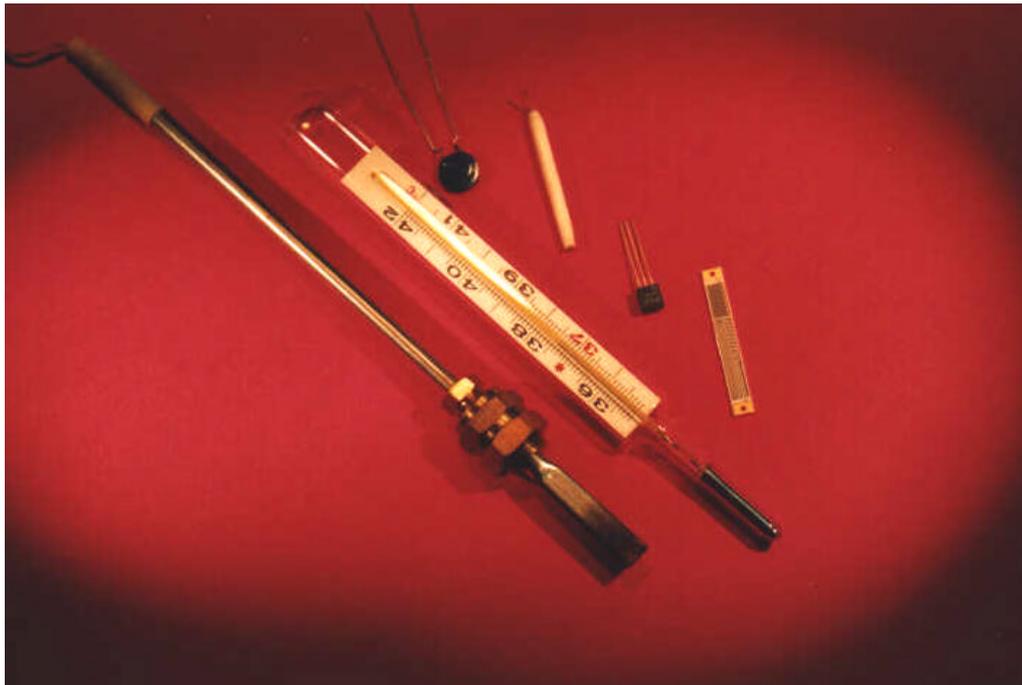


Praktikum „Sensorik“

Verantwortlicher: Dr. Volkmar Norkus, BAR I/88, Tel. 33463

Versuch 1:

Temperatursensoren



Versuchsverantwortlicher: Dr. Volkmar Norkus
BAR I/88, Tel. 33463

Versuchsraum: BAR E/80

1 Ziel des Versuches

Der vorliegende Versuch hat das Ziel, im praktischen Umgang mit unterschiedlichen Typen von Temperatursensoren Kenntnisse zu deren typischen Eigenschaften zu vermitteln, ihre Vor- und Nachteile kennenzulernen und mögliche Applikationen der Sensoren abzuleiten.

2 Grundlagen

2.1 Literatur

- /1/ Vorlesung Sensorik
- /2/ H. Schaumburg: Sensoren. Stuttgart, B.G. Teubner Verlag, 1992
- /3/ K.W. Bonfig: Temperatursensoren. Sensorik. Band 6. Ehningen, Expert Verlag, 1995
- /4/ E. Schiessle: Sensortechnik und Messwertaufnahme. Würzburg, Vogel Buchverlag, 1992

2.2 Einleitung

Nahezu jeder physikalische, chemische oder biologische Prozess ist temperaturabhängig. Deshalb ist die genaue Erfassung der thermischen Verhältnisse eines Objektes, eines Zustandes oder Prozesses für nahezu alle Lebensbereiche von wesentlicher Bedeutung. Als Messwertempfänger werden dabei Temperatursensoren eingesetzt. In Abhängigkeit von der vorliegenden Messaufgabe (Temperaturbereich, geforderte Genauigkeit, Reproduzierbarkeit, Langzeitstabilität usw.) werden die unterschiedlichsten Sensorarten und Messeffekte bzw. -verfahren genutzt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über mögliche Auswahlkriterien für Temperatursensoren.

Eigenschaft	Kriterium
Messtechnisch	Messbereich, Empfindlichkeit, Genauigkeit, Auflösung, Reproduzierbarkeit, Zeitverhalten, Linearität, Langzeitstabilität, Betriebseigenschaften, Störanfälligkeit, Rückwirkungsfreiheit
Physikalisch	Geometrie, thermische Masse, Montierbarkeit
Allgemein	Preis, Verfügbarkeit, Austauschbarkeit

Tabelle 1: Mögliche Auswahlkriterien für Temperatursensoren

2.3 Allgemeine Funktionsweise

Die physikalischen und chemischen Effekte die zur Temperaturmessung genutzt werden können, sind ausgesprochen vielfältig. Tabelle 2 gibt einen Überblick der technisch häufig genutzten Effekte zur Messung der Temperatur. Prinzipiell kann zwischen berührender (Thermometrie) und berührungsfreier (Pyrometrie) Temperaturmessung unterschieden werden.

Bei der Thermometrie befindet sich der Temperatursensor unmittelbar in der Messumgebung (Gas, Flüssigkeit) oder wird gut wärmeleitend mit dem Messobjekt (Festkörper) verbunden. Die Messung erfolgt im thermischen Gleichgewicht zwischen Messobjekt und Sensorelement. Sie ist nicht rückwirkungsfrei, da dem Messobjekt Wärme entzogen bzw. Wärme zugeführt wird. Das Ansprechverhalten (Ansprechzeit) der Temperatursensoren wird im Wesentlichen durch ihre Wärmekapazität und den Wärmewiderstand zum Messobjekt bestimmt.

Pyrometrische Messverfahren bewerten die von jedem Körper oberhalb des absoluten Nullpunktes (-273,15 °C) abgegebene Wärmestrahlung und nutzen die strahlungsphysikalischen Gesetzmäßigkeiten, daraus die Temperatur des Messobjektes zu ermitteln. Dazu wird die vom Objekt emittierte Wärmestrahlung auf einen Strahlungssensor (Infrarot-Sensor) fokussiert, der ein von der Objekttemperatur abhängiges Ausgangssignal erzeugt. Wesentliche Vorteile der Pyrometrie sind: absolut rückwirkungsfrei, kurze Ansprechzeiten, räumliche Trennung zwischen Messobjekt und Sensor.

Art	Effekt	Beispiel
Mechanisch	Thermische Ausdehnung von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern	Flüssigkeitsthermometer Gasdruckthermometer Stabausdehnungsthermometer Bimetallthermometer
Resistiv	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes	Metallwiderstände Keramikwiderstände Halbleiterwiderstände
Thermo-elektrisch	Seebeck-Effekt	Thermoelemente
PN-Übergang	Temperaturabhängigkeit einer Diodenkennlinie	Transistor-Temperatur-sensor Integrierter Temperatur-sensor
Pyroelektrisch	Änderung der spontanen Polarisierung pyroelektrischer Materialien durch Temperaturänderung	Pyroelektrischer Sensor
Frequenz-analog	Temperaturabhängigkeit der Eigenfrequenz von Quarzkristallen	Quarz-Temperatursensoren
Optisch	Temperaturabhängigkeit optischer Eigenschaften von Stoffen	Faseroptische Temperatursensoren
Chemisch	Farbumschlag in chemischen Verbindungen bei einer bestimmten Temperatur	Flüssigkristalle

Tabelle 2: Technisch häufig in Temperatursensoren genutzte Effekte

2.3.1 Resistive Temperatursensoren

Resistive Temperatursensoren (auch Widerstandsthermometer genannt) beruhen auf der Änderung des elektrischen Widerstandes bei sich ändernder Umgebungstemperatur. Physikalische Ursache dafür ist Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit σ_e . Bei bekannter Temperaturabhängigkeit des Widerstandes lässt sich durch eine geeignete Widerstandsmessung die Temperatur des Widerstandes und damit die Umgebungstemperatur bestimmen.

Von wesentlicher technischer Bedeutung sind resistive Temperatursensoren auf der Basis von:

- Metallwiderständen
- Halbleiterwiderständen
- Keramikwiderständen.

Die verschiedenen Widerstandsmaterialien zeichnen sich durch eine sehr unterschiedliche Temperaturabhängigkeit des Widerstandes hinsichtlich Steilheit und Linearität aus. Prinzipiell

kann zwischen PTC (**P**ositive **T**emperature **C**oefficient)- und NTC (**N**egative **T**emperature **C**oefficient)- Widerständen unterschieden werden. PTC-Widerstände sind somit Kaltleiter und NTC-Widerstände entsprechend Heißeleiter.

Der Grundwert des Sensorwiderstandes und die geforderte Messgenauigkeit bestimmen die zu verwendende Anpassschaltung. Es werden Zweileiter-, Dreileiter- und Vierleitermessschaltungen verwendet. Bei resistiven Temperatursensoren kann die Eigenerwärmung des Messwiderstandes durch die zugeführte elektrische Verlustleistung bei der Widerstandsmessung zu einem zusätzlichen Messfehler führen.

2.3.1.1 Metallwiderstände

Von besonderer technischer Bedeutung sind Metallwiderstände aus Platin oder Nickel, die auf einen Widerstand von 100 Ω , 500 Ω oder 1000 Ω bei 0 $^{\circ}\text{C}$ abgeglichen sind (Handelsbezeichnung: Pt100, Pt500, Pt1000, Ni100).

In der industriellen Messtechnik haben sich Platinwiderstände durchgesetzt, da dieses Material in einem großen Temperaturbereich nutzbar ist und eine sehr gute chemische Beständigkeit sowie eine ausgezeichnete Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität des Widerstandes besitzt. Die Eigenschaften der Widerstände sind in der DIN IEC 751 genormt. Bild 1 und 2 zeigen die Kennlinien eines Pt100 bzw. Ni100.

Typische Einsatztemperaturbereiche der Sensoren sind:

Pt100:	-200 bis 850 $^{\circ}\text{C}$
Ni100:	-60 bis 230 $^{\circ}\text{C}$.

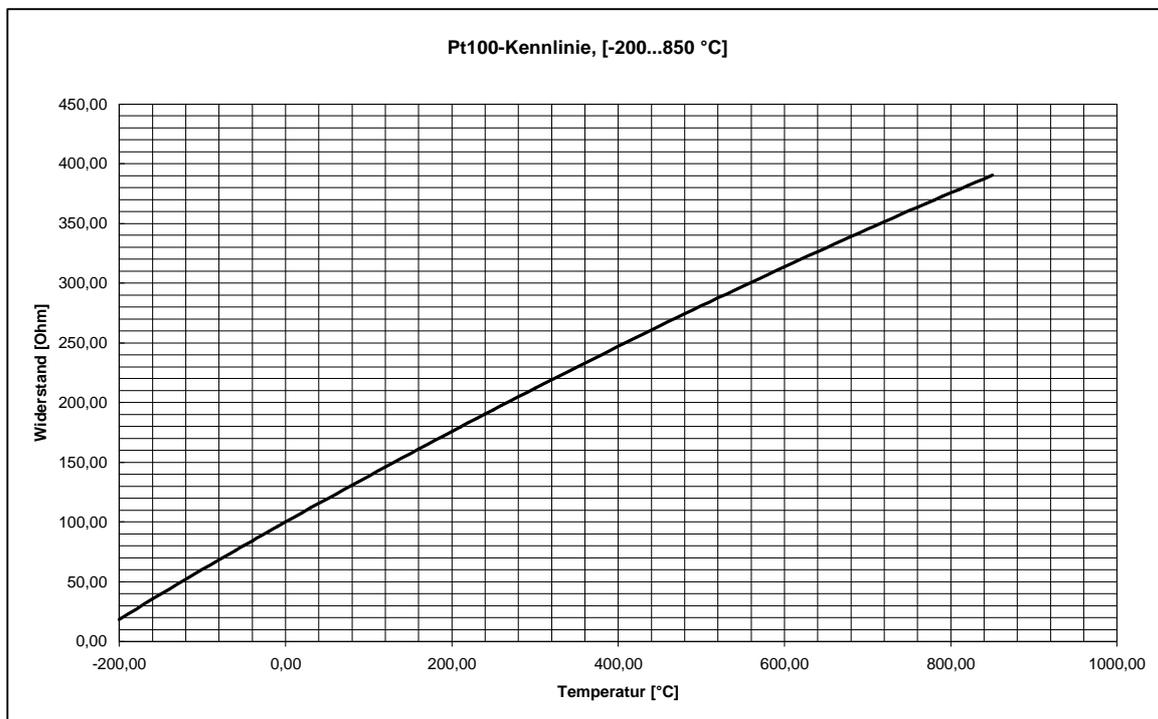


Bild 1: Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Pt100 nach IEC 751

Für Pt100- Widerstände kann die Kennlinie im Bereich von 0 °C bis 850 °C nach folgender Gleichung beschrieben werden:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + AT + BT^2) \quad (1)$$

mit: R_0 ...Widerstand bei 0 °C
 T.....Temperatur
 A..... $3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$
 B..... $-5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$.

Für ein Pt100 betragen die Widerstandsänderungen im Temperaturbereich bis 100 °C folglich ca. 0,4 Ω/K.

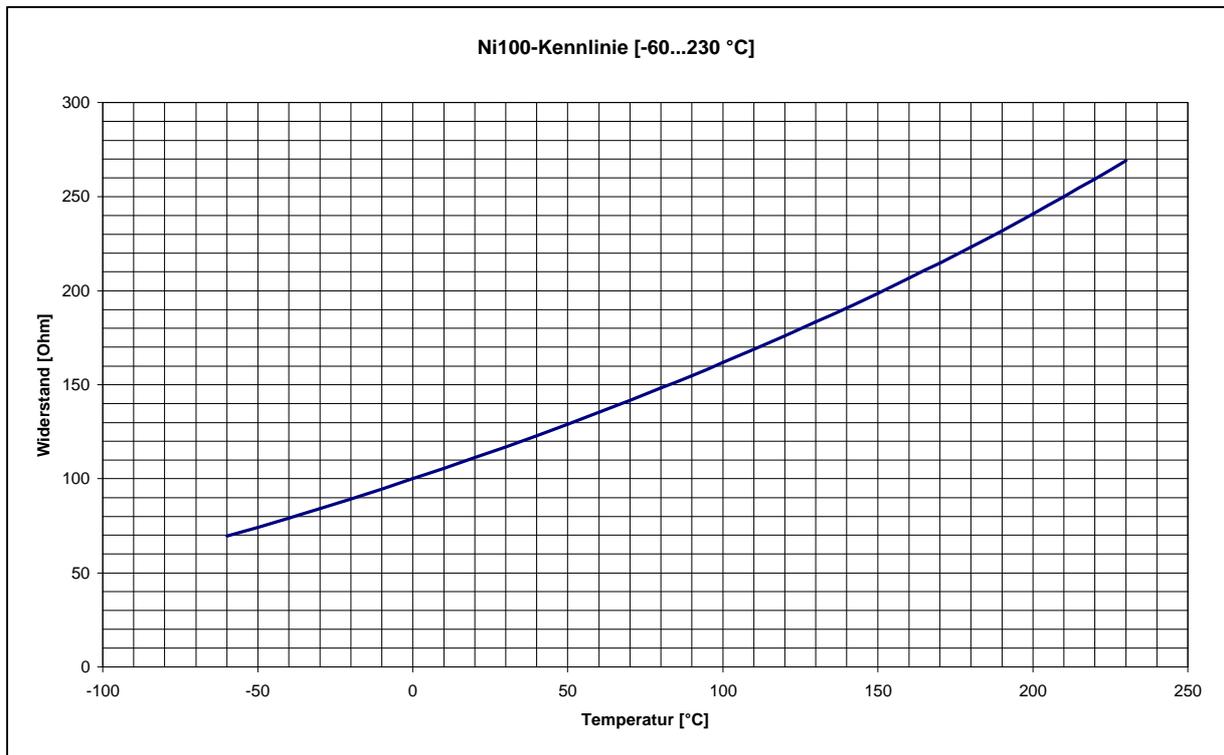


Bild 2: Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Ni100 nach IEC 751

Die Pt-Fühler werden für die unterschiedlichen Anwendungen und Anforderungen in verschiedenen Ausführungsformen angeboten:

- Platindraht auf Glasträger gewickelt und in Glas eingeschmolzen:
 Vorteil: Erschütterungsfest und chemisch sehr resistent
 Nachteil: relativ teuer, z.T. Hystereseeffekte durch mechanische Spannungen, bis ca. 400 °C einsetzbar
- Platindraht in Keramik eingebettet und von Keramikrohr umschlossen:
 Vorteil: sehr genau, keine Hysterese, bis 800 °C einsetzbar
 Nachteil: relativ teuer, mechanisch instabiler
- Dünnschicht- bzw. Dickschichtsensoren mit mäanderförmiger Widerstandsbahn auf ebenem Substrat:
 Vorteil: kostengünstig, einfach abgleichbar, gut montierbar
 Nachteil: eingeschränkte Genauigkeit, z.T. Hysterese.

Die Größe der Fühler variiert typisch im Bereich von \varnothing 0,9 mm x 7 mm bis \varnothing 5 mm x 60 mm bzw. von 2 mm x 3 mm bis 4 mm x 30 mm. Die Bilder 3 und 4 zeigen Bauformen von Pt100-Temperatursensoren.

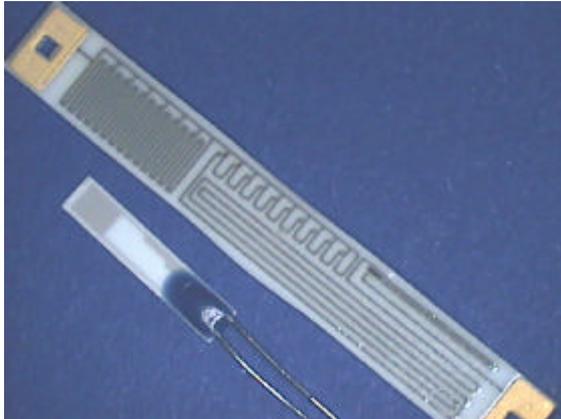


Bild 3: Dünnschicht- und Dickschicht-Pt100



Bild 4: Glas- und Keramik-Pt100

2.3.1.2 Halbleiterwiderstände

Von technischer Bedeutung sind die Spreading-Resistance-Temperatursensoren, die auf der Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes von n-dotiertem Silizium beruhen. Im Bild 5 ist der schematische Querschnitt durch einen unsymmetrischen Spreading-Resistance dargestellt. Ist der Durchmesser d des Kontaktgebietes deutlich kleiner als die Dicke des Siliziumchips ergibt sich für den Widerstand R des Sensors:

$$R = \rho / \pi d \quad (2)$$

mit: ρ ...Spezifischer Widerstand.

Daraus folgt, dass der Widerstand unabhängig von Dickentoleranzen der Si-Scheibe ist und sehr reproduzierbar durch die hohe Genauigkeit der fotolithografischen Strukturierungsverfahren und Dotierungsverfahren bei der Planartechnologie hergestellt werden kann. Typische Durchmesser d für das Kontaktgebiet sind 20 μm .

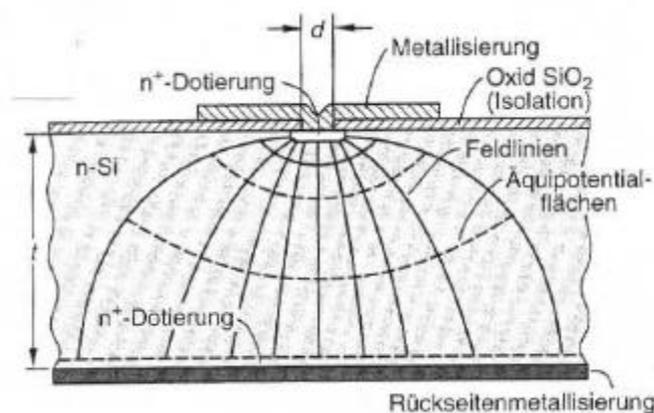


Bild 5: Spreading-Resistance im Querschnitt /2/

Spreading-Resistance-Sensoren werden mit den hochproduktiven Verfahren der Silizium-Halbleitertechnologie hergestellt und sind deshalb sehr kostengünstig. Sie werden

kommerziell mit SOT-Gehäuse (SMD), TO-Gehäuse (steckbar) oder in speziellen Metallgehäusen angeboten. Typische Einsatztemperaturbereiche sind -55 bis 150 °C bzw. -40 bis 300 °C. Die thermische Zeitkonstante des Bauelementes wird in erster Linie durch die Art des Gehäuses bestimmt.

2.3.1.3 Keramikwiderstände

Prinzipiell kann zwischen NTC- und PTC-Keramikwiderständen unterschieden werden.

NTC-Keramiken basieren vorwiegend auf Oxiden und Oxidmischungen (z.B. Spinelle). Für die Herstellung der NTC-Sensoren (Thermistoren) werden spezielle Sinterverfahren genutzt, bei denen neben der Formgebung des Sensors häufig gleichzeitig die Einbettung der Anschlussdrähte erfolgt. Langjährige Entwicklungen haben zu kommerziellen Bauelementen geführt, die sich durch folgende Eigenschaften auszeichnen: hohe Empfindlichkeit, preiswert, stabil und große Formenvielfalt. Bild 6 verdeutlicht die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes eines Thermistors. Eine typische scheibenförmige Bauform eines NTC-Sensors zeigt Bild 8.

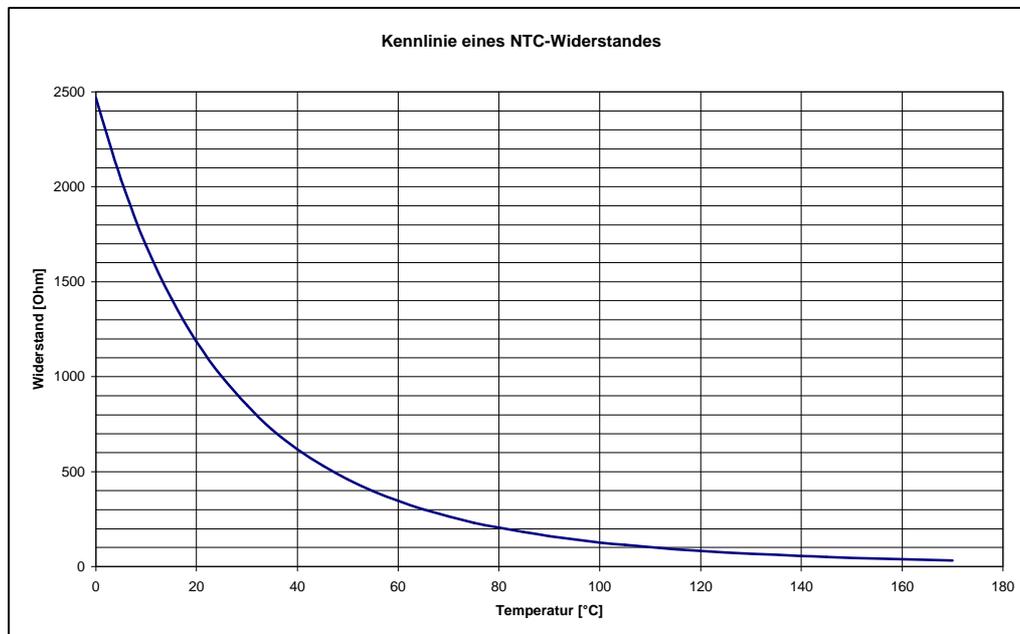


Bild 6: Kennlinie eines NTC-Widerstandes

Ein völlig anderes Temperaturverhalten weisen PTC-Keramikwiderstände auf. Als Werkstoffe werden Keramiken mit einer Perovskitstruktur (z.B. Bariumtitanat) verwendet. Solche Materialien weisen in einem sehr schmalen Temperaturbereich (einige °C) einen sprunghaften Anstieg des Widerstandes über einige Größenordnungen auf. Dieses Verhalten ist auf Effekte an Korngrenzen zurückzuführen. Durch Dotierungen (Antimon) und Zusätze von Bleioxid (PbO) bzw. Strontiumoxid (SrO) kann der Bereich des steilen Widerstandsanstieges bei Bariumtitanat in gewünschte Temperaturbereiche verschoben werden.

Die Eigenschaften von PTC-Keramikwiderständen werden für folgende Anwendungen genutzt:

- Thermische Stabilisierung bei Eigenerwärmung durch eigene Verlustleistung (R steigt \Rightarrow eingespeister Strom sinkt \Rightarrow Eigenerwärmung sinkt $\Rightarrow R$ sinkt)
- Überlastschutz durch Reihenschaltung mit Verbraucherwiderstand.

2.3.2 Thermoelektrische Temperatursensoren

Ein Thermoelement besteht aus zwei Leitern, die aus unterschiedlichen Werkstoffen sind und an einem Ende, der Messstelle, durch Schweißen oder Lötten miteinander verbunden wurden (Thermopaar). Befinden sich die freien Enden des Thermopaars auf einer anderen Temperatur als die Messstelle, tritt eine Thermospannung (EMK) auf. Dieser im Jahr 1821 von T. J. Seebeck entdeckte Effekt (Seebeck Effekt) wird heutzutage umfassend zur Temperaturmessung genutzt.

Im Bild 7 ist eine Thermoelementschaltung gezeigt. Da immer eine Temperaturdifferenz erfasst wird, muß eine Vergleichsstelle bekannter Temperatur definiert werden. Dabei ist wichtig, dass beide Anschlüsse die gleiche Temperatur T_1 besitzen. Besitzen Mess- und Vergleichsstelle die gleiche Temperatur, ist die gemessene Thermospannung Null.

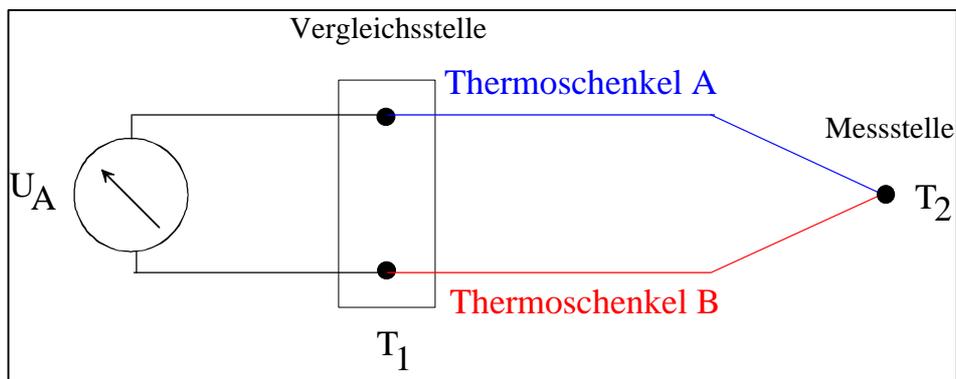


Bild 7: Thermoelementschaltung

Die Thermoempfindlichkeit zwischen zwei Materialien läßt sich aus der thermoelektrischen Spannungsreihe ableiten. In Tabelle 3 ist dies für den Fall angegeben, dass einer der zusammengeschweißten Leiter aus Platin und der andere aus einem der in der Tabelle angegebenen Materialien „X“ besteht. Die Temperaturdifferenz zwischen Messstelle und Anschluss ist auf 100 K festgelegt. Die Einheit der Thermoempfindlichkeit ist somit mV/100 K.

Material X	Thermoempfindlichkeit [mV/100 K]
Wismut	-7,7
Konstantan (Kupfernichel)	-3,47 bis -3,04
Nickel	-1,94 bis -1,2
Platin	0
Wolfram	+0,65 bis +0,9
Platinrhodium (10% Rh)	+0,65
Silber	+0,67 bis +0,79
Kupfer	+0,72 bis +0,77
Iridium	rd. + 0,67
Gold	+0,56 bis +0,8
Eisen	rd. +1,88
Nickelchrom	+2,20
Antimon	rd. +4,8
Silizium	+44,8

Tabelle 3: Thermoelektrische Spannungsreihe für verschiedene Material X-Platin-Thermo-
paare /4/

Wesentliche Kriterien für die Auswahl der industriell genutzten Materialpaarungen sind die erreichbaren Thermospannungen, der Einsatztemperaturbereich, der Preis sowie die Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit der Thermoelementeigenschaften.

Aufgrund der möglichen Vielfalt der Thermoelemente wurde eine internationale Vereinheitlichung durch entsprechende Normung (IEC 584 und DIN 43710) erreicht. So werden Thermoelemente in verschiedene Grundtypen unterteilt (Beispiele in Tabelle 4), die durch spezielle Kennfarben der Zuleitungen einfach unterschieden werden können.

Typ	Thermopaarart	Deutsche Farbkennzeichnung der Einzelleiter (DIN 43714)	Temperaturbereich [°C]
K	Nickelchrom NiCr Nickel Ni	Rot Grün	-200...+1300
N	Nickelchromsilizium NiCrSi Nickelsilizium NiSi		-200...+1300
J	Eisen Fe Kupfernichel CuNi	Rot Blau	-250...+800
T	Kupfer Cu Kupfernichel CuNi	Rot Braun	-250...+400
E	Nickelchrom NiCr Kupfernichel CuNi	Rot Schwarz	-273...+800
R	Platinrhodium PtRh 87/13 Platin	Rot Weiß	0...+1600
S	Platinrhodium PtRh 90/10 Platin	Rot Weiß	0...+1600

Tabelle 4: Grundtypen von Thermoelementen

Thermoelemente gibt es in den unterschiedlichsten Bauformen. Industriell werden häufig Mantel-Thermoelemente eingesetzt. Bei diesen Bauelementen sind beide Thermoschenkel in einem mineralischen Isolierpulver (z.B. Magnesiumoxid) eingebettet und von einem dünnwandigen Metallrohr umgeben. Das Metallrohr ist aus hitzebeständigem und korrosionsfestem Material. Die eingepressten Thermoschenkel sind voneinander und vom Mantel isoliert. Die Messstelle (Schweißpunkt) kann von der Mantelspitze isoliert oder mit ihr verschweißt sein. Typische Manteldurchmesser liegen zwischen 0,25 und 15 mm. Mantelthermoelemente zeichnen sich durch Druck- und Erschütterungsbeständigkeit, Korrosionsfestigkeit und hohe Standzeiten aus.

Im Bild 9 ist die Messstelle eines Typ K-Thermoelementes gezeigt. Die Abhängigkeit der Thermospannung von der Temperatur für ein Typ K-Thermoelement wird in Bild 10 dargestellt. Für die unterschiedlichen Typen variieren die Thermospannungen zwischen 0,03 – 6,5 mV/100 K.

Die Genauigkeit der Temperaturmessung mit Thermoelementen wird insbesondere durch notwendige Zuleitungen (Verwendung von Ausgleichsleitungen) und die Kenntnis der Vergleichsstellentemperatur bestimmt. Der Vorteil der Thermoelemente besteht in dem großen messbaren Temperaturbereich mit einem relativ einfachen Messsystem. Nachteilig sind die nichtlineare Kennlinie, die Notwendigkeit einer bekannten Referenztemperatur und die Alterung der Fühler.



Bild 8: Bauform eines NTC-Sensors



Bild 9: Messstelle eines Typ K-Thermoelementes

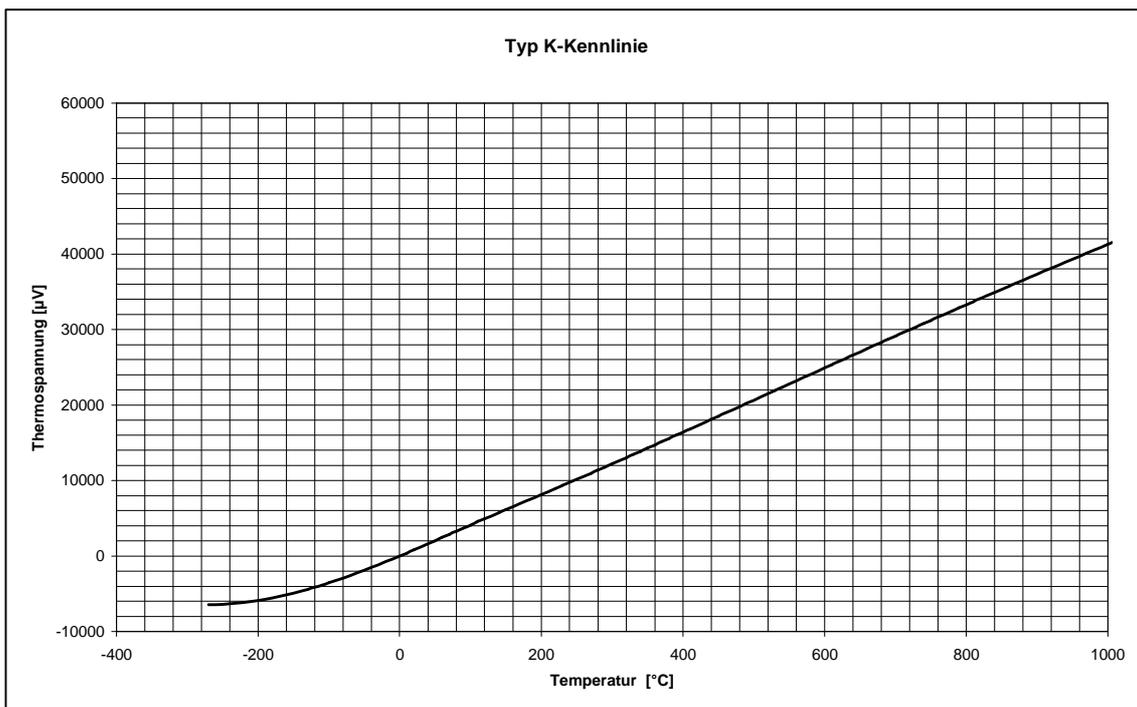


Bild 10: Kennlinie eines Typ K-Thermoelementes

2.3.3 Temperatursensoren mit pn-Übergang

Die Strom-Spannungs-Kennlinie einer pn-Diode weist eine starke Temperaturabhängigkeit (entsprechend Shockly-Gleichung) auf. Diese Abhängigkeit kann genutzt werden, um Halbleitertemperatursensoren auf der Basis von Dioden bzw. Transistoren aufzubauen und gleichzeitig die hochproduktiven Verfahren der Halbleiterindustrie zu nutzen.

Kommerzielle Transistor-Temperatursensoren weisen Empfindlichkeiten von ca. 2 mV/K auf. Sie besitzen eine sehr lineare Kennlinie und sind relativ kostengünstig. Nachteilig sind die

notwendige Spannungsversorgung und Nachfolgeelektronik sowie eine maximale Einsatztemperatur von ca. 200 °C.

Durch Integration mehrerer Transistoren und weiterer Schaltungskomponenten auf einem Siliziumchip können integrierte Temperatursensoren aufgebaut werden, die sich durch eine hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit auszeichnen. Im Bild 11 ist das kontaktierte Chip eines AD 590 der Fa. Analog Devices gezeigt. Der Sensor liefert einen temperaturproportionalen Ausgangsstrom mit einem Anstieg von 1 $\mu\text{A}/\text{K}$. Im vorliegenden Fall wird der AD 590 genutzt, um die aktuelle Innentemperatur eines Infrarot-Sensors zu messen.

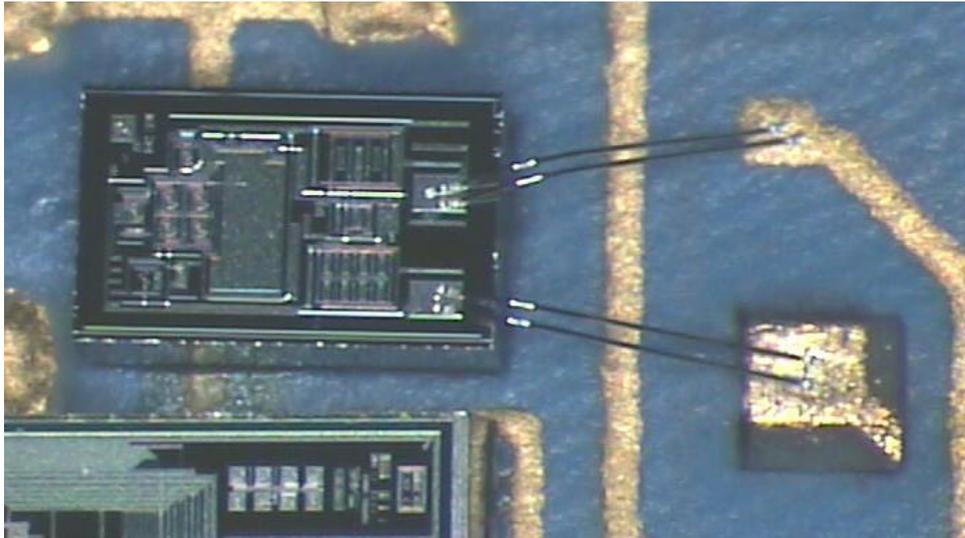


Bild 11: AD 590-Chip in einem Infrarotsensor

3 Praktikumsaufgaben

3.1 Versuch 1

Wirkung parasitärer Temperatureinflüsse bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen

3.2 Versuch 2

Empfindlichkeit und Linearität von resistiven Temperatursensoren

3.3 Versuch 3

Zeitverhalten von Temperatursensoren