung des stromdurchflossenen Leiters erreicht werden, und damit ein Anstieg des gemessenen Widerstands.

Um dies zu verhindern, werden in den meisten Fällen zur Temperaturmessung Widerstandsthermometer über Wheatstonesche Brücken beschaltet bzw. Drei- bzw. Vierleiterschaltungen anstelle der einfachen Zweileiterschaltung verwendet [2, 3].

2.2.3 Thermistoren - Heiß- und Kaltleiter

Thermistoren (engl. für *thermal sensitive resistor*) bestehen aus halbleitende Keramikmaterialien aus gesinterten porösen Metalloxide, z.B. Fe_2O_3 , ZnTiO_4 , MgCr_2O_4 , deren Widerstand sich mit steigender Temperatur sehr stark ändert. Nimmt der Widerstand stark ab, werden diese Temperaturmessfühler auch **Heißleiter** (bzw. NTC-Thermistor, negative temperature coefficient) genannt, bei steigendem Widerstand **Kaltleiter** (bzw. PTC-Thermistor, positive temperature coefficient). Bei Halbleitern (Heißleiter, NTC) steigt mit zunehmender Temperatur die Konzentration der Ladungsträger im Leitungsband signifikant, und damit die Leitfähigkeit. Der Widerstand-Temperatur-Verlauf eines NTC-Thermistors kann in einem größeren Temperaturbereich durch die Gleichung:

$$R_{NTC}(T) = R_0 \cdot e^{\beta_{NTC} \cdot (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (7)$$

mit R_0 dem Normwiderstand (1 k Ω ... 1 M Ω) bei der Referenztemperatur T_0 (z.B. 297,15 K) beschrieben werden. β_{NTC} ist eine Materialkonstante (Einheit K).

Wesentlich genauer als mit Gleichung 7 kann das Temperatur-Widerstandsverhalten für den begrenzten betrachteten Temperaturbereich mit der **Steinhart-Hart-Gleichung** beschrieben werden, wobei T in Kelvin und R in Ω anzugeben sind:

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln R + C \cdot (\ln R)^3 \quad (8)$$

dabei sind A, B und C Konstanten (Steinhart-Hart-Koeffizienten, Einheit: K^{-1}). Messtechnisch können diese Koeffizienten für einen vorliegenden NTC-Widerstand wie nachfolgend bestimmt werden. Bei drei unterschiedlichen Temperaturen, z. B. 25 °C, 50 °C und 80 °C, werden die zugehörigen Widerstandswerte des NTC gemessen. Die gewählten Temperaturen sollten den untersuchten Temperaturbereich gut abdecken. Die resultierenden Wertepaare, für dieses Beispiel werden nun allgemein als $(T_{25^\circ\text{C}}; R_{25^\circ\text{C}})$, $(T_{50^\circ\text{C}}; R_{50^\circ\text{C}})$ und $(T_{80^\circ\text{C}}; R_{80^\circ\text{C}})$ bezeichnet.

Damit ergeben sich aus Gleichung (8) drei Gleichungen mit den drei unbekanntem Koeffizienten:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{25^\circ\text{C}}} &= A + B \cdot \ln R_{25^\circ\text{C}} + C \cdot (\ln R_{25^\circ\text{C}})^3 \\ \frac{1}{T_{50^\circ\text{C}}} &= A + B \cdot \ln R_{50^\circ\text{C}} + C \cdot (\ln R_{50^\circ\text{C}})^3 \\ \frac{1}{T_{80^\circ\text{C}}} &= A + B \cdot \ln R_{80^\circ\text{C}} + C \cdot (\ln R_{80^\circ\text{C}})^3 \end{aligned} \quad (9)$$

Dieses Gleichungssystem kann mit mathematischen Standardverfahren oder mit Hilfe eines PC gelöst werden [5].

Kaltleiter (PTC) sind analog zur Definition des Heißleiters Materialien, deren Widerstand mit zunehmender Temperatur steigt. Somit gehören auch Metalle zu den Kaltleitern, wobei der Temperaturkoeffizient bei halbleitenden PTCs deutlich größer und nichtlinearer als bei metallischen PTCs ist (PTC: ca. 0,05/K bis 0,70/K, Metalle: ca. 0,004/K). PTCs bestehen meist aus halbleitenden, polykristallinen Keramiken bzw. Halbleitern gefertigt (z.B. BaTiO_3 oder n-dotiertes Si), wo in einem werkstoffspezifischen Temperaturbereich mit zunehmender Temperatur eine sehr große Zunahme des Widerstandswertes von mehreren Zehnerpotenzen stattfindet. Die Ursache für diese Charakteristik liegt in einem Zusammenwirken halbleitender und ferroelektrischer Eigenschaften der Keramik [5] [6].

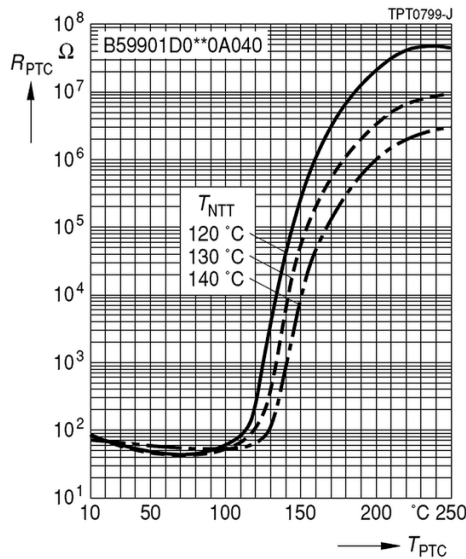


Bild 2: Beispiele der nichtlinearen Kennlinie von PTC-Thermistoren: Der steile Anstieg der Kennlinie vollzieht sich innerhalb einer sehr kleinen Temperaturdifferenz. Die Angabe T_{NTT} bedeutet dabei „nominal threshold temperature“, d.h. Schwellentemperatur, bei der der starke Widerstandsanstieg einsetzt. Nach Überschreiten einer maximalen Temperatur weist die Kennlinie den Verlauf eines NTCs auf. ©Epcos AG

Die Kennlinie eines PTC auf Siliziumbasis kann im Temperaturbereich von -30 °C bis $+130\text{ °C}$ durch ein Polynom zweiten Grades analog zu Gleichung (5) beschrieben werden:

$$R_{PTC}(T) = R_0 \cdot (1 + f_{PTC} \cdot (T - T_0) + h_{PTC} \cdot (T - T_0)^2) \quad (10)$$

2.3 Wichtige Kenngrößen eines Sensors

Neben den allgemeinen Anforderungen an jede Art von Sensoren, wie z.B. abgedeckter Temperaturbereich, geforderte Messgenauigkeit, Messumgebung, Reaktionszeit, Linearität, Alterung etc. sind folgenden Kenngrößen von großer Bedeutung.

Der **Temperaturkoeffizient** α beschreibt die relative Änderung der sensorischen Messgröße X in Folge einer Temperaturänderung dT . Er hat demnach die Einheit K^{-1} und entspricht bei linearen Abhängigkeiten dem Anstieg der Geraden. Allgemeingültig lässt er sich wie folgt darstellen:

$$\alpha = \frac{1}{X} \cdot \frac{dX}{dT} \quad (11)$$

Als **Empfindlichkeit** E bezeichnet man die Änderung der Messgröße X in Relation zum entsprechenden Temperaturintervall, Bild 3. Je größer die Empfindlichkeit, desto genauer kann z.B. die Temperaturänderung nachgewiesen werden. Sie hängt nach Vergleich mit Gleichung (11) vom Temperaturkoeffizienten α ab:

$$E = \frac{X_2 - X_1}{T_2 - T_1} \quad \text{bzw.} \quad E = \frac{dX}{dT} = \alpha \cdot X \quad (12)$$

$X = U_T$ (Thermospannung) für Thermoelemente, E in $\frac{V}{K}$ oder $\frac{mV}{100K}$
 $X = R$ (Widerstand) für Thermistoren bzw. Widerstandsthermometer, E in $\frac{\Omega}{K}$

Daneben besitzen Sensoren eine unterschiedlich stark ausgeprägte **Querempfindlichkeit**. Damit werden mögliche weitere Abhängigkeiten bezeichnet, welche ebenfalls zu einer Änderung des

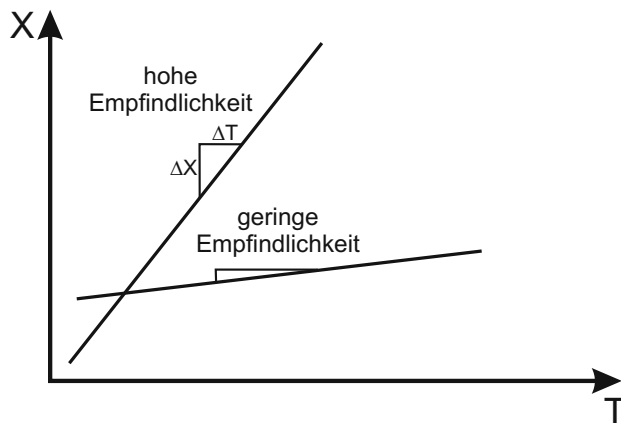


Bild 3: Definition der Empfindlichkeit am Beispiel einer linearen Abhängigkeit $X(T)$

Messsignals führen, was eine fehlerhafte Temperaturmessung bedeutet. So ändert sich beispielsweise bei einem Widerstandsthermometer ebenfalls der messbare Widerstand, wenn an diesem eine mechanische Spannung angreift, dieser also verformt wird und bei einem halbleitenden NTC- bzw. PTC-Thermistor die Leitfähigkeit unter Bestrahlung mit Licht einer gewissen Mindestwellenlänge.

3 Vorbereitungsaufgaben

1. Wie funktioniert ein Pyrometer zur Temperaturmessung und für welchen Temperaturbereich können sie eingesetzt werden?
2. Nennen Sie drei weitere Einflüsse auf den elektrischen Widerstand eines metallischen Leiters (mit konstanter Länge und Querschnittsfläche) neben der Temperatur!
3. Erläutern Sie den Leitungsvorgang in dotierten Halbleitern am Beispiel von Phosphor dotiertem Silizium in Abhängigkeit von der Temperatur?
4. Nennen Sie zwei Thermoelementpaarungen, welche für die Temperaturmessung von flüssigem Stahl in einem Hochofen geeignet sind?
5. Leiten Sie mithilfe der Gleichungen (7) und (11) die Berechnungsformel für den Temperaturkoeffizienten α_{NTC} eines NTC-Widerstands ($X = R_{NTC}(T)$) her!

4 Praktikumsaufgaben

1. Nehmen Sie die Kennlinien von einem Thermoelement Typ J, von Pt1000 und Ni1000 sowie NTC- (NTC20k Ω) und PTC-Thermistoren (KTY81-210) auf und stellen Sie diese graphisch dar!
2. Ermitteln Sie aus den aufgenommenen Kennlinien:
 - a) ...für das Thermoelement Typ J (Fe-CuNi):
 - i. die Thermoempfindlichkeit k_{A-B} nach Gleichung (4) durch Regression der erhaltenen Kennlinie!
 - ii. die Thermospannung U für $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ mittels Extrapolation der Kennlinie! Welche Bedeutung hat dieser Wert? Berücksichtigen Sie dabei den verwendeten Messaufbau im Vergleich zu Bild 1!

- b) ...für die Thermometerwiderstände Pt1000 und Ni1000:
- die linearen Temperaturkoeffizienten α_{Pt1000} bzw. α_{Ni1000} nach Gleichung (11) und vergleichen Sie diese mit Tabellenwerten, z.B. aus [7] oder aus Datenblättern.
 - aus der Regression zweiten Grades nach Gleichung (5) den extrapolierten Widerstand des Pt1000 bzw. Ni1000 bei $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ mit seinem entsprechenden Normwiderstand? Was könnten Gründe für die Abweichungen sein?
- c) ...für den NTC- und PTC-Thermistor:
- die in der Gleichung (7) bzw. (10) angegebenen Parameter β_{NTC} (NTC) bzw. f_{PTC} und h_{PTC} (PTC) durch Regression der gemessenen Kennlinie und diskutieren Sie deren Bedeutung!
Hinweis: Verwenden Sie für die graphische Darstellung und die exponentielle Regression der Kennlinie des NTC nach Gleichung (7) als Ordinate $x = (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})$. T_0 beträgt 297,15 K.
 - den Temperaturkoeffizienten α_{NTC} bzw. α_{PTC} bei $\vartheta = 30^\circ\text{C}$, 50°C und 80°C !
3. Welches der verwendeten Messverfahren eignet sich im untersuchten Temperaturbereich besonders gut für die Messung kleinster Temperaturunterschiede?
Falls es mehrere geeignete Messverfahren gibt, geben Sie den jeweiligen optimalen Temperaturbereich (von ... °C bis ... °C) an!

Nur für Stg. WSW

Bestimmen Sie zusätzlich:

4. ... für den NTC-Thermistor aus dem Parameter β_{NTC} die Bandlücke E_g (in eV) des verwendeten Halbleiter.
Hinweis: Verwenden Sie dazu den Zusammenhang: $\beta_{NTC} = E_g/(2k_B)$ mit Boltzmannkonstante $k_B = 1,380\,6 \cdot 10^{-23}$ J/K und wobei E_g der Energieabstand zwischen Fermi-niveau und Leitungsband darstellt. (Angabe E_g in eV).
5. ...für den NTC-Thermistor die Koeffizienten A , B und C entsprechend der Steinhart-Hart-Gleichungen (8) bzw. (9)
6. ...für das Thermoelement die Umgebungstemperatur $T_{Umgebung}$ als verwendete Vergleichstemperatur während der Messung nach Gleichung (4) aus der linearen Regression des Thermoelementkennlinie!

**Eine detaillierte Aufgabenstellung liegt am Versuchsplatz im
Meitnerbau, G.-Kirchhoff-Str. 5, Raum 3.2.310 aus!**

Literaturliste

- [1] BERNHARD, F. (Hrsg.): *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*. 2. Auflage. Springer-Verlag, 2014. – ISBN 978-3-642-24505-3
- [2] NAU, M.: *Elektrische Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern*. JUMO, 2007. – ISBN 978-3-935742-06-1
- [3] HESSE, S. ; SCHNELL, G.: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion – Ausführung – Anwendung*. Springer-Vieweg, 2014. – ISBN 978-3-658-05866-1

- [4] QUINN, T.J. ; SHANNON, C.: Temperature measurement and thermoelectric properties. In: GALE, W.F. (Hrsg.) ; TOTEMEIER, T.C. (Hrsg.): *Smithells Metals Reference Book*. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – ISBN 0-7506-7509-8, S. 2072
- [5] STINY, L.: *Passive elektronische Bauelemente - Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendung*. Springer Vieweg, 2015
- [6] TRÄNKLER, H.-R. (Hrsg.) ; REINDL, L. M. (Hrsg.): *Sensortechnik - Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Springer Verlag, 2014. – ISBN 978-3642299414
- [7] MERKEL, M. ; THOMAS, K.: *Taschenbuch der Werkstoffe*. 7. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig, 2008. – 704 S. – ISBN 978-3446411944
- [8] SCHATZ, W. ; POMPE, W. ; WORCH, H.: *Werkstoffwissenschaft*. 10. Auflage. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2011. – 578 S. – ISBN 978-3527323234