
Praktikum zur Meßtechnik

Versuch 22: Technische Temperaturmessung

Universität-GH Essen

Fachbereich Maschinenwesen

Institut für Meß- und Regelungstechnik

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
2 Allgemeine Eigenschaften von Temperaturlaufnehmern	3
2.1 Empfindlichkeit und Genauigkeit	3
2.2 Linearität der Sensorcharakteristik.....	3
2.3 Zeitverhalten von Temperatursensoren	3
2.4 Langzeitstabilität.....	5
3 Metallische Widerstandsthermometer.....	6
3.1 Bauformen, Werkstoffe und Wirkungsweise.....	6
3.2 Auswerteschaltungen	7
4 Halbleiter-Temperatursensoren	10
4.1 Thermistoren (Heiß- und Kaltleiter).....	10
5 Thermolemente	15
6 Versuchsanleitung	16
6.1 Sprungantworten der Aufnehmer	16
6.2 Kennlinie der Aufnehmer.....	18

1 Einleitung

Viele Vorgänge und Reaktionen in der Natur, im Labor und in der Industrie werden durch die Temperatur beeinflusst. Zum einen ist in allen verfahrens- und energietechnischen Prozessen die Einhaltung bestimmter Temperaturen von grundlegender Bedeutung für den Prozeßablauf, zum anderen ist die Temperatur häufig eine störende Einflußgröße bei der Messung anderer physikalischer Größen wie Druck, Längen usw. Der Temperaturmessung kommt daher eine außerordentliche Bedeutung zu, sowohl zur direkten Messung der Temperatur als auch zur Korrektur von Temperatureinflüssen.

Im vorliegenden Praktikumsversuch werden die physikalischen Funktionsprinzipien der wichtigsten aktiven und passiven Temperatursensoren erläutert und deren Übertragungsverhalten meßtechnisch untersucht. Elektronische Auswerteschaltungen sowie einfache Linearisierungsverfahren werden ebenfalls behandelt.

2 Allgemeine Eigenschaften von Temperaturlaufnehmern

Zu den wichtigsten Anforderungen, die an Temperaturlaufnehmer (und Sensoren allgemein) gestellt werden, zählen statische Übertragungseigenschaften wie Empfindlichkeit, Genauigkeit, sowie dynamische Übertragungseigenschaften wie Ansprechgeschwindigkeit, Zeitkonstante, Linearität und Langzeitstabilität.

2.1 Empfindlichkeit und Genauigkeit

Die Begriffe Empfindlichkeit und Genauigkeit sind sorgfältig zu unterscheiden. Die *Empfindlichkeit* ist definiert als die erzielte Signaländerung pro Temperatureinheit. Sie ist maßgeblich für die Auflösung der Meßwerte, sagt aber über die Genauigkeit der Messung nichts aus. Unter dem Begriff *Genauigkeit* versteht man die maximal zulässigen Abweichungen der Meßwerte von den Ist-Werten der Meßgröße, also die zulässigen Fehlergrenzen. Die Genauigkeit wird zu einem gewissen Grad durch die Empfindlichkeit beeinflusst, da eine geringe Empfindlichkeit wegen der notwendigen Signalverstärkung zusätzliche Fehler verursachen kann.

2.2 Linearität der Sensorcharakteristik

Der durch die Kennlinie gegebene Zusammenhang zwischen Temperatur- und Signaländerungen ist bei einigen Sensortypen extrem nichtlinear. Dabei ist zu beachten, daß Abweichungen von der Linearität zusätzliche Fehler hervorrufen, sofern sie bei der Auswertung des Meßsignals nicht berücksichtigt werden. Bei den nichtlinearen Sensortypen kann die Kennlinie linearisiert werden, allerdings muß man dafür eine Herabsetzung der Empfindlichkeit in Kauf nehmen.

2.3 Zeitverhalten von Temperatursensoren

Da der Wärmeaustausch zwischen Temperaturfühler und Umgebung Zeit erfordert, tritt bei Thermometern eine Verzögerung in der Anzeige auf. Diese Zeitverzögerung hängt hauptsächlich vom Aufbau des Temperaturfühlers ab, z. B. von der Unterbringung des Sensors in einer mehr oder weniger großen Schutzröhre. Allgemein gilt, daß die Ansprechgeschwindigkeit eines Temperaturfühlers um so größer ist, je kleiner seine geometrischen Abmessungen sind. Unter Umständen ist auch die Anzeigeverzögerung der angeschlossenen Meßinstrumente zu beachten. Vor allem bei der Messung schnell veränderlicher Temperaturen muß die Anzeigeverzögerung hinreichend klein sein.

Zur Darstellung des Zeitverhaltens wird üblicherweise die *Sprungantwort* herangezogen. Dies ist der zeitliche Verlauf des Meßsignals, wenn ein auf der Temperatur ϑ_1 befindlicher Temperaturfühler plötzlich der Temperatur ϑ_2 ausgesetzt wird. Geht man davon aus, daß sich der Fühler wie ein System 1. Ordnung verhält, so verläuft der Temperaturengleich nach einer Exponentialfunktion gemäß

$$\Delta\vartheta(t) = \Delta\vartheta_0(1 - e^{-t/\tau})$$

mit $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_1$ und $\Delta\vartheta_0 = \vartheta_2 - \vartheta_1$. Der Verlauf ist in der folgenden Abbildung wiedergegeben.

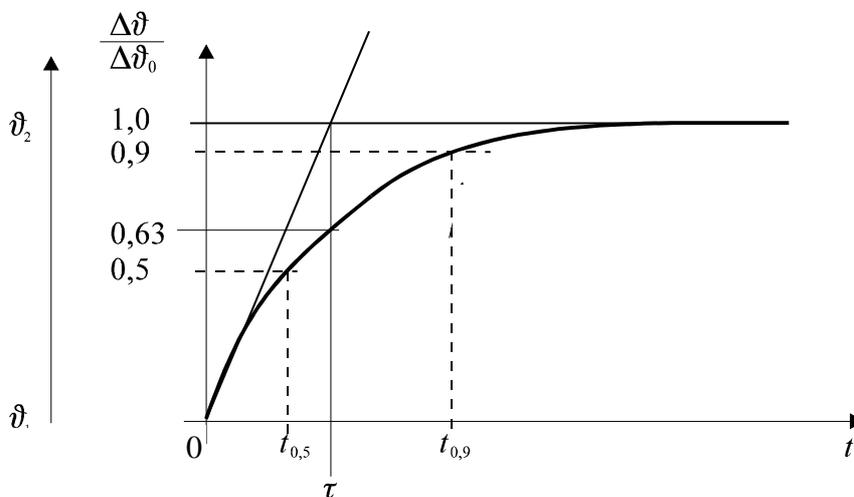


Abbildung 2.1: Zeitverlauf eines Temperaturüberganges 1. Ordnung

Dabei wird τ als *Zeitkonstante* bezeichnet und ist die Zeit, in der sich die Anzeige des Thermometers um $1 - e^{-1} = 63,2\%$ der Differenz zwischen ϑ_1 und ϑ_2 geändert hat.

Weitere Kenngrößen des Zeitverhaltens sind die *Halbwertzeit* $t_{0,5}$ und die *9/10-Wertzeit* $t_{0,9}$. Die Halbwertzeit bzw. 9/10-Wertzeit ist die Zeit, in der sich die Anzeige des Thermometers um die Hälfte bzw. 9/10 der Differenz $\Delta\vartheta_0$ zwischen der neuen und der ursprünglichen Temperatur geändert hat. Es gelten folgende Beziehungen:

$$t_{0,5} = 0,693 \cdot \tau \text{ und}$$

$$t_{0,9} = 2,303 \cdot \tau.$$

Es gilt $\frac{t_{0,9}}{t_{0,5}} = 3,32$. Ist die Sprungantwort eine reine Exponentialfunktion, so ist das Zeitverhalten durch die Zeitkonstante τ eindeutig charakterisiert.

Bei praktischen Messungen weicht die Sprungantwort jedoch unterschiedlich stark von der Exponentialform ab, d. h. $\frac{t_{0,9}}{t_{0,5}} \neq 3,32$. Dieses ist darauf zurückzuführen, daß die Anstiegs- geschwindigkeit von verschiedenen Parametern abhängt, insbesondere vom Wärmeübergang von der zu messenden Materie auf das Thermometer und von der mittleren Wärmeleitfähigkeit des Thermometers selbst. Auch spielen die geometrischen Abmessungen und die Oberflächengestaltung des Thermometers eine Rolle. Bei Thermometern, deren Verhältnis $\frac{t_{0,9}}{t_{0,5}}$ zwischen 2,3 und 5 liegt, kann das Zeitverhalten mit Hilfe zweier Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 recht gut beschrieben werden:

$$\Delta\vartheta(t) = \Delta\vartheta_0 \left[1 - C e^{-t/\tau_1} - (1-C) e^{-t/\tau_2} \right].$$

Die Ermittlung der beiden Zeitkonstanten und des Parameters C aus gemessenen Punkten der Sprungantwort läuft allerdings auf ein nichtlineares Gleichungssystem hinaus, welches nur mit numerischen Methoden gelöst werden kann.

2.4 Langzeitstabilität

Umwelteinflüsse wie chemische, thermische und mechanische Einwirkungen führen dazu, daß sich die Kennlinie eines Sensors im Laufe der Zeit verändert. Man spricht in diesem Zusammenhang von der *Langzeitstabilität* oder *Langzeitkonstanz* des Sensors. Für hochpräzise Messungen ist meist ein regelmäßiges Nachkalibrieren der Aufnehmer erforderlich.

3 Metallische Widerstandsthermometer

3.1 Bauformen, Werkstoffe und Wirkungsweise

Beim Widerstandsthermometer wird die temperaturabhängige Änderung des elektrischen Widerstandes als ein Maß für die Temperatur benutzt. Die Meßwiderstände werden aus metallischen Werkstoffen gefertigt, vorzugsweise aus Platin und Nickel.

Die Temperaturabhängigkeit des Widerstands R wird beschrieben durch die Gleichung

$$R(\vartheta) = R_0 \left[1 + A(\vartheta - \vartheta_0) + B(\vartheta - \vartheta_0)^2 \right].$$

Dabei ist ϑ die Temperatur in °C und R_0 der Widerstand bei der Bezugstemperatur ϑ_0 . A und B sind Materialkonstanten. In der Praxis wird fast ausschließlich Platin als Werkstoff für Meßwiderstände verwendet.

Ein genormter Platinwiderstand für industrielle Anwendungen ist das Pt 100-Element, welcher bei der Bezugstemperatur $\vartheta_0 = 0 \text{ °C}$ den Widerstand $R_0 = 100 \text{ } \Omega$ aufweist. Die Koeffizienten A und B betragen für Platin $A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ und $B = -0,580195 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$. Für überschlägige Berechnungen ersetzt man die Koeffizienten A und B durch den *mittleren Temperaturkoeffizienten* α für den Bereich von 0 °C bis 100 °C :

$$\alpha = \frac{R(100 \text{ °C}) - R_0}{100 \text{ K} \cdot R_0} = A + 100 \text{ K} \cdot B = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Dann gilt für den Bereich 0 °C und 100 °C die Näherung

$$R(\vartheta) \approx R_0 \left[1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0) \right].$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich die gemessene Temperatur ϑ zu

$$\vartheta = \frac{R(\vartheta) - R_0}{\alpha R_0} + \vartheta_0.$$

Für Nickel ist der mittlere Temperaturkoeffizient $\alpha = 6,17 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ und für Kupfer $\alpha = 4,27 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Der wesentliche Vorteil von Platin liegt in seiner außerordentlich hohen Langzeitstabilität, da Platin ein chemisch sehr stabiles Material ist. Allerdings hat man bei Platin eine nicht unerhebliche Abweichung von der Linearität. Im Gegensatz dazu weist Kupfer einen fast vollkommenen linearen Widerstandsverlauf im Bereich von -50 °C ... $+150 \text{ °C}$ auf, ist jedoch

wegen seiner schlechten chemischen Beständigkeit und seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit (Materialaufwand) ungeeignet für die Fertigung von Meßwiderständen. Nickel hat eine noch größere Nichtlinearität als Platin, dafür aber einen höheren Temperaturkoeffizienten und eignet sich so für hochauflösende Messungen.

3.2 Auswerteschaltungen

Die Auswerteschaltungen für Widerstandsthermometer beruhen im wesentlichen auf der Wheatstoneschen Brückenschaltung, welche im *Ausschlagverfahren* betrieben wird. Im Gegensatz zum Abgleichverfahren findet hier kein Nullabgleich statt, sondern die Verstimmung der Brücke dient als Maß für die zu messende Temperatur. Grundsätzlich wird beim Ausschlagverfahren die Anzeige durch den Zuleitungswiderstand beeinflusst, so daß dieser Einfluß berücksichtigt bzw. eliminiert werden muß.

3.2.1 Brückenschaltung im Ausschlagverfahren

Wir betrachten im folgenden eine sogenannte *Viertelbrücke*, bei der ein Brückenweig mit einem Pt 100 bestückt ist.

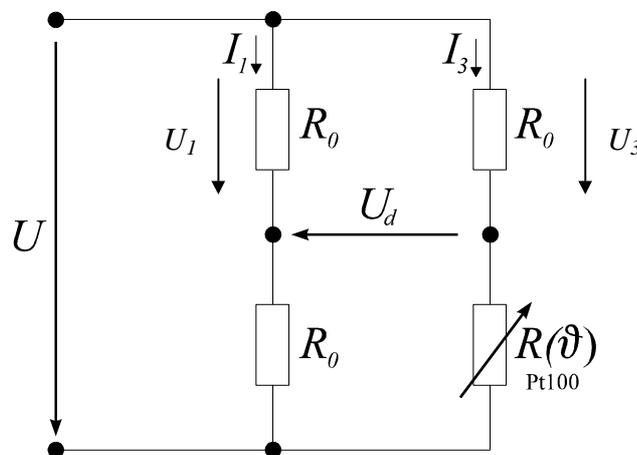


Abbildung 3.1: Viertelbrücke

Die übrigen Brückenweige sind mit dem Nennwiderstand $R_n = 100 \Omega$ schaltet. Nach der vereinfachten Beziehung ergibt sich für den Sensor der Widerstand

$$R(\vartheta) = R_0(1 + x) \quad \text{mit} \quad x = \alpha(\vartheta - \vartheta_0).$$

Unter der Voraussetzung, daß das Meßgerät im Diagonalzweig die Brücke nicht belastet (dieses kann durch Vorschalten eines hochohmigen Meßverstärkers erreicht werden), gilt für die Diagonalspannung U_d :

$$U_d = U_1 - U_2 = U \left(\frac{R_0}{2R_0} - \frac{R_0}{R_0 + R_0(1+x)} \right) \text{ bzw.}$$

$$U_d = \frac{U}{2} \cdot \frac{x}{x+2}.$$

Man erkennt, daß das Ausgangssignal der Brückenschaltung in einem *nichtlinearen* Zusammenhang zur Widerstandsänderung des Sensors steht.

Die Empfindlichkeit der Brücke kann verbessert werden, indem man diagonal gegenüberliegende Brückenarme mit Pt 100-Sensoren beschaltet, welche beide die gleiche Temperatur messen. Da in diesem Fall die Hälfte der Brückenarme mit Sensoren bestückt ist, spricht man von einer *Halbbrücke*.

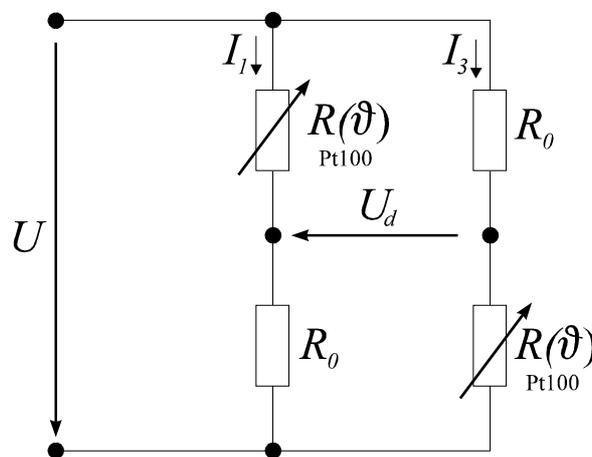


Abbildung 3.2: Halbbrücke

Hier ergibt sich die Diagonalspannung zu

$$U_0 = U \cdot \frac{x}{x+2},$$

d.h. an der Nichtlinearität hat sich nichts geändert, lediglich die Ausgangsspannung ist doppelt so groß wie bei der Viertelbrücke.

3.2.2 Linearisierte Auswertelektronik zum Pt 100

Für den vorliegenden Praktikumsversuch wurde eine Auswerteschaltung aufgebaut, deren Ausgangsspannung U_A direkt proportional zu der gemessenen Temperatur in °C ist. Das Kernstück dieser Schaltung ist eine aktive Brücke.

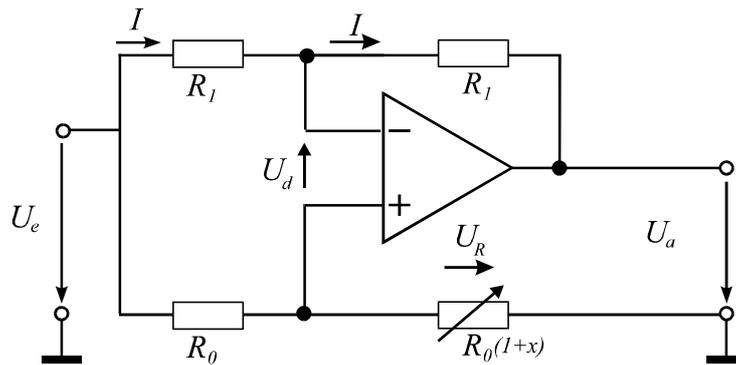


Abbildung 3.3: aktive Brückenschaltung

Nach der Spannungsteilerregel ist mit $x = \alpha(\vartheta - \vartheta_0)$

$$U_R = U_e \cdot \frac{R_0(1+x)}{R_0 + R_0(1+x)} = U_e \cdot \frac{1+x}{2+x}.$$

Die Gegenkopplung (Rückführung von U_A auf den invertierenden Eingang) bewirkt, daß die Differenzeingangsspannung U_d zu Null wird. Somit gilt:

$$I = \frac{U_e - U_R}{R_1} = \frac{U_R - U_a}{R_1} \quad \text{bzw.} \quad U_a = 2U_R - U_e.$$

Wegen $U_R = U_e(1+x)/(2+x)$ ergibt sich die Ausgangsspannung zu

$$U_a = U_e \cdot \frac{x}{x+2}.$$

Die aktive Brücke bietet den Vorteil, daß ein stromloses Messen von U_A nicht erforderlich ist. Deshalb ist es möglich, die Ausgangsspannung U_A auf den Eingang zurückzuführen und dadurch eine Linearisierung der Brücke zu erreichen. Die vollständige Schaltung zeigt Abbildung 3.4.

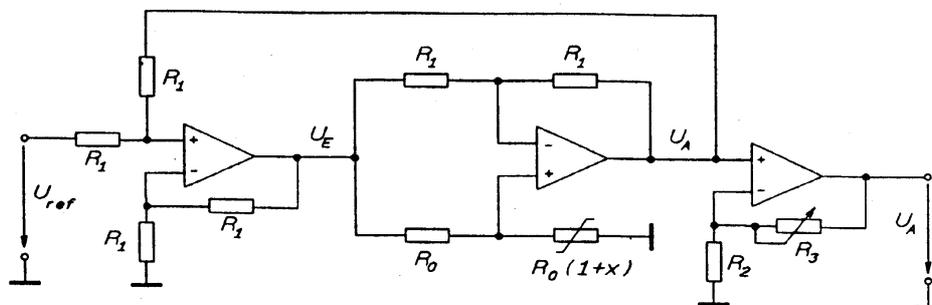


Abbildung 3.4: vollständige Auswertelektronik zum Pt 100

4 Halbleiter-Temperatursensoren

Im Vergleich zu den metallischen Widerstandsthermometern erreicht man mit Halbleiter-Temperatursensoren eine wesentlich höhere Empfindlichkeit, jedoch muß man dafür ein stark nichtlineares Verhalten in Kauf nehmen. Durch die heutigen Möglichkeiten der digitalen Meßsignalverarbeitung können die Nichtlinearitäten relativ problemlos gehandhabt werden, wenn der Verlauf der Kennlinie hinreichend gut bekannt ist.

4.1 Thermistoren (Heiß- und Kaltleiter)

Heißleiter und Kaltleiter bestehen aus einer Mischung von Oxiden, die durch Pressen in Formen und Sintern ihre Bauform erhalten. Gängige Bauformen sind Scheiben, Platten, Stäbe, Ringe und Perlen.

4.1.1 Heißleiter (NTC-Widerstände)

Die Wirkungsweise der Halbleiter beruht auf dem Halbleitereffekt, d. h. auf der Tatsache, daß bei Halbleitermaterialien die Anzahl der freien Ladungsträger mit steigender Temperatur zunimmt. Dadurch verringert sich der elektrische Widerstand, d.h. der Temperaturkoeffizient ist negativ. Deshalb werden Heißleiter als NTC-Widerstände (negative temperature coefficient) bezeichnet. Ein typischer Kennlinienverlauf ist in der nächsten Abbildung dargestellt.

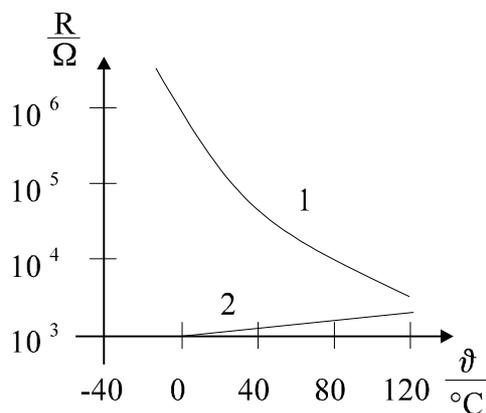


Abbildung 4.1: Widerstand eines Heißleiters (1) und eines Platin-Widerstandsthermometers (2)

Für die mathematische Beschreibung der Kennlinie gibt es verschiedene empirisch ermittelte Ansätze. Die geläufigste Näherungsformel lautet

$$R(T) = R_0 \cdot e^{\left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]}$$

wobei T die Temperatur in Kelvin und R_0 der Widerstand bei der Temperatur T_0 ist. B ist eine Materialkonstante und liegt in der Größenordnung von 3000 K.

Die Definition des Temperaturkoeffizienten lautet wie folgt:

$$R(T + dT) = R(T)[1 + \alpha dT] = R(T) + \alpha R(T) dT.$$

Daraus folgt:

$$\alpha = \frac{R(T + dT) - R(T)}{R(T)dT} = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}.$$

Der Temperaturkoeffizient des Heißleiters ergibt sich zu

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2}.$$

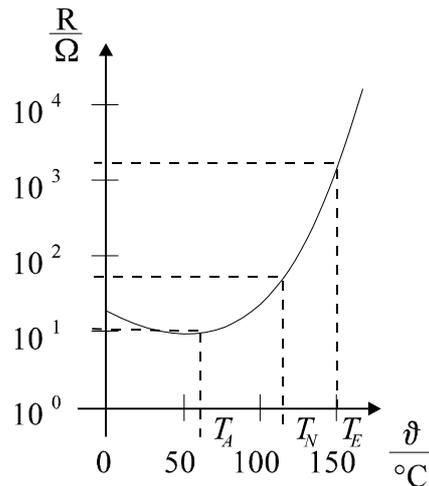
Die bestmögliche mathematische Beschreibungsform der Heißleiterkennlinie ist die Gleichung nach Steinhart und Hart. Sie lautet:

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c[\ln(R)]^3.$$

Dabei sind die Koeffizienten a , b und c für jeden Sensor individuell zu ermitteln. Diese Kalibrierung erfolgt durch hochpräzise Messung dreier Kennlinienpunkte, welche definierende Fixpunkte der Internationalen Temperaturskala (ITS 90) sind und mit Hilfe von Fixpunktzellen dargestellt werden. Die Koeffizienten erhält man dann als Lösung eines linearen Gleichungssystems.

4.1.2 Kaltleiter (PTC-Widerstände)

Kaltleiter (PTC-Widerstände, positive temperature coefficient) bestehen aus polykristalliner ferroelektrischer Keramik, z. B. Bariumtitanat. Die Kennlinie fällt zunächst ab (Halbleitereffekt), aber oberhalb der Curietemperatur T_A bilden sich zwischen den Korngrenzen Sperrschichten aus, und es kommt zu einem Steilanstieg des elektrischen Widerstands. In diesem Bereich ist der Temperaturkoeffizient positiv.


Abbildung 4.2: Kaltleiterkennlinie

Im Bereich zwischen der Nenntemperatur T_N und der Endtemperatur T_E verläuft die Kennlinie näherungsweise exponentiell

$$R(T) = R_0 \cdot e^{[\alpha(T-T_0)]},$$

wobei R_0 der Widerstand bei der Nenntemperatur $T_0 = T_N$ ist. In diesem Bereich ist der Temperaturkoeffizient

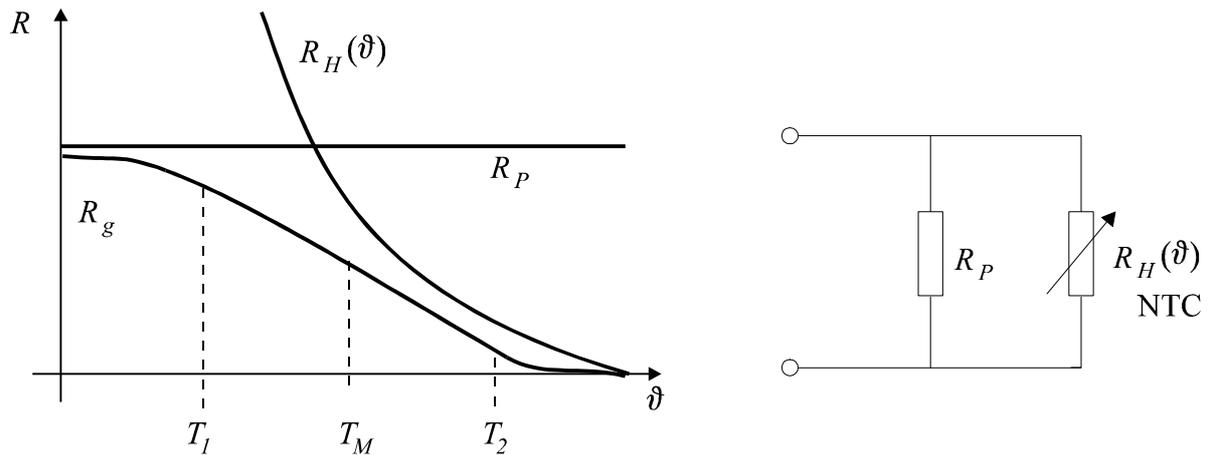
$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}$$

temperaturunabhängig und liegt in der Größenordnung von 100 K^{-1} bis 300 K^{-1} . Somit weisen Kaltleiter eine sehr hohe Empfindlichkeit auf. Wegen der starken Streuung der Kennlinien und der sehr schlechten Langzeitstabilität eignen sie sich jedoch kaum für Meßzwecke. Sie werden hauptsächlich für Überwachungs- und Regelungsaufgaben eingesetzt (z.B. zur Füllstandsüberwachung).

4.1.3 Kennlinien-Linearisierung

Zur analogen Weiterverarbeitung des Meßsignals ist es zweckmäßig, die Thermistorkennlinie zu linearisieren, was durch einfache Reihen- oder Parallelschaltung eines Widerstandes zum Sensor erreicht werden kann. Der Nachteil dieses Verfahrens ist die erhebliche Herabsetzung der Empfindlichkeit.

Als Beispiel betrachten wir die Linearisierung einer Heißleiterkennlinie durch Parallelschalten eines Widerstandes.


Abbildung 4.3: Widerstandslinearisierung durch Parallelwiderstand

Der Gesamtwiderstand $R_g(T)$ der Parallelschaltung beträgt

$$R_g(T) = \frac{R_p \cdot R_H(T)}{R_p + R_H(T)} \text{ mit}$$

$$R_H(T) = R_0 \cdot e^{\left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]}$$

Die Verläufe von $R_H(\vartheta)$ und $R_g(\vartheta)$ sind oben dargestellt. Für sehr hohe Werte von R_H ist R_g ungefähr gleich R_p . Dagegen schmiegt im Bereich höherer Temperaturen $R_g(\vartheta)$ an die Thermistorkennlinie an.

Durch geeignete Dimensionierung des Parallelwiderstands R_p kann man erreichen, daß die Kennlinie in einem bestimmten Temperaturbereich nahezu linear verläuft. Will man für einen bestimmten Bereich $T_1 \leq T \leq T_2$ Linearisierung erreichen, dann muß der Parallelwiderstand so dimensioniert sein, daß die Punkte $(T_1, R_g(T_1))$, $(T_M, R_g(T_M))$ und $(T_2, R_g(T_2))$ auf einer Geraden liegen. Dabei ist T_M die Mitte des Meßbereichs.

Bei Linearität muß gelten:

$$\frac{R_g(T_1) - R_g(T_M)}{\Delta T} = \frac{R_g(T_M) - R_g(T_2)}{\Delta T} \text{ mit}$$

$$\Delta T = T_M - T_1 = T_2 - T_M.$$

Daraus folgt die Bedingung

$$R_g(T_1) + R_g(T_2) - 2R_g(T_M) = 0.$$

Durch Einsetzen der Ausdrücke für die Parallelschaltung von R_H und R_p in diese Gleichung und Freistellen nach R_p erhält man für den Parallelwiderstand R_p die Dimensionierungsgleichung

$$R_p = \frac{R_H(T_M)[R_H(T_1) + R_H(T_2)] - 2R_H(T_1)R_H(T_2)}{R_H(T_1) + R_H(T_2) - 2R_H(T_M)}.$$

5 Thermoelemente

Thermoelemente sind aktive Sensoren, bei denen ein Temperaturunterschied zwischen zwei Punkten (Meß- und Vergleichsstelle) eine elektrische Spannung hervorruft, die in erster Näherung der Temperaturdifferenz proportional ist. Mit ihnen sind Messungen auch bei sehr hohen Temperaturen möglich (bis ca. 2000 °C). Außerdem ermöglichen sie eine punktförmige Temperaturerfassung und erreichen außerordentlich hohe Ansprechgeschwindigkeiten.

Als Nachteil ist zu nennen, daß nur Temperaturdifferenzmessungen möglich sind, d. h. man benötigt eine Vergleichsstelle mit bekannter Temperatur (z. B. Eiswasser). Darüber hinaus stellt die kleine Ausgangsspannung von Thermoelementen hohe Anforderungen an den Folgeverstärker (hohe Eingangsimpedanz, gute Linearität und geringe Nullpunktdrift).

Da diese Sensoren in diesem Praktikumsversuch nicht eingesetzt werden, wird auf sie nicht näher eingegangen.

6 Versuchsanleitung

6.1 Sprungantworten der Aufnehmer

Bei diesem Versuchsteil sollen die Sprungantworten der verschiedenen Aufnehmer mit einem x-y-Schreiber aufgezeichnet werden. Hierzu werden verschiedene Temperaturpotentiale benötigt. Die Sprungantwort ergibt sich, wenn man den entsprechenden Sensor (schnell) von der einen zur anderen Temperatur bringt. Im vorliegenden Versuch wird ein Gefäß mit Eiswasser gefüllt, um sehr genau 0 °C zu erhalten. Ein zweites Gefäß mit heißem Wasser ergibt dann das zweite Temperaturpotential.

6.1.1 Erzeugung zweier Temperaturen

Um eine Temperatur von 0 °C zu erhalten, werden das am Versuch befindliche Becherglas mit Eis und die Zwischenräume anschließend mit möglichst *wenig* kaltem Wasser gefüllt.

Für die zweite Temperatur wird eine Thermosflasche mit möglichst heißem Wasser befüllt. Solange sich kein Sensor in der Flasche befindet, sollte sie verschlossen werden, damit die Temperatur des Wassers nicht zu schnell abfällt.

6.1.2 Versuchsaufbau

Um die Temperatur der Thermosflasche während der Versuchsdurchführung zu messen, wird ein Pt 100 zusammen mit einem Philips-Multimeter als Temperaturmeßgerät eingesetzt. Der Fühler wird zu Beginn der Messungen in die Thermosflasche gebracht. Bei jeder späteren Messung auf diesem Temperaturniveau ist die angezeigte Temperatur in das Versuchsprotokoll aufzunehmen.

Zur Protokollierung der Sprungantworten der verschiedenen Aufnehmer werden diese alle über den Meßstellenumschalter mit der Meßbrücke verbunden. Der Ausgang der Meßbrücke wird dann mit dem y-Eingang des x-y-Schreibers verbunden. In x-Richtung soll nun die Zeit aufgetragen werden. Um allerdings den steilen Anstieg noch darstellen zu können, wenn der Sensor auf das höhere Temperaturniveau gebracht wird, muß der Vorschub in x-Richtung schneller erfolgen, als der Schreiber mit der eingebauten Zeitablenkung erfassen kann. Außerdem wäre dafür ein langes Stück Endlospapier notwendig. Um hier zu sparen und die Messung dennoch zu ermöglichen (zur Feststellung der Zeit $t_{0,5}$ ist eine Beobachtung über einen großen Zeitraum notwendig) wird der x-Eingang mit einer Sägezahnspannung betrieben. Auf

diese Art werden die aufeinanderfolgenden Kurvenstücke übereinander aufgetragen; aus der Frequenz der Sägezahnspannung und der Zahl der Kurvenstücke lassen sich die Zeiten eindeutig ablesen.

6.1.3 Messung

Es sollen jetzt die Sprungantworten für das Pt 100-Element und der NTC-Sensor aufgenommen werden. Der Widerstandsbereich des PTC liegt außerhalb des Bereiches, der mit der Meßbrücke noch erfaßt werden kann. Eine Aufnahme der Sprungantwort ist uns hierfür also nicht möglich.

Die Sägezahnspannung ist am Funktionsgenerator mit Hilfe des Oszilloskopes auf eine Frequenz von 0,5 Hz und im Bereich von 0...+5 V einzustellen. Um eine Aufzeichnung durch den Schreiber zu unterdrücken, wird in dieser Zeit für den x-Eingang Zero gewählt. Nach erfolgter Einstellung kann der Funktionsgenerator durch „*Mode: Trig*“ gestoppt werden. Um mit der Messung beginnen zu können, ist wieder „*Mode: Cont*“ einzustellen.

Der Schreiber wird auf eine x-Ablenkung von 0,2 V/cm sowie eine y-Ablenkung 0,2 V/cm für die Messung am Pt 100 und von 1 V/cm für die Messung mit dem NTC gestellt.

Vor Beginn jeder Messung wird der entsprechende Sensor in das Eiswasser gesteckt. Nach erfolgtem Temperatúrausgleich wird der Stift mittels des Einstellknopfes an der Meßbrücke sowie des Reglers „Adjust“ am entsprechenden Eingang des Schreibers eingestellt, und zwar für den Pt 100 am unteren Rand des Papiers (ansteigender Widerstandswert bei Temperaturerhöhung) und für den NTC am oberen Papierrand (abfallender Widerstandswert). Bei der Aufnahme der Sprungantwort des NTC darf die Temperatur in der Thermosflasche höchstens 60°C betragen, da ansonsten der größte Bereich des Schreibers für die vollständige Aufnahme der Sprungantwort nicht mehr ausreicht.

Nachdem alle Einstellungen erfolgt und notiert sind, wird der Stift auf das Papier gesenkt (*Pen down*) und der jeweilige Aufnehmer vom Eiswasser in die Thermosflasche gesteckt. Gleichzeitig wird der Schreiber gestartet (am Funktionsgenerator *Mode* auf *cont* schalten). Es wird jetzt die Sprungantwort des Sensors aufgenommen. Sobald sich am Schreiber ein einigermaßen konstanter Wert eingestellt hat, wird der Sägezahngenerator wieder gestoppt und anschließend die aktuelle Temperatur in der Thermosflasche am Multimeter abgelesen und

notiert. Anschließend wird der gesamte Vorgang für den zweiten Sensor wiederholt. (y-Range des Schreibers anpassen!)

6.1.4 Auswertung

Aus den beiden aufgenommenen Sprungantworten sollen nun die Zeiten $t_{0,5}$ sowie $t_{0,9}$ bestimmt werden. Mit Hilfe der in Kapitel 3.2.1 angegebenen Verhältnisse ist festzustellen, inwiefern die aufgenommenen Sprungantworten durch reine Exponentialfunktionen zu beschreiben sind.

6.2 Kennlinie der Aufnehmer

Um die Kennlinien der verschiedenen Aufnehmer zu bestimmen, wird ihr Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen. Hierzu ist die Temperatur in der Thermosflasche durch Abgießen von heißem Wasser und Hinzufügen von kaltem mit Hilfe der am Versuch befindlichen Spitze langsam und schrittweise herunterzusetzen. Die Temperatur im Gefäß wird durch ein Temperaturmeßgerät überprüft. Der elektrische Widerstand der Sensoren wird direkt mit einem Widerstandsmeßgerät bestimmt.

6.2.1 Messung

Die einzelnen Aufnehmer werden über den Meßstellenumschalter direkt mit dem Widerstandsmeßgerät verbunden und alle zusammen in die Thermosflasche gebracht. Nachdem sich eine weitgehend konstante Temperatur eingestellt hat (notieren), werden der Reihe nach die Widerstandswerte für alle Aufnehmer bestimmt und protokolliert. Für den NTC sind zusätzlich vier mögliche Beschaltungen bereits im Meßstellenumschalter realisiert. Hiervon sind zwei auszuwählen und im folgenden stets mit aufzunehmen. Anschließend ist die Temperatur am Ende der Meßreihe zu notieren (zur Kontrolle der Eigenabkühlung).

Nachdem die Messung für eine Temperatur komplett erfolgt ist, wird ein neues Temperaturniveau eingestellt. Dazu sind mit Hilfe einer Spritze 10 ml Wasser aus der Thermosflasche zu entnehmen und durch die gleiche Menge Eiswasser zu ersetzen. (Unterhalb 25 °C sollten jeweils 20 ml ausgetauscht werden, da die Schritte sonst zu klein werden und die Messung zu lange dauert.) Anschließend wird mit den Aufnehmern *vorsichtig* das Wasser in der Thermosflasche gemischt. Nach erfolgtem Temperatúrausgleich werden wieder die Temperatur, die Widerstandswerte sowie die Temperatur am Ende der Messungen notiert. Diese Messungen

werden bis zu einer Temperatur von etwa 10 °C fortgesetzt. Zusätzlich wird dann der Wert für 0 °C aufgenommen (dazu die Aufnehmer in das Becherglas mit dem Eiswasser bringen).

6.2.2 Auswertung

Ist die Messung beendet, so werden die Kennlinien der einzelnen Aufnehmer gemeinsam auf Millimeterpapier gezeichnet. Welche Folgerungen lassen sich daraus für den Einsatz der verschiedenen Sensoren in den unterschiedlichen Temperaturbereichen (Empfindlichkeit) ziehen?

Am Ende des Versuches sind Becherglas und Thermosflasche zu leeren und auf jeden Fall der Behälter für die Eiswürfel wieder mit Wasser zu füllen und in das Gefrierfach zu stellen. Ebenso ist darauf zu achten, daß sich die Verschlussskappe *auf* dem Stift des Schreibers befindet.