

WS/SS 19....-	Universität Hannover Institut für Elektrowärme	Name:	
	Elektrowärmelabor I	Matr.-Nr.:	
Versuch T6	Temperaturmessung und -kompensation mit Halbleitern	Dat.:	Gr.:
		Testat:	
Versuchsleiter:			

Inhalt

1	Theoretische Grundlagen	
1.1	Temperaturmessung mit Halbleitern	Seite 2
1.1.1	Heißleiter (NTC)	Seite 2
1.1.2	Kaltleiter (PTC)	Seite 5
1.1.3	Silizium-Diode	Seite 6
1.1.4	Integrierte Meßfühler	Seite 8
1.2	Temperaturkompensation von bipolaren Transistoren	Seite 9
1.2.1	Temperaturkompensation mit linearen Bauelementen	Seite 10
1.2.2	Temperaturkompensation mit nichtlinearen Bauelementen	Seite 12
2	Versuchsdurchführung	
2.1	Aufnahme der Vergleichs-Temperatur	Seite 15
2.2	NTC-Kennlinie	Seite 16
2.3	Temperaturdurchgriff bei einer Silizium-Diode	Seite 18
2.4	Temperaturkompensation bei Transistoren	Seite 18
3	Aufgabenstellung	Seite 19
4	Weiterführende Literatur	Seite 19

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Temperaturmessung mit Halbleitern

1.1.1 Heißeleiter (NTC)

Heißeleiter, oder NTC-Widerstände (*Negative Temperature Coefficient*), sind Halbleiterwerkstoffe, deren Temperaturkoeffizient α_R negativ ist. Das bedeutet, daß ihr Widerstandswert mit steigender Temperatur abnimmt. Als Ursache hierfür ist der Leitungsmechanismus von Halbleitern zu sehen. Mit steigender Temperatur steigt auch die thermische Energie der Ladungsträger. Immer mehr Ladungsträger werden aus dem Kristallverband gelöst und können die Energiedifferenz zwischen Valenzband und Leitungsband überwinden. Werkstoffe für Heißeleiter sind Metalloxide bzw. oxidische Mischkristalle. Die Änderung des Widerstandes liegt bei ca. $-(2...6) \%/K$.

Frage 1: Was ist ein Halbleiter ?

Im Zusammenhang mit temperaturabhängigen Widerständen spricht man auch von Thermistoren (*Thermally sensitive resistor*). Abb.1 zeigt den charakteristischen Verlauf des Widerstandswertes eines NTC's in Abhängigkeit von der Temperatur. Zu beachten ist, daß die Ordinate in logarithmischem Maßstab dargestellt ist. Die Gleichung, die den Widerstandsverlauf in guter Näherung beschreibt, ist (1).

$$R_T = A \cdot \exp\left[\frac{B}{T}\right] \quad (1)$$

T : absolute Temperatur des Halbleiters

R_T : Widerstand bei der Temperatur T [K]

A : Konstante die von der äußeren Form des NTC's abhängt

B : Regelkonstante, materialabhängig

Die Regelkonstante B ist ein Maß für den Grad der Temperaturabhängigkeit des NTC's. Sie kann nicht, wie in (1) angenommen, als konstant angenommen werden, da sie ebenfalls temperaturabhängig ist. Ist das Temperaturintervall nicht zu groß, indem gemessen wird, kann sie allerdings hier als konstant vorausgesetzt werden. Nach der DIN 44 070 wird sie auf zwei Temperaturen, $\vartheta_1 = 25^\circ C$ und $\vartheta_2 = 85^\circ C$, bezogen.

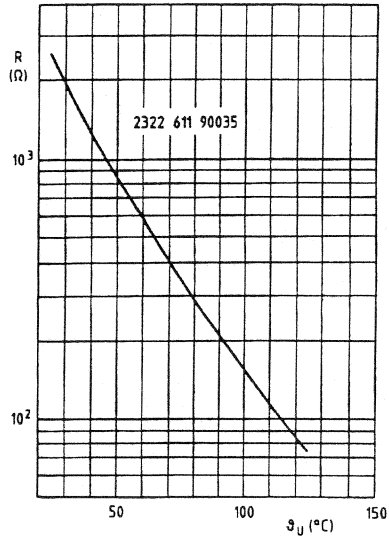


Abb. 1: Widerstandswert in Abhängigkeit von der Temperatur

Da die geometrische Konstante A stört, und man den Widerstandsverlauf $R_T = f(T)$ unabhängig von ihr berechnen möchte, wandelt man (1) um.

$$R_T = R_{T_0} \cdot \exp \left[B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (2)$$

R_T : Widerstand bei der Temperatur T [K]

R_{T_0} : Widerstand bei der Temperatur T_0 [K]

B : Regelkonstante [K]

Der Temperaturkoeffizient α_R , (3), ist definiert als die relative Änderung des Widerstandswertes in Bezug auf die Temperaturänderung.

$$\alpha_R = \frac{dR_T}{dT} \cdot \frac{1}{R_T} \quad (3)$$

Frage 2: Berechnen Sie den Temperaturkoeffizienten für einen NTC !

In Bezug auf den Strom, der durch den NTC fließt, unterscheidet man zwei Arbeitsbereiche. Im ersten Bereich ist der Strom so gering, daß praktisch keine Eigenerwärmung des Heißleiters stattfindet. Hier ist die Spannung dem Strom proportional, der Thermistor verhält sich wie ein ohmscher Widerstand, stärker ausgeprägt ist aber seine Temperaturabhängigkeit. Der Widerstand ist gemäß (1) bzw. (2) nur von der Umgebungstemperatur T abhängig. Nur in diesem Bereich ist der Einsatz als Temperatursensor sinnvoll. Charakteristisch für den zweiten Bereich ist, daß die Temperatur des NTC's höher als die Umgebungstemperatur ist. Der Widerstand wird nur vom Wärmeübergang zur Umgebung bestimmt. Messungen im zweiten Strombereich dienen zur Strömungsgeschwindigkeitsmessung (erzwungene Konvektion) oder zur Druckmessung. In diesem Versuch wird der Heißleiter im ersten Bereich betrieben. Bei der exakten Messung der Temperatur stört der exponentielle Verlauf der Kennlinie. Hier gibt es nun verschiedene Möglichkeiten, um die Kennlinie zu linearisieren. Dies geschieht durch Kombination von Thermistor und ohmschen Widerständen. Den Verlauf der linearisierten Kennlinie erhält man durch Betrachtung der beiden Grenzfälle

$$\lim R_G \text{ für } T \rightarrow 0 \quad \text{und} \quad \lim R_G \text{ für } T \rightarrow \infty.$$

R_G : Gesamtwiderstand der Linearisierungsschaltung

Frage 3: Was für Linearisierungsmöglichkeiten gibt es, und wie sehen die Kennlinien $R = f(T)$ aus ?

Diese Linearisierung ist allerdings gewissen Einschränkungen unterworfen. Es kann nur in einem Intervall linearisiert werden. Der Temperaturkoeffizient α_R verkleinert sich. Der Verlauf der linearisierten Kennlinie entspricht keiner Geraden. Die Abweichung wird durch den Linearisierungsfehler beschrieben.

Mit einem NTC können Temperaturen bis zu 1000°C gemessen werden.

1.1.2 Kaltleiter (PTC)

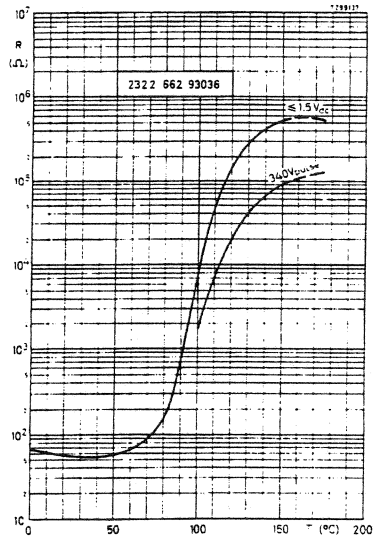


Abb. 2: Widerstands-Temperatur-Verlauf

Kaltleiter oder PTC-Widerstände (*Positiv Temperature Coefficient*) haben, im Gegensatz zu den Heißeleitern, einen sehr großen, positiven Temperaturkoeffizienten. Dieser Temperaturkoeffizient gilt allerdings nur in einem kleinem Temperaturintervall. Außerhalb dieses Intervalls ist er negativ. Die Abbildung 2 zeigt die Widerstands-Temperatur-Charakteristik eines PTC's. Dieser Verlauf resultiert aus der Überlagerung zweier Effekte, der Halbleitung und der sogenannten Ferroelektrizität:

Das als Kaltleiterwerkstoff benutzte Bariumtitanat, BaTiO_3 , ist ein polykristalliner Werkstoff. Er ist mit einem dreiwertigen Element, meist Lanthan, dotiert. Diese Dotieratome lagern sich an den Kristallgrenzen an und bilden sogenannte Potentialbarrieren. Diese Potentialbarrieren bilden einen Widerstand R_b der folgendermaßen beschrieben werden kann.

$$R_B \sim \frac{1}{a} \cdot \exp \left[\frac{e \cdot V_B}{k \cdot T} \right] \quad (4)$$

a : Gitterkonstante des Kristalls

V_B : Potential der Barrieren.

Das Potential der Barrieren V_B ist umgekehrt proportional zur relativen Dielektrizitätszahl ϵ_r des Kristalls. Da das Bariumtitanat ein ferroelektrischer Stoff ist, ist die Dielektrizitätszahl sehr groß, der Widerstand somit klein. Ab einer bestimmten Temperatur, der Curie-Temperatur ϑ_C , verwandelt sich das Kaltleitermaterial in einen paraelektrischen Stoff um. Das bedeutet, daß das ϵ_r kleiner wird und der Widerstand steigt. Die Curie-Temperatur läßt sich über die Dotierung einstellen. Die Curie-Temperatur von reinem Bariumtitanat liegt bei 120°C. Sie kann durch Dotierung zwischen -50°C und 300°C eingestellt werden.

Beim PTC unterscheidet man, wie beim NTC, zwei Betriebsbereiche. Zum einen im nichteigenerwärmten Zustand zur Messung der Umgebungstemperatur, zum anderen im eigenerwärmten Zustand zur Messung der Wärmeabfuhr. Anwendungen im ersten Bereich sind vor allem Schutzbeschaltungen. Im zweiten Bereich findet man den PTC bei Füllstandsmessungen, z.B. bei Zapfsäulen, oder als selbstregulierendes Heizelement z.B. bei Heißklebepistolen oder elektrisch heizbaren Außenspiegeln von Autos. Stabile Kennlinien erhält man durch Voralterung der einzelnen Widerstände. Während dieser Voralterung werden sämtliche Festkörperreaktionen (Diffusion) im polykristallinen Material abgeschlossen.

Frage 4: Woher kommen die Bereiche mit negativem Temperaturkoeffizienten in der PTC-Kennlinie ?

1.1.3 Silizium-Diode

Wie bereits erwähnt, ist der Leitungsmechanismus bei Halbleitern sehr stark von der Temperatur abhängig. Bei der Silizium-Diode handelt es sich um einen Halbleiter, mit einem n- und einem p-leitenden Gebiet. Man spricht auch, wegen der beiden unter-

schiedlich dotierten Gebiete, von einem bipolaren Halbleiter. Gleichung 5 beschreibt die Kennlinie der Diode.

$$I = I_S \cdot \left(\exp \left[\frac{U}{m \cdot U_T} \right] - 1 \right) \quad (5)$$

I_S : Sperrstrom

m : Idealitätsfaktor (hier $m=1$)

U_T : Temperaturspannung

In (5) haben wir zwei Temperaturabhängigkeiten die gegeneinander wirken, den Sperrstrom I_S und die Temperaturspannung U_T . Die Temperaturspannung vergrößert sich linear mit steigender Temperatur, bei Zimmertemperatur beträgt sie $U_T=26$ mV. Der Sperrstrom beträgt bei Silizium zwar nur einige pico-Ampere. Eine Temperaturerhöhung von nur $\Delta T=5,9$ K führt bereits zu einer Verdoppelung des Sperrstromes bzw. des Gesamtstromes.

Frage 5: Wie sieht der qualitative Verlauf der Spannung bei konstantem Strom I aus, wenn die Diode erwärmt wird ?

Möchte man den Strom konstant halten, muß man die Spannung an der Diode senken. Als Temperaturdurchgriff D_T wird dabei diejenige Spannungsverringерung bezeichnet, die Stromzunahme bei einer Temperaturerhöhung von 1 K aufhebt.

$$D_T = - \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{k}{e} \cdot \left(\frac{E_{g0}}{k \cdot T_0} - \ln \left[\frac{I}{I_S} \right] \right) \quad (6)$$

Als konstante Werte ergeben sich hier bei einer Temperatur von $T_0=300$ K:

$$\frac{k}{e} = 86,142 \cdot 10^{-6} \frac{V}{K}$$

$$\frac{E_{g0}}{k \cdot T_0} = 45,274$$

1.1.4 Integrierte Meßfühler

Unter einem integrierten Meßfühler versteht man ein Bauteil, das nicht mehr nur aus einem Sensor besteht, sondern aus einem Temperaturfühler und einer zusätzlichen Beschaltung. Diese zusätzliche Beschaltung besteht zum Teil aus Konstantstromquellen und/oder aus Differenzverstärkern. Als Ausgangsgröße liefern sie entweder eine temperaturproportionale Spannung oder einen temperaturproportionalen Strom. Ihre Ausgangsgröße besitzt eine große Linearität und Genauigkeit. Auch lassen sich mit ihnen einfach Thermometer aufbauen. Stellvertretend für die große Anzahl verschiedener Meßfühler seien hier der LM 335 der Firma National Semiconductor (temperaturproportionale Spannung) und der AD 590 der Firma Analog Devices (temperaturproportionaler Strom) vorgestellt.

Der LM 335 verwendet als Sensor eine Z-Diode. Hier besteht die gleiche Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes wie bei einer herkömmlichen Silizium-Diode. Über einen Regelverstärker wird die Ausgangsspannung konstant gehalten. Der Temperaturkoeffizient der Ausgangsspannung beträgt 10 mV/K. Sein Temperaturbereich erstreckt sich von -40°C bis 100°C.

Der AD 590 ist, wie der LM 335, ein monolithisch integrierter Schaltkreis. Er liefert einen Ausgangsstrom mit einem Temperaturkoeffizienten von 1 µA/K. Der Ausgangsstrom ist direkt proportional zur absoluten Temperatur. Das heißt, bei einer Umgebungstemperatur von 25°C, das entspricht der absoluten Temperatur 298,16 K, beträgt der Ausgangsstrom 298,2 µA. Die Temperaturmessung erfolgt über die Differenz der Basis-Emitter-Spannungen zweier Transistoren, die mit konstanten Kollektorströmen gespeist werden.

$$\Delta U_{BE} = T \cdot \frac{k}{e} \cdot \ln \left[\frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right] \quad (7)$$

Die Spannungsänderung wird durch zwei Widerstände in eine Stromänderung gewandelt. Der Temperaturkoeffizient des Ausgangsstromes wird nun über diese beiden Widerstände eingestellt. Die exakten Widerstandswerte erreicht man durch Bearbeitung mit einem Laser. Aufgrund seiner Eigenschaft als Stromquelle bietet der AD 590 die Möglichkeit, das Ausgangssignal über lange Leitungen zu übertragen. Der Temperaturbereich des AD 590 erstreckt sich von -55°C bis 150°C.

Frage 6: Woraus resultiert die hohe Linearität der Ausgangsgröße bei integrierten Meßfühlern ?

1.2 Temperaturkompensation von bipolaren Transistoren

Da die Ströme eines Bipolar-Transistors den gleichen Mechanismen wie der Strom einer Diode unterliegen, sind sie auch temperaturabhängig. Zum Einschaltzeitpunkt stellt sich, laut Kennlinienfeld, der Kollektorstrom I_C ein. In der Sperrschicht entsteht die Verlustleistung P_0 . Es kommt zu einer Erwärmung der Sperrschicht. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Siliziums, vergrößert sich der Kollektorstrom. Dies führt wiederum zu einer größeren Verlustleistung und damit zu einer größeren Sperrschichttemperatur. Bei einer Drift der Basis-Emitterspannung

$$\left| \frac{dU_{BE}}{dT} \right| = 2 \frac{mV}{K} \quad (8)$$

und einer Gleichspannungsverstärkung von

$$|A| = \frac{U_{CE}}{U_{BE}} = 150 \quad (9)$$

ändert sich das Kollektorruhepotential

$$\left| \frac{V_{CA}}{\Delta T} \right| = |A| \cdot 2 \frac{mV}{K} = 300 \frac{mV}{K} \quad (10)$$

d.h. bei einer Temperaturänderung von 10 K ändert sich das Kollektorruhepotential um 3 V! Um diesem entgegenzuwirken muß man den Arbeitspunkt stabilisieren.

1.2.1 Temperaturkompensation mit linearen Bauelementen

Unter linearen Bauelementen versteht man Bauelemente mit einer linearen Kennlinie. Es handelt sich hierbei um ohmsche Widerstände. Man unterscheidet hauptsächlich drei Schaltungen:

Arbeitspunktstabilisierung durch konstantem Basisstrom

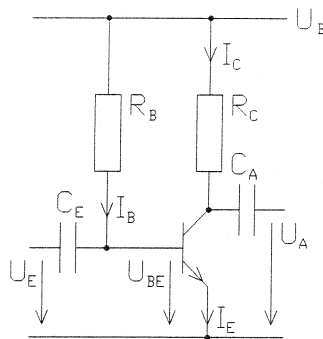


Abb. 3: Arbeitspunktstabilisierung durch konstanten Basisstrom

Durch diese Schaltung, Abb.3, wird der Einfluß der Basis-Emitterspannung auf den Kollektor- bzw. Emitterstrom ausgeschlossen.

$$I_E \approx \frac{B_0 \cdot U_B}{R_B} \quad (11)$$

Nachteilig macht sich hier die Temperaturabhängigkeit der Gleichstromverstärkung B_0 bemerkbar.

Arbeitspunktstabilisierung durch Gleichstromgegenkopplung

Durch diese Schaltungsmaßnahme, Abb.4, wird die Driftverstärkung V_D erheblich herabgesetzt. Die Verstärkung berechnet sich hier folgendermaßen:

$$V_D = \left| \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{BE}} \right| \approx \frac{R_A}{R_E} \quad (12)$$

D.h., daß die Temperaturdrift durch das Verhältnis der beiden Widerstände "eingestellt" werden kann. Wählt man $R_E = 0,1 \cdot R_A$ ergibt sich:

$$\left| \frac{U_{CA}}{\Delta T} \right| = \frac{R_A}{R_E} \cdot D_T = 20 \frac{\text{mV}}{\text{K}} \quad (13)$$

Neben der Reduzierung der Drift hat die Stromgegenkopplung einen weiteren Vorteil, sie regelt die temperaturbedingten Arbeitspunktverschiebungen selbständig aus.

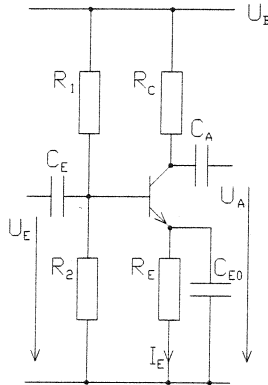


Abb. 4: Arbeitspunkteinstellung durch Stromgegenkopplung

Als Nachteil muß zum einen der Einfluß des Emittterwiderstandes auf das Signalverhalten aufgeführt werden.

Frage 7: Wie erfolgt die selbständige Störungsausregelung bei der Stromgegenkopplung ?

Arbeitspunktstabilisierung durch Gleichspannungsgegenkopplung

Die grundlegende Idee dieser Stabilisierung, Abb.5, ist es, den Basisspannungsteiler nicht an eine konstante Spannung anzuschließen, sondern an die temperaturabhängige Kollektor-Emitter-Spannung.

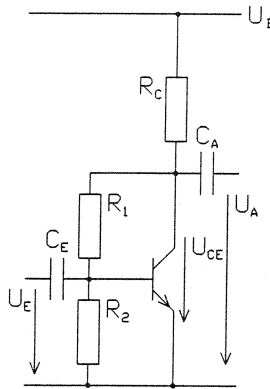


Abb. 5: Arbeitspunktstabilisierung durch Spannungsgegenkopplung

$$|V| = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (14)$$

Vorteil dieser Schaltung sind die selbständige Ausregelung der Temperaturschwankungen. Zudem wird die Transistorschaltung zusätzlich nicht sehr hoch belastet, da die beiden Widerstände R_1 und R_2 hochohmig sind. Nachteilig an dieser Schaltung ist wieder der Einfluß der Gegenkopplung auf das Signalverhalten. Auch ist die Qualität der Stabilisierung schlechter als bei der Gleichstromgegenkopplung, da sich hier der Temperaturgang der Gleichstromverstärkung B_0 stark auswirkt.

1.2.2 Temperaturkompensation mit nichtlinearen Bauelementen

Bei den linearen Bauelementen wird die Gleichspannungsverstärkung herabgesetzt, um die temperaturabhängige Änderung der Basis-Emitter-Spannung nicht zu verstärken. Mit Hilfe der nichtlinearen Bauelemente wird die Drift der Basis-Emitter-Spannung kompensiert. Als nichtlineare Bauelemente werden hier Diode, Heißleiter und Kaltleiter verwendet. Folgende drei Schaltungsvarianten sollen vorgestellt werden:

Temperaturkompensation mit einer Diode

Hier, Abb.6, wird der identische Temperaturgang von Diode und Transistor ausgenutzt. Sorgt man für eine ideale thermische Koppelung beider Bauteile und haben Diode und Transistor identische Materialeigenschaften, wird der Temperaturgang der Basis-Emitterspannung ideal kompensiert. Neben der guten Temperaturkompensation sorgt die Diode dafür, daß Betriebsspannungsschwankungen den Kollektorstrom nicht mehr beeinflussen. Nachteilig macht sich der kleine differentielle Widerstand der Diode, $r_D \approx 25 \Omega$, bemerkbar. Zur Aufrechterhaltung eines höheren Eingangswiderstandes für Wechselsignale muß man einen Widerstand in Reihe zur Diode schalten.

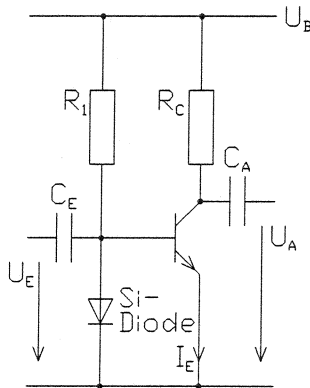


Abb. 6: Temperaturkompensation durch eine Diode

Arbeitspunktstabilisierung durch einen NTC

Man versucht in dieser Schaltung, Abb.7, die Temperaturdrift der Parallelschaltung der Temperaturdrift der Basis-Emitterstrecke anzupassen.

$$I_2 \cdot \frac{dR_G}{dT} = D_T \quad (15)$$

$$R_G : R_T \parallel R_P$$

Aus dieser Bedingung errechnet sich der Parallelwiderstand. Die Anpassung gilt allerdings nur für einen bestimmten Temperaturbereich mit der mittleren Temperatur T_M .

$$R_P = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{TM} \cdot \sqrt{\frac{B \cdot R_{TM} \cdot I_2}{|D_T|}} - 1} \quad (16)$$

Der Widerstand R_S ist für den Fall vorgesehen, daß der Widerstand der Parallelschaltung als Eingangswiderstand zu niederohmig ist.

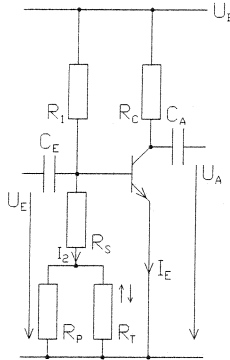


Abb. 7: Temperaturkompensation durch einen NTC

Arbeitspunktstabilisierung durch einen PTC

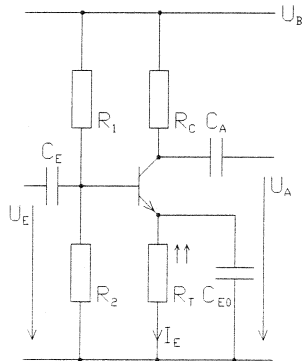


Abb. 8: Temperaturkompensation durch einen PTC

Diese Schaltung, Abb.8, zeigt einen ähnlichen Aufbau wie die Arbeitspunkteinstellung durch Stromgegenkopplung. Hier wird kein linearer Widerstand zur Kopplung verwendet, sondern ein PTC. Der Kaltleiter wirkt in dieser Schaltung wie ein Schalter. Er wird im Bereich der Selbsterwärmung betrieben. Wird der Stromfluß durch den Thermistor zu groß, vergrößert sich sein Widerstandswert schlagartig um einige Zehnerpotenzen. Die Kompensation ist hier wesentlich besser als bei der Stromgegenkopplung mit ohmsche Widerstand. Der Nachteil hierbei ist allerdings, daß der PTC nur ab einem bestimmten Strombetrag, dem sogenannten Knickstrom, mit der Vergrößerung seines Widerstandes reagiert. Man kann die Schaltung nur für einen bestimmten Arbeitsstrom temperaturkompensieren.

Frage 8: Welche weiteren Möglichkeiten gibt es zur Temperaturkompensation mittels PTC ?

2 Versuchsdurchführung

2.1 Aufnahme der Vergleichstemperatur

Um eine Aussage über die aufzunehmende Kennlinie treffen zu können benötigt man die jeweils anliegende Temperatur. Diese wird mit einem Differenzthermometer nach Abb.9 aufgenommen. Als Temperatursensoren werden die integrierten Meßfühler des Typs LM 335 verwendet.

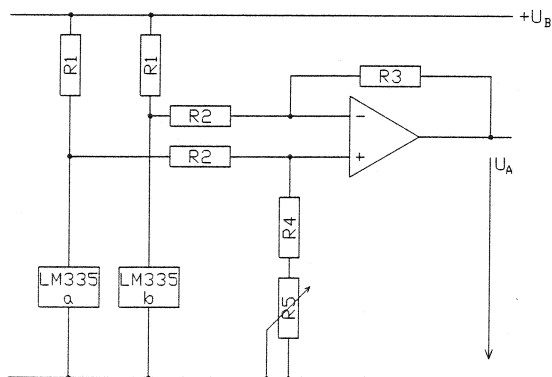


Abb. 9: Differenzthermometer

Die beiden Sensoren haben unterschiedliche Temperaturen. Der Sensor LM 335a befindet sich auf der zu messenden Temperatur, der andere verbleibt als Referenz im Eiswasser. Der Operationsverstärker verstärkt die Spannungsdifferenz mit dem Verstärkungsfaktor 1, er dient hier als Impedanzwandler. Zu Beginn des Versuches werden die beiden Sensoren in das Eiswasser gebracht und über ein Potentiometer R_5 die Ausgangsspannung auf Null abgeglichen.

2.2 NTC-Kennlinie

Da die NTC-Kennlinie eine Funktion der Umgebungstemperatur sein soll, darf der Strom durch den NTC nicht zu groß sein. Über eine Konstantstromquelle wird ein Strom $I = 1 \text{ mA}$ eingestellt. Aus der aufgenommenen Kurve $R_T = f(T_U)$ wird mit Hilfe von (2) die Regelkonstante B und der Kaltwiderstand R_{T_0} bei der Temperatur T_0 bestimmt. Mit (18) und (20) werden daraus die Widerstände für eine Linearisierungsschaltung nach Abb.10 berechnet.

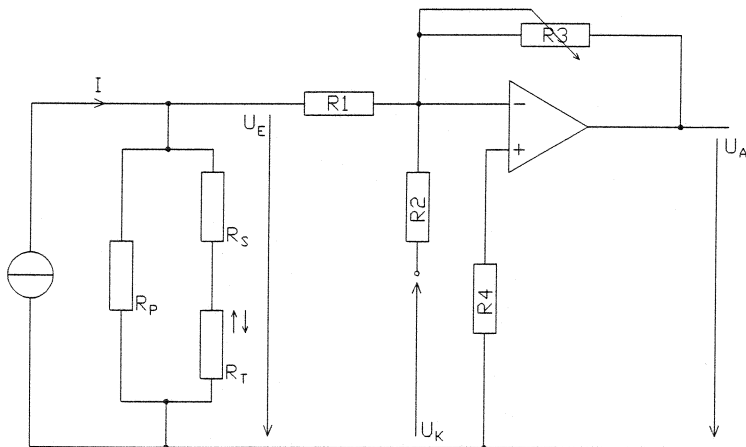


Abb. 10: NTC-Thermometer

Aus der Wendepunktbedingung:

$$\frac{d^2 R_G}{dT^2} = 0 \quad (17)$$

folgt mit $T = T_M$:

$$R_P + R_S = R_{TM} \cdot \frac{B - 2 \cdot T_M}{B + 2 \cdot T_M} \quad (18)$$

T_M : Mittlere Temperatur des Linearisierungsintervalls

R_{TM} : Widerstandswert des NTC's bei T_M

R_G : Gesamtwiderstand der Linearisierungsschaltung

Gewünscht wird im allgemeinen eine bestimmte Temperaturempfindlichkeit

$$K = \left| \frac{dR_G}{dT} \right|_{TM} < \frac{R_{TM}}{B} \cdot \left(\frac{B - 2 \cdot T_M}{2 \cdot T_M} \right)^2 \quad (19)$$

des Gesamtwiderstandes. Daraus ergibt sich der Parallelwiderstand zu

$$R_P = \frac{2 \cdot T_M}{B + 2 \cdot T_M} \cdot \sqrt{K \cdot R_{TM} \cdot B} \quad (20)$$

Mit (18) kann nun der Serienwiderstand R_S bestimmt werden.

Der Widerstand R_4 symmetriert die beiden Eingänge, so daß für den Operationsverstärker ideale Bedingungen gelten (V , $R_e \rightarrow \infty$).

Frage 9: Wie lautet die Gleichung für die Ausgangsspannung beim NTC-Thermometer ?

Die Ausgangsspannung des Meßverstärkers (Abb.10) wird nun so eingestellt, daß sie 0 V bei einer Temperatur von $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ und 1 V bei $\vartheta = 100^\circ\text{C}$ beträgt.

2.3 Temperaturdurchgriff bei einer Silizium-Diode

Um eine Diode auf die Eignung zur Temperaturkompensation zu untersuchen, wird die Kennlinie $U=f(T)$ mit unterschiedlichen Diodenströmen aufgenommen. Bei dem Bauteil handelt es sich hier um keine eigentliche Diode, sondern um einen Transistor, der als Diode geschaltet wird.

Frage 10: Warum benutzt man hier einen Transistor ? (praktische Gründe)

Mit der Konstantstromquelle werden die Ströme $I_1=0,5\text{ mA}$ und $I_2=2\text{ mA}$ eingestellt. Nun wird ein Temperaturintervall von $20^\circ\text{C} \dots 80^\circ\text{C}$ durchlaufen und die Kennlinie aufgenommen. Mit Hilfe von (6) und der Kennlinie sollen die Sperrströme bestimmt werden.

2.4 Temperaturkompensation bei Transistoren

Zur Arbeitspunktstabilisierung von bipolaren Transistoren stehen folgende lineare und nichtlineare Schaltungen zur Verfügung:

- Arbeitspunktstabilisierung durch Gleichstromgegenkopplung
- Arbeitspunktstabilisierung durch eine Diode
- Arbeitspunktstabilisierung durch einen Heißleiter
- Arbeitspunktstabilisierung durch einen Kaltleiter

Durch einen elektronischen Umschalter ist es möglich zwei Kennlinien gleichzeitig aufzunehmen, um die Wirksamkeit der Schaltungen besser miteinander vergleichen zu können. Vor Beginn der Kennlinienaufnahme müssen die Arbeitspunkte der beiden Transistoren gleich eingestellt werden.

Frage 11: Wie kann man identische Kennlinien bei Diode und Transistor bei der Arbeitspunktstabilisierung mit einer Diode auf einfache Weise gewährleisten ?

3 Aufgabenstellung

Die im Versuchsumdruck gestellten Fragen sind vor Versuchsbeginn schriftlich zu beantworten !

1. Nehmen Sie die Kennlinie $R=f(\vartheta)$ eines Heißleiters auf !
Bestimmen Sie den Kaltwiderstand R_{T_0} und die Regelkonstante B !
Bestimmen Sie die beiden Linearisierungswiderstände R_p und R_s !
Bauen Sie ein NTC-Thermometer auf und nehmen Sie die Kennlinie $U=f(\vartheta)$ auf!
Zeichnen Sie den idealen Verlauf der Kennlinie und bestimmen Sie die größte negative und positive absolute und relative Abweichung !
2. Nehmen Sie die Kennlinien $U=f(\vartheta)$ von Silizium-Dioden bei unterschiedlichen Strömen auf !
Berechnen Sie aus den Kennlinien den Sperrstrom I_S !
3. Es sollen zwei Kennlinien $U_{CE}=f(\vartheta)$ von Transistoren mit unterschiedlichen Stabilisierungsschaltungen aufgenommen werden !
Deuten Sie die Kennlinienverläufe !
Diskutieren Sie Vor- und Nachteile der untersuchten Schaltungen !

4 Weiterführende Literatur

- | | |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Hahn, H. | Thermistoren, ihre Eigenschaften und Anwendungen
R.v.Decker's Verlag, G.Schenk |
| Tietze; Schenk | Halbleiter-Schaltungstechnik
Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York |
| Müller, R. | Bauelemente der Halbleiterelektronik
Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York |
| Beuth; Schmusch | Elektronik Grundsaltungen
Vogel Buchverlag, Würzburg |