

## 6 Temperatursensoren

### 6.1 Temperatur als Messgröße

Praktisch alle physikalischen Eigenschaften sind mehr oder weniger stark temperaturabhängig, können also prinzipiell zur Temperaturmessung eingesetzt werden; anschaulichstes Beispiel ist die thermische Ausdehnung bei Festkörpern, Flüssigkeiten oder Gasen. Für die Anwendung in Sensoren besonders interessant und fast ausschließlich verwendet sind temperaturabhängige Änderungen der *elektrischen* Eigenschaften, die auf einfache Weise automatisch detektiert und elektrisch weiterverarbeitet werden können.

### 6.2 Temperatursensoren im Überblick

Messgerät/-verfahren	Ausgangssignal	Temperaturbereich in °C
<b>1. Berührungsthermometer</b>		
<i>Thermoelemente</i>	<b>elektrisch</b>	
Fe-CuNi Typ L und 1	Spannung	-200- 900
NiCr-Ni Typ K und N		0-1300
PtRh10/0 Typ S		0-1760
PtRh30/6 Typ 8		0-1820
<hr/>		
<i>Widerstandsthermometer</i>	<b>elektrisch</b>	
Platin-Widerstandsthermometer	Widerstand	-250-1000
Heißleiter-Widerstandsthermometer		-100- 400
Kaltleiter-Widerstandsthermometer		5- 200
Silizium-Widerstandsthermometer		-70- 175
<hr/>		
<i>Ausdehnungsthermometer</i>	<b>mechanisch</b>	
Flüssigkeits-Glasthermometer	Volumenänderung	-200 -1000
Flüssigkeits-Federthermometer	Volumenänderung	-35- 500
Bimetallthermometer	Längenänderung	-50- 400
Dampfdruck-Federthermometer	pneumatisch, Druck	-200- 700
<hr/>		
<b>2. Strahlungsthermometer</b>	<b>elektrisch</b>	

Spektralpyrometer	in Abhängigkeit vom Empfänger:	20-5000
Bandstrahlungs-pyrometer	- Widerstand,	-100 - 2000
Gesamtstrahlungs-pyrometer	- Spannung	-100 -2000
<b>Thermografiegeräte</b>	- elektrische Polarisation	-50 -1500

### 3. Besondere Temperaturverfahren

Quarzthermometer	<b>elektrisch</b> , Frequenz <sup>a</sup>	-80- 250
Flüssigkristalle	<b>optisch</b> , Wellenlänge	bis 3300
Faseroptische Luminiszenzthermometer	<b>optisch</b> , Wellenlänge	bis 400
Rauschthermometer	<b>elektrisch</b> , Spannung	-269 - 2000

<sup>a</sup> zeitdiskretes Signal

*Erläuterungen: Ein **Bimetall** ist ein Metallstreifen aus 2 Schichten unterschiedlichen Materials. Die besondere Eigenschaft ist die Formveränderung (Biegung) aufgrund unterschiedlicher Längenausdehnungskoeffizienten der beiden Metalle. Wegen seiner temperaturabhängigen Form lassen sich somit Thermometer oder Temperaturschalter erzeugen. Dazu wird meist ein Ende eines solchen Streifens (z. B. im Thermometer) befestigt; Bei einer Temperaturveränderung verbiegt sich der Streifen, und das freie Ende verändert seinen Ort.*

### 6.3 Temperaturmessmethoden - Effekte, die sich für die Temperaturmessung ausnutzen lassen [3]

#### 6.3.1 Thermowiderstände – Thermistoren – Resistance Temperature Detectors (RTD)

Unter dem Thermowiderstands-Effekt wird die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Temperatur verstanden. Je nach Material und Temperaturbereich unterscheiden sich die Ursachen für die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit und des sich danach einstellenden Stromflusses. Während bei *Metallen* mit steigender Temperatur die Zunahme der Gitterschwingungen die Beweglichkeit der Ladungsträger und somit die elektrische Leitfähigkeit herabsetzt, ist bei *Elementhalbleitern* neben den Streumechanismen der zusätzliche Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerdichte zu berücksichtigen.

Als Streuzentren für Ladungsträger im Festkörper wirken Phononen, ionisierte und neutrale Störstellen, Leerstellen und Zwischengitterbesetzungen, Versetzungen, Korngrenzen und Oberflächen sowie die Ladungsträger selbst. So lassen sich *keramische Metalloxide* mit geeigneter Kristallstruktur oder Korngrenzenstruktur finden, die eine negative oder eine positive Charakteristik hinsichtlich ihres temperaturabhängigen elektrischen Widerstandes aufweisen (*NTC, PTC*).

In einem isotropen metallischen Leiter wirkt bei Anlegen einer äußeren Spannung an jedem Punkt eine elektrische Feldstärke, welche die im Leiter frei beweglichen Ladungsträger beschleunigt und somit einen Stromfluss bewirkt. Der Proportionalitätsfaktor zwischen

elektrischer Feldstärke und Stromdichte ist die elektrische Leitfähigkeit ( $\sigma$  bzw. der spezifische Widerstand  $\rho$ ).

$$U = R \cdot I$$

$$R = \rho \cdot l/A = 1/\sigma \cdot l/A$$

mit  $\rho$ : spezifischer Widerstand ( $\Omega \cdot m$ ) (spezifische Größen immer „pro Länge oder Masse“)

und  $\sigma$ : elektrische Leitfähigkeit ( $1/\Omega \cdot m$ )

wobei bei mikroskopischer Betrachtung

$$\sigma = q \cdot n \cdot u(T) = q \cdot n \cdot (\tau_F \cdot q/m)$$

mit  $u(T)$ : temperaturabhängige Ladungsträgerbeweglichkeit

und  $n$ : Zahl der Ladungsträger mit der Ladung  $q$  pro Einheitsvolumen

und  $\tau_F$ : mittlere freie „Flugzeit“ zwischen zwei Stößen

(Siehe auch: Halliday, Resnick, Walker, Physik, Wiley-VCH, S. 764f.)

Für den spezifischen Widerstand lässt sich makroskopisch die folgende Temperaturabhängigkeit formulieren:

$$\rho - \rho_0 = \rho_0 \cdot \alpha \cdot (T - T_0)$$

mit  $\rho_0$ : spezifischer Widerstand bei einer frei wählbaren Referenztemperatur  $T_0$  ( $20^\circ\text{C} = 298,15\text{ K}$  in obiger Tabelle).

und  $\alpha$ : empirisch zu bestimmender Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands.

Spezifischer Widerstand  $\rho$  einiger Stoffe bei Raumtemperatur ( $20^\circ\text{C}$ )

Stoff	Spezifischer Widerstand $\rho$ [ $\Omega \cdot m$ ]	Temperaturkoeffizient $\alpha$ des spezifischen Widerstands ( $\text{K}^{-1}$ )
<i>Typische Metalle</i>		
Silber	$1,62 \cdot 10^{-8}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
Kupfer	$1,69 \cdot 10^{-8}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Aluminium	$2,75 \cdot 10^{-8}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$
Wolfram	$5,25 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Eisen	$9,68 \cdot 10^{-8}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$
Platin	$10,6 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Manganin <sup>a</sup>	$4,82 \cdot 10^{-8}$	$0,002 \cdot 10^{-3}$

Typische Halbleiter

Silizium, rein	$2,5 \cdot 10^3$	$-70 \cdot 10^{-3}$
Silizium, n-leitend <sup>b</sup>	$8,7 \cdot 10^{-4}$	
Silizium, p-leitend <sup>c</sup>	$2,8 \cdot 10^{-3}$	

Typische Isolatoren

Glas	$10^{10} - 10^{14}$
Quarkristall	$- 10^{16}$

<sup>a</sup> Legierung mit besonders kleinem Wert von  $\alpha$ .

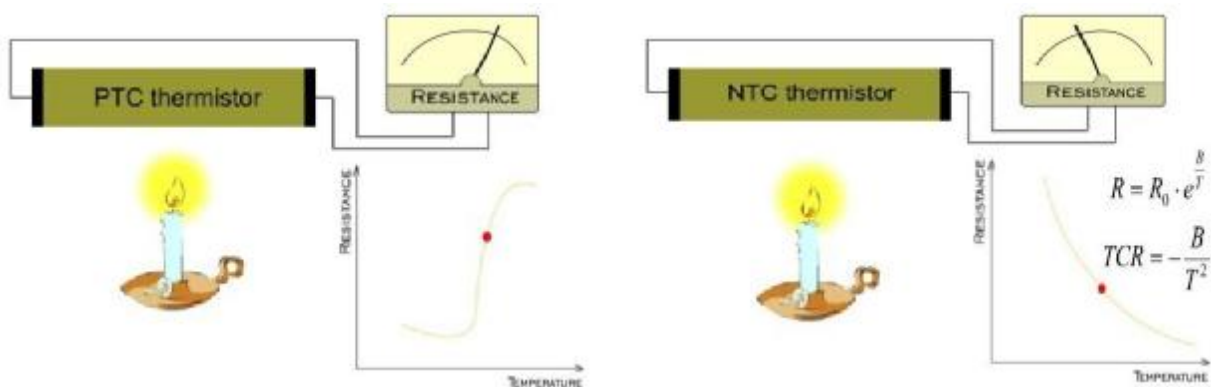
<sup>b</sup> Reines Silizium, mit Phosphor bis zu einer Ladungsträgerdichte von  $10^{23} \text{ m}^{-3}$  dotiert.

<sup>c</sup> Reines Silizium, mit Aluminium bis zu einer Ladungsträgerdichte von  $10^{23} \text{ m}^{-3}$  dotiert.

Quelle: Halliday, Resnick, Walker, Physik, Wiley-VCH, S. 760

Speziell zur Temperaturmessung und -regelung entwickelte PTC- (positive temperature coefficient) und NTC- (negative temperature coefficient) Thermistoren, d. h. Widerstände mit positivem oder negativem Temperaturkoeffizienten (Kaltleiter, Heißeiter), fanden und finden in der technischen Elektrik breite Verwendung. Ihr Anwendungsbereich ist allerdings meist auf Temperaturen beschränkt, in denen technische Geräte, Haushaltsgeräte etc. arbeiten.

The name “thermistor” was introduced for temperature sensitive resistors with large temperature dependency that was found at transition metal oxides. These simple devices are prepared by ceramic processing technology. Since a negative temperature coefficient of resistance is observed in semiconductor oxides, such as the precisely controlled mixtures of the oxides of Mn, Co, Ni, Cu, and Zn, these sensors were named NTC-thermistors. PTC-thermistors have opposite type characteristic, which is resulted in by the temperature dependent electrical properties of grain boundaries in doped piezoelectric (e.g. BaTiO<sub>3</sub>) ceramic materials. The steep increases of resistance of the latter type make them particularly useful as self-regulating heating elements, current limiting devices, etc.



Beispiel für einen Thermistor mit positivem Temperaturkoeffizienten. Anwendung: Selbst-regulierende Heizelemente oder Strombegrenzer.

Beispiel für einen Thermistor mit negativem Temperaturkoeffizienten. TCR: „temperature coefficient of resistance“. B: Empirische Konstante. Anwendung: Schalter, da  $\Delta R \uparrow$  bei  $\Delta T \downarrow$ . (Exponentialfunktion  $e^x$ , mit  $x \neq \text{const.}$ ) Quelle: [www.sensedu.com](http://www.sensedu.com) effects/thermal

In einem weiteren Temperaturbereich einsetzbar und daher für physikalische Experimente interessanter (aber auch teurer) sind Platin-Widerstände mit besonderen Spezifikationen (Pt 100), die eine sehr ausgeprägte, gut definierte und dokumentierte Temperaturabhängigkeit zwischen etwa 10 K und 1000 K aufweisen. Alle PT100-Sensoren haben 100 Ohm Innenwiderstand und alle PT1000-Sensoren einen Innenwiderstand von 1000 Ohm. Diese Werte gelten bei 0°C. Der Temperaturkoeffizient der Sensoren ist einheitlich 3850 ppm/K. Das heißt der Innenwiderstand des Sensors ändert sich bei 1 Grad Temperaturänderung um 0,385%.

Interpolationsinstrument, z.B. Platindraht höchster Reinheit zur Widerstandsmessung und Temperaturberechnung  $R_{100}/R_0=1,385$  (wobei die Indizes hier auf die Temperatur verweisen) in Deutschland gebräuchlich, leicht legiertes Pt ist wesentlich stabiler gegen Diffusion von Fremdstoffen als hochreines Pt mit  $R_{100}/R_0 > 1,391...1,392$ . In einem Platinwiderstandsthermometer kann der Widerstand als Funktion von T über

$$R_t/R_0 = 1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 + \mathbf{K}$$

beschrieben werden.

Für  $R_{100}/R_0 = 1,385$  gilt:

$$A = 3.908 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$$

$$B = - 0.578 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$$

Für tiefe Temperaturen (1 K bis 100 K) geeignet sind Kohle-Widerstände und spezielle Halbleiter-Widerstände (Ge) oder -Dioden (Si), die man auch mit genauer, individuell erstellter Eichung (dann sehr teuer) kaufen kann.

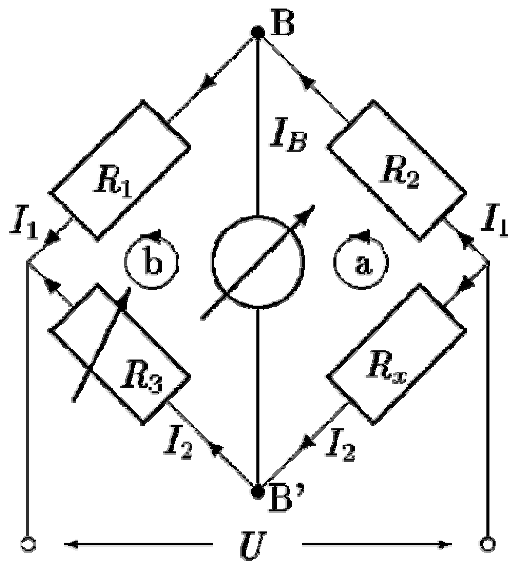
### 6.3.1.1 Messaufbau für den Einsatz von Thermowiderständen

Hochgenaue Widerstandsmessungen lassen sich nur mit

- 1) Brückenschaltung und
- 2) Konstantstromquelle und Spannungsmessgerät

realisieren.

Die Wheatstone'sche Brücke ist ein sehr bequemes Hilfsmittel für die Messung von Widerständen.



Verschaltung von Widerständen in einer Wheatstone'schen Brückenschaltung. Gemessen wird der Brückenstrom  $I_B$ .  
Quelle: <http://www.unibas.ch/phys-ap/vers36/vers36.htm>

Der unbekannte Widerstand  $R_x$  wird mit drei Widerständen  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  zu einem Kreis zusammengeschaltet. Zuerst wird die Brücke abgeglichen, d.h. im Brückenweig  $BB'$  die Stromstärke auf Null eingeregelt. Dies kann beispielsweise durch Variieren von  $R_3$  geschehen. Brückenstrom  $I_B = 0$  bedeutet, dass zwischen  $B$  und  $B'$  keine Spannung vorhanden ist. Das Kirchhoff'sche Maschengesetz\* für die beiden Maschen der abgeglichenen Brücke lautet:

$$I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_3 = 0$$

$$I_1 \cdot R_2 - I_2 \cdot R_x = 0$$

Der unbekannte Widerstand  $R_x$  bestimmt sich hieraus zu

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_3,$$

was bedeutet, dass zur Bestimmung des unbekanntes Widerstandes  $R_x$  ein Widerstand gegeben und das Verhältnis der beiden anderen bekannt sein muss. Voraussetzung für eine Präzisionsmessung ist eine hohe Güte der verschalteten Widerstände.

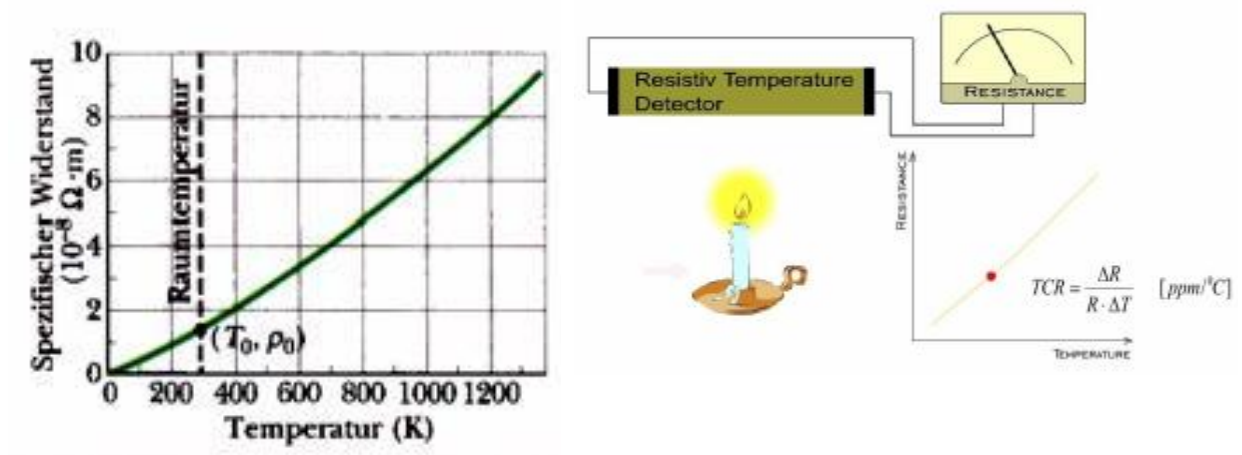
\*Beim Durchlaufen einer Masche (also einer geschlossenen Schleife) in einem willkürlich festgelegten Umlaufsinn ist die Summe aller Spannungen gleich null.

Bei der Temperaturmessung mit Widerständen ist – insbesondere bei tiefen Temperaturen – darauf zu achten, dass die zur Messung benötigte Leistung und damit die Wärmezufuhr möglichst gering ist. A RTD is a resistance device and it needs measuring current to generate a useful signal. Because this current heats the element above the ambient temperature ( $P = I^2 \cdot R$ ), errors can turn up, unless the extra heat is dispersed. This forces us to choose a small-sized resistance device with fast response or a larger resistance device and better heat release. A second solution is to keep the measuring current usually between 1 mA and 5 mA.

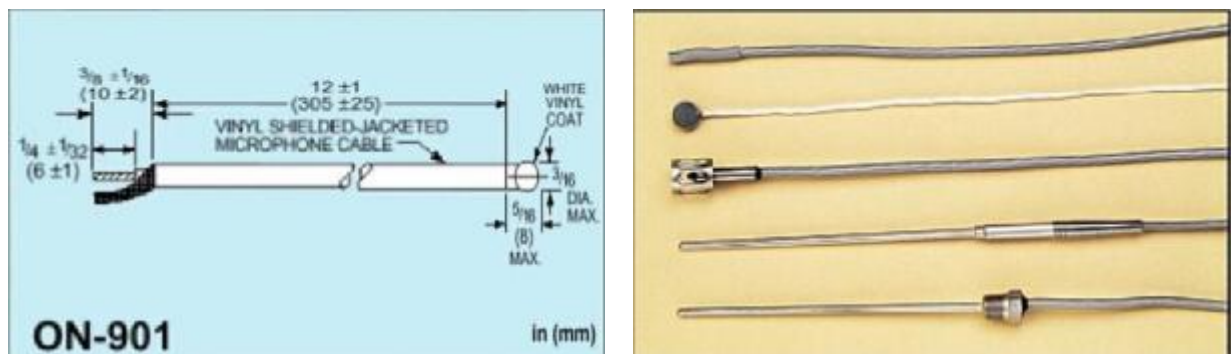
### 6.3.1.2 Thermowiderstands-Effekt in Metallen

Resistance temperature detector (RTD) is the commonly used term for temperature sensors the operation of which are based on the positive temperature coefficient of metals. For many metals, the resistivity via temperature characteristic,  $\rho(T)$ , is approximately linear within a limited range.

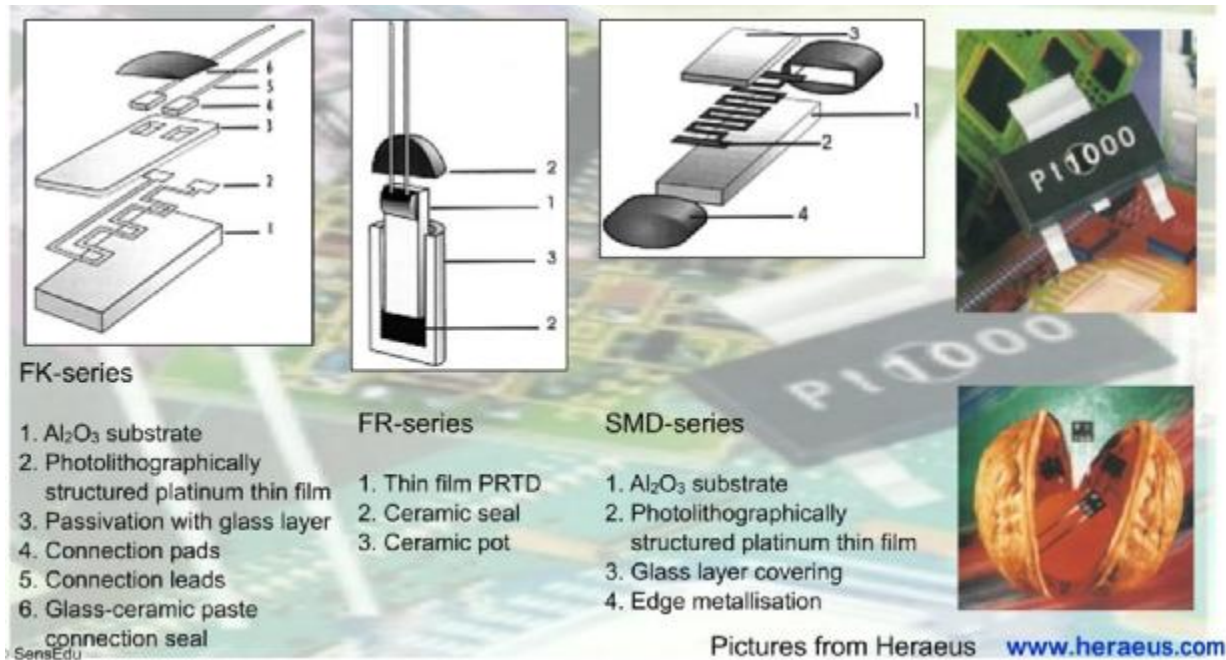
The above phenomenon can be exploited in temperature sensors made of metal wires, as well as of thin- and thick-film materials. The largest and most reproducible TCR values can be found in materials that are free from impurities and defects. Platinum RTDs are the most known and well-standardized types, but other metals, such as copper and nickel, are also used in low-cost applications.



Links: Spezifischer Widerstand von Kupfer in Abhängigkeit von der Temperatur. Zur Orientierung ist derjenige Punkt der Kurve eingezeichnet, welcher der Raumtemperatur ( $T_0 = 293$  K) entspricht. Der spezifische Widerstand von Kupfer beträgt bei dieser Temperatur  $\rho_0 = 1,69 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ . Quelle: Halliday, Resnick, Walker, Physik, Wiley-VCH, S. 761. Rechts: Cartoon der Messanordnung mit TCR: „temperature coefficient of resistance“. Quelle: [www.sensedu.com](http://www.sensedu.com/effects/thermal%20effects/thermoreisitive%20phenomena) effects/thermal effects/thermoreisitive phenomena Page 2



Typische Thermistorbauarten: Schema eines vinyl-gekapselter Thermowiderstand am rechten Ende eines Mikrophonkabels (links). Andere Bau- und Kapselarten (rechts). Quelle: [www.omega.com/temperature](http://www.omega.com/temperature); [www.sensedu.com](http://www.sensedu.com/effects/thermal%20effects/thermoreisitive%20phenomena) effects/thermal effects/thermoreisitive phenomena Related Topics/Thermistors

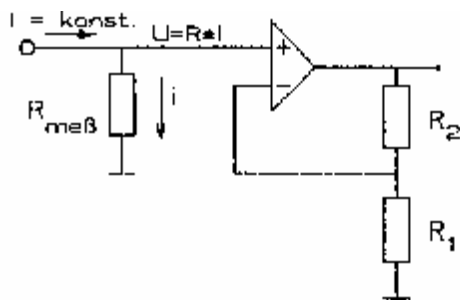


Moderne miniaturisierte Bautypen in Dünnschicht- oder Dickschichttechnik auf Keramik für Pt-Thermowiderstände. Auf einen spannungsfreien Aufbau muss geachtet werden, da der Sensor kein Dehnmessgerät sein soll. Quelle: [www.sensedu.com](http://www.sensedu.com) effects/thermal effects/thermoresistive phenomena Related Topics/resistance thermometers

Platin-Widerstandsdraht wird manchmal gekapselt, da sich sein Widerstand empfindlich auf eindringende Fremdstoffe ändert. Aufbau: eine Platindrahtwendel wird um zwei gekreuzte Glimmerstreifen gewickelt und in ein evakuiertes Glasrohr eingeschmolzen (veraltet). Neuerdings: Dünnschicht oder Dickschicht auf Keramik.

Billiger: Ni ( nichtlinear )  
Cu ( kleine Empfindlichkeit, kleiner Messbereich )

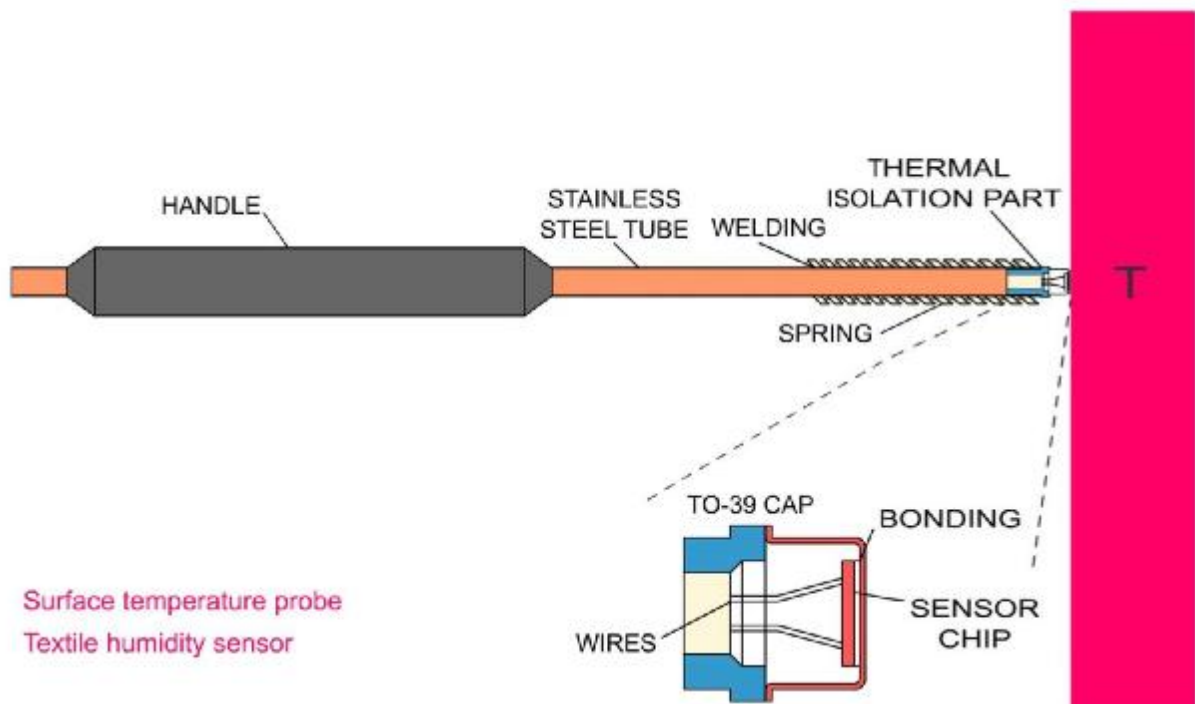
Eine übliche Verstärker-Messschaltung für Pt-Widerstandsthermometer ist im nachfolgend skizziert als Alternative zu einer Wheatstone'schen Brückenschaltung.



$$U_A = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot R_{Mess} \cdot I$$

Aufbau einer gängigen Messschaltung für Pt-Widerstandsthermometer

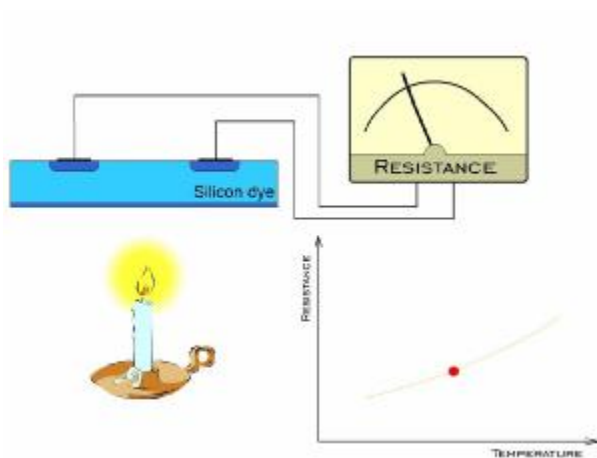
## SURFACE TEMPERATURE PROBE



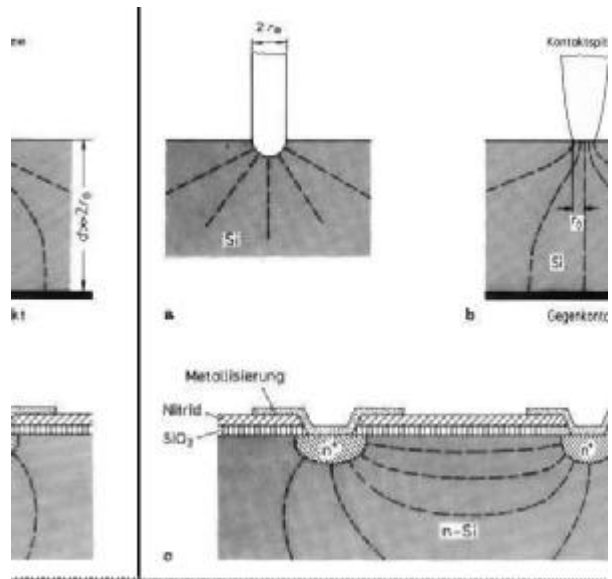
Beispiel für ein Oberflächenthermometer. Quelle: [www.sensedu.com](http://www.sensedu.com) Application/industrial/quality and test

### 6.3.1.3 Thermowiderstandseffekt in (dotierten) Halbleitern

Other temperature sensitive resistors made of crystalline materials, mainly of silicon, have also been developed. Devices based on the closely linear PTC behaviour characteristic for slightly doped silicon found application in integrated microelectronic circuits. The structure of the so-called spreading resistance thermometer is shown in this animation. The resistance is practically measured between two strongly doped diffusion islands as two resistor elements between the latter ones and the highly doped film on the bottom, as shown in the figure. Because of applying silicon processing, the elements may show very good reproducibility.



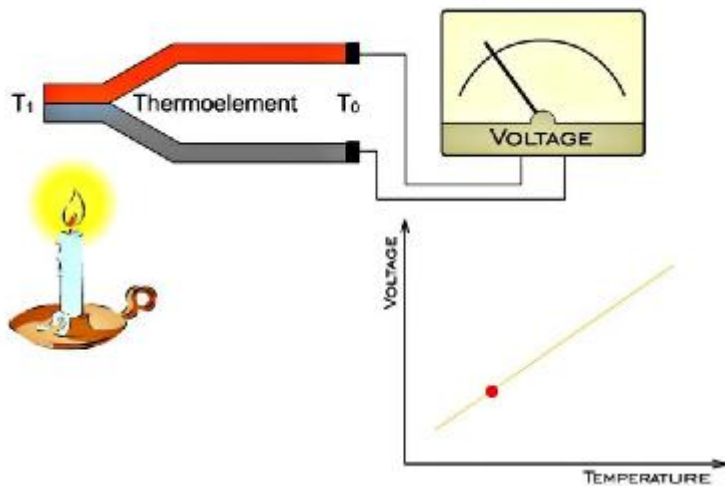
Quelle: [www.sensedu.com](http://www.sensedu.com) Measuring parameters/thermal/spreading resistance thermometer



Ausbreitungswiderstand an Kontakten  
 a) zentralsymmetrische Feld- und Stromverteilung  
 b) "Einspitzenmethode"  
 c) Realstruktur eines Si-Tempersensors auf Basis des Ausbreitungs-Widerstandes  
 Quelle: <http://www.michael-muth.de/lectures/TempSens/chap05.html#a02>

### 6.3.2 Thermoelektrischer Inhomogen-Effekt: Seebeck-Effekt (1822) in Thermoelementen - Thermocouples

Thermoelemente nutzen die materialspezifische Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerverteilung in Metallen oder Halbleitern aus. Diese Eigenschaft wird *Seebeck-Effekt* genannt (*Thomas Johann Seebeck*, dt. Physiker, 9.4.1770 – 10.12.1831): In einem aus zwei verschiedenen, homogenen Leitern gebildeten Stromkreis entsteht eine Thermospannung  $U_S$ , wenn die Lötstellen unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Die Thermospannung ist der Temperaturdifferenz proportional, wobei der Proportionalitätskoeffizient als *differentielle Thermokraft = Seebeck Koeffizient = Empfindlichkeit = thermopower = thermoelectric power* bezeichnet wird.



[www.sensedu.com/effects/thermal effects/thermoelectric effect](http://www.sensedu.com/effects/thermal%20effects/thermoelectric%20effect)

A thermoelement (also called thermocouple) is a junction of two conducting (metal or semiconductor) materials, A and B, electrically connected at a "hot" point of temperature,  $T_1$ . The nonconnected ends of both legs are kept at another temperature  $T_0$  ("cold" point). In the open circuit case, the net current flow through the thermoelement is zero and a thermoelectric or Seebeck voltage can be observed between the thermocouple leads at the cold point.

For small temperature differences, this can be approximated as:  $U_S = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot (T_1 - T_0) = \alpha_{A/B} \cdot (T_1 - T_0)$  where  $\alpha_A$  and  $\alpha_B$  denote the Seebeck coefficients (thermopower or thermoelectric power) of materials A and B.

They express specific transport properties, determined by the band structure and the carrier transport mechanisms of the materials.  $U_S$  is always created in an electrically conducting material when a temperature gradient is maintained along the sample, but it can not be observed with two legs of the same material for reasons of symmetry. Thermocouple sensor types are widely used in the practice. They are standardized and many types are available using both precious and base metal wire pairs.

Zwei mit einander verbundene Metalle erzeugen an der Kontaktstelle (aufgrund unterschiedlicher Elektronenmobilität) einen Spannungsabfall.

Thermoelemente benötigen immer eine Referenztemperatur  $T_0$ . Referenzpunkte bilden beispielsweise:

- Eis - Wasser - Gemisch
- elektronischer Thermostat
- elektronischer Temperatursensor mit kalibrierter Ausgangsspannung für übliche Umgebungstemperatur.
- Umgebungstemperatur für ungenaue Hochtemperaturmessung

Obwohl der thermoelektrische Effekt (Thermokraft) im Allgemeinen in Halbleitern größer ist, werden aus praktischen Gründen geeignete Kombinationen aus verschiedenen Metallen oder Metall-Legierungen verwendet. Definiert wird die

Empfindlichkeit (Thermokraft):  $k_{th} = dU_{th}/dT$  [ $\mu V/K$ ]

Einige gebräuchliche *Thermopaare* sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

Thermopaar	Temperaturbereich	Diff. Thermospannung = Seebeck-Koeffizienten bei 0°C
Gold Eisen – Nickel Chrom	-270°C. . . 0°C	20 $\mu V/K$
Kupfer – Konstantan	-200°C. . . 600°C	40 $\mu V/K$
Eisen – Konstantan	-200°C. . . 900°C	52 $\mu V/K$
Nickel Chrom – Konstantan	0°C. . . 1000°C	63 $\mu V/K$
Nickel Chrom – Nickel	-200°C. . . 1370°C	40 $\mu V/K$
Platin Rhodium – Platin	0°C. . . 1750°C	55 $\mu V/K$
Wolfram Rhenium 5 – 26	0°C. . . 2500°C	10 $\mu V/K$
Eisen - Platin		18 $\mu V/K$
Nickel -Platin		-18 $\mu V/K$
Eisen - Nickel		36 $\mu V/K$

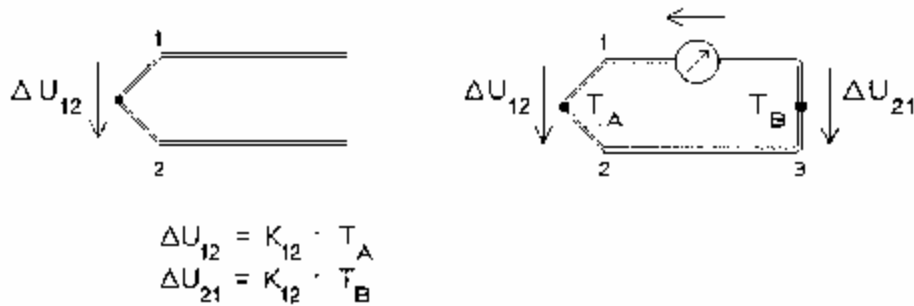
*Typischer Anwendungstemperaturbereich und differentielle Thermospannung gebräuchlicher Thermoelemente.*

Die Vorteile von Thermoelementen liegen in ihrem großen Anwendungstemperaturbereich, ihrer relativ einfachen Handhabung und dem günstigen Preis. Nachteilig ist das geringe elektrische Signal, das ein empfindliches Messgerät bzw. eine stabile Verstärkung erfordert, und die Notwendigkeit einer Referenzstelle (Eisbad) mit definierter, konstanter Temperatur.

Bei der Herstellung von Thermoelementen ist insbesondere auf guten elektrischen Kontakt zwischen den beiden Materialien zu achten (Punkt- oder Mikroschweißung). Teure Thermoelemente können mit *Ausgleichsleitungen* angeschlossen werden. Genauer ist dies in den Datenblättern der Hersteller beschrieben, die meist auch ausführliche Tabellen der temperaturabhängigen Thermospannungen enthalten.

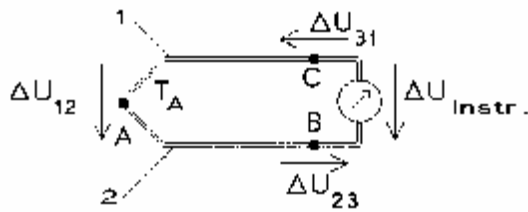
*Einschub:*

Anders als die Widerstandsthermometer sind diese unempfindlich gegen Eindiffusion von Fremdstoffen in die Verbindungsstelle.



*Thermoelement und Prinzip Messanordnung*

Dieser Spannungsabfall ist nicht direkt messbar, da die Drähte 1 und 2 am Messgerät an die Messbuchsen des Materials 3 angeschlossen werden.



*Thermoelement mit Verbindungsspannungen*

Sofern die Klemmen des Instruments auf gleicher Temperatur liegen, gehen diese und das Material der Anschlussklemmen nicht in die Messung ein.

Es gilt:  $k_{31} = -k_{13}$

$$k_{12} + k_{23} + k_{31} = 0$$

Forderung:  $T_B = T_C$

Die Summe aller  $k_{ij}$  in einem Kreis ist Null (Energiesatz). Falls alle Temperaturen gleich sind, darf kein Strom fließen.

$$\Delta U_{12} = k_{12} \cdot T_A$$

$$\Delta U_{23} = k_{23} \cdot T_B$$

$$\Delta U_{31} = k_{31} \cdot T_C$$

$$\begin{aligned} U_{\text{Meß}} &= \Delta U_{31} + \Delta U_{12} + \Delta U_{23} \\ &= k_{31} T_C + k_{23} T_B + k_{12} T_A \\ &= (k_{31} + k_{23}) T_B + k_{12} T_A \quad (\text{wegen } T_B = T_C) \\ &= -k_{12} T_B + k_{12} T_A \end{aligned}$$

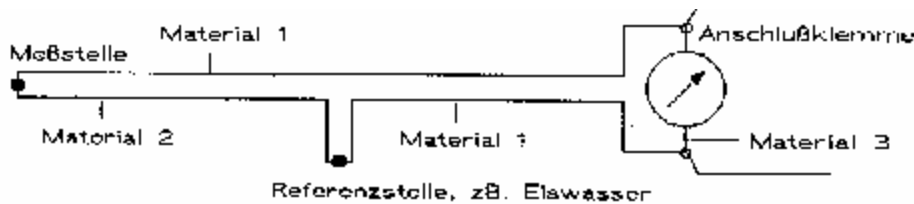
$$U_{\text{Meß}} = k_{12} (T_A - T_B)$$

*Spannung am Thermoelement*

Beispiel:

1. Ein Punkt als Spannung = Null definieren (meist eine Seite des Messinstrumentes) und einen Verbindungspunkt als Temperaturbezug definieren (z.B. Punkt B). Temperaturbezug elektronisch oder durch Eiswasser stabilisieren.
2. An allen Kontaktstellen zweier verschiedener Metalle wird deren Temperatur und erzeugte Spannungsdifferenz mit Richtungspfeil geschrieben.
3. Aufsummieren, welche Spannung am Instrument erscheint.

Typische Anordnung:



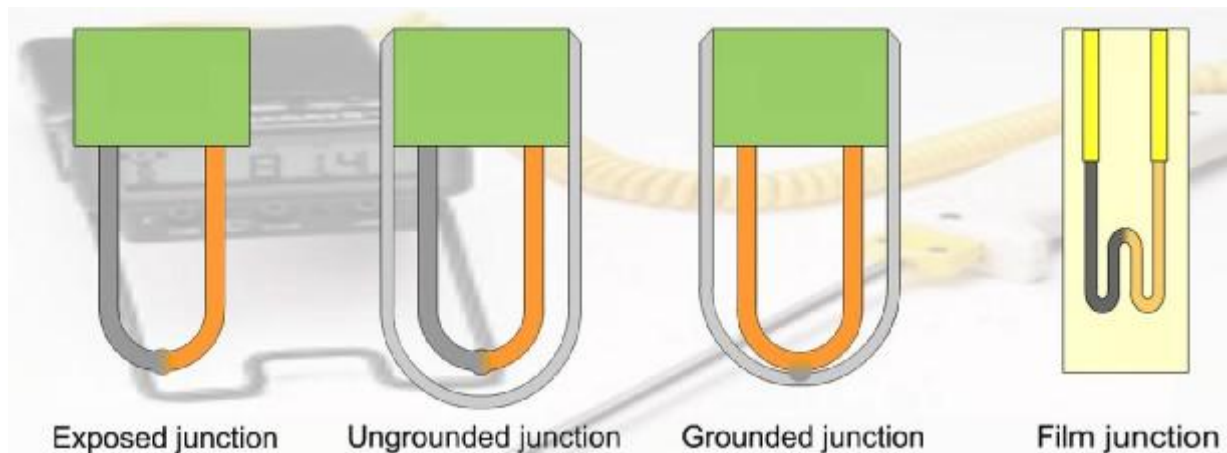
Messanordnung für Thermoelementmessung

Ende Einschub

### 6.3.2.1 Bauarten von Thermoelementen

Die beiden metallischen Leiter bilden ein Thermopaar. Sie sind an der Kontaktstelle, der Messstelle verschweißt, verlötet oder verschraubt. Durch das Einwirken von Gasen, Dämpfen, Fett oder Metallspänen (besonders bei hohen Temperaturen) entstehen Inhomogenitäten in den Thermopaaren und damit zusätzliche Thermospannungen und Korrosion. Deshalb werden die Thermoelemente oft von einem Schutzrohr aus Metall oder Keramik geschützt. Deren Wärmekapazität hat natürlich einen Einfluss auf die Einstellzeit.

- **Miniatur-Mantel-Thermoelement:** Das Thermopaar ist in einem pulverförmigen Isolator eingebettet und von einem Metallmantel umgeben. Der Mantel lässt sich biegen und ermöglicht eine Temperaturmessung auch an schwer zugänglichen Orten.
- **Tauchthermoelemente:** Für kurzzeitige Temperaturmessungen in Stahlschmelzen (1350°C). Die Stahlschmelze schmilzt beim Eintauchen ein kleines Stahlblech, das die Messstelle schützt und bildet dann den Kontakt zwischen den beiden Thermopaarschenkeln.
- **Folienthermoelemente:** Sie werden auf das Messobjekt aufgeklebt (Philips)
- **Serieschaltung von Thermoelementen:** Führt zur Erhöhung der Empfindlichkeit (Strahlungspyranometer)



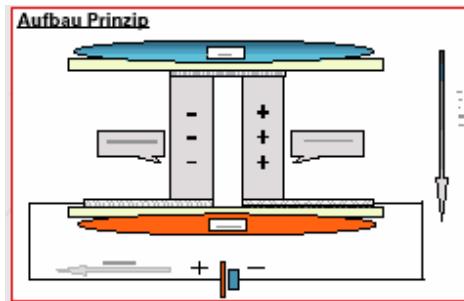
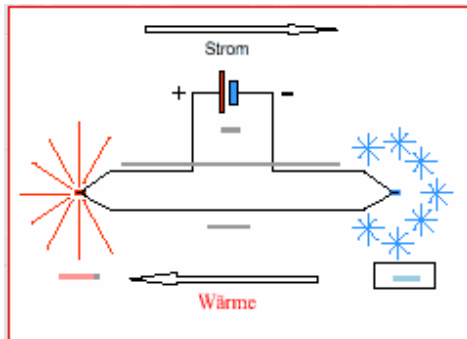
Pictures from Omega [www.omega.com/temperature](http://www.omega.com/temperature)

Prinzipielle Bauweisen von Thermoelementen (oben) und einige Beispiele (unten). Quelle: [www.sensedu.com/effects/thermal effects/thermoelectric effect + Related topics/thermoelements](http://www.sensedu.com/effects/thermal%20effects/thermoelectric%20effect%20-%20Related%20topics/thermoelements)

### 6.3.3 Peltier-Effekt (1834)

Wird eine Thermoelement-Anordnung in „umgekehrter“ Richtung betrieben, d.h. statt eine Temperatur anzulegen und eine Spannung zu messen, eine äußere Spannung an die beiden Metallarme anzulegen, so kann, je nach Richtung der angelegten Spannung, die Kontaktstelle der beiden Materialien erwärmt oder abgekühlt werden. Diese Umkehrung des *Thermoelektrischen Inhomogen-Effektes* wird *Elektrothermischer Inhomogen-Effekt* genannt und ist als *Peltier-Effekt* bekannt. (Jean Charles Athanasa Peltier, fr. Physiker, 22.2.1785 – 27.10-1845)

Fließt in einem aus zwei verschiedenen homogenen Leitern gebildeten Kreis ein Strom, so wird den Lötstellen je nach Stromrichtung Wärme zugeführt bzw. entnommen (*Peltier-Wärme*). Die erzeugte bzw. absorbierte Wärmemenge ist der fließenden Stromstärke direkt proportional, wobei der Proportionalitätsfaktor als Peltier-Koeffizient bezeichnet wird. Einsatz bei Kühlelementen. Der Temperaturunterschied kann bis zu 73°C bei einem einfachen Element und bis zu 100°C bei mehrstufigen Elementen betragen.

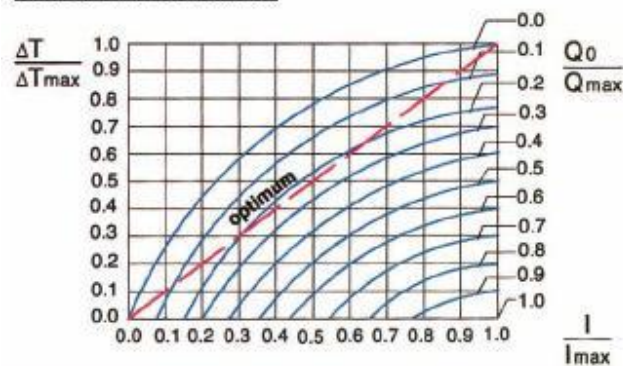


Um eine hohe Kälteleistung zu erhalten, müssen die einzelnen Peltier-Elemente thermisch parallel und elektrisch seriell geschaltet werden.

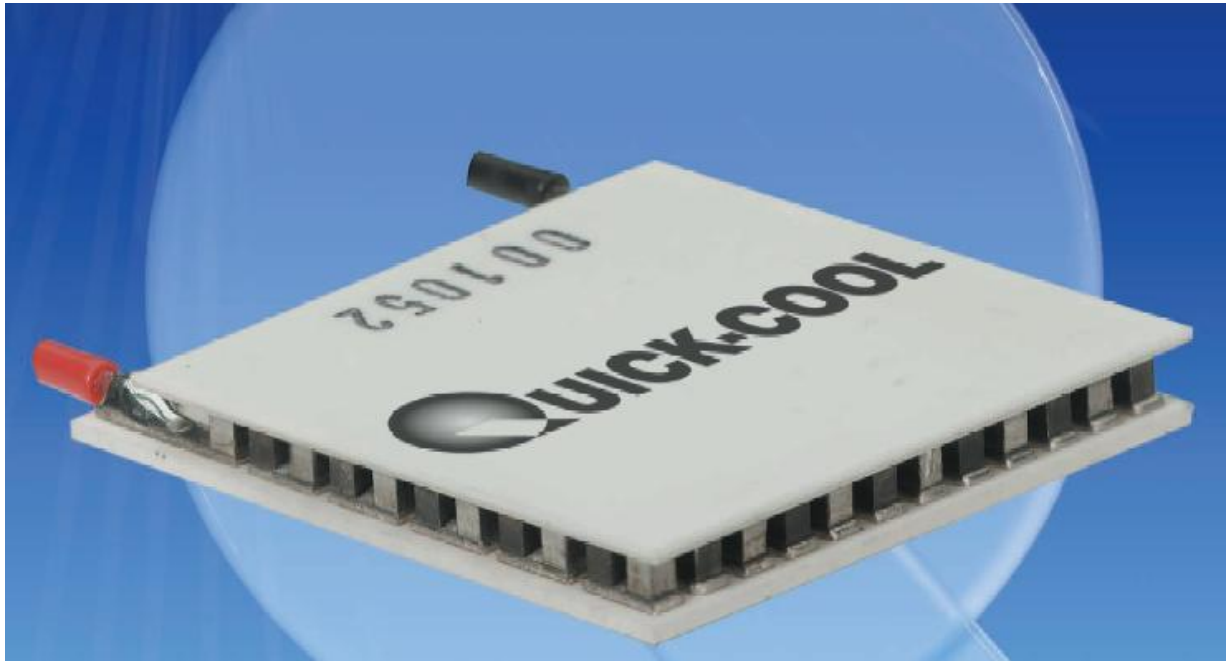
maximale Temperaturdifferenz im Vakuum, °C	Anzahl der übereinander montierten Elemente
72	1
94	2
110	3
117	4

Ist die gewünschte Temperaturdifferenz kleiner als 50°C, dann sind Elemente mit mehr als einer Stufe nicht effektiv.

### Leistungs-Diagramm



Die diagonale Optimum-Gerade  $Q_0 / Q_{max}$  korrespondiert mit der maximalen Kühlkapazität, die das gewählte Element erreichen soll. In dem Leistungs-Diagramm ist der Schnittpunkt der horizontalen Linie  $\Delta T / \Delta T_{max}$  und der diagonalen Optimum-Geraden  $Q_0 / Q_{max}$  das Optimum. Der Schnittpunkt der horizontalen Linie mit der vertikalen Achse ist das Maximum des Wertes  $Q_0 / Q_{max}$ . Zur Bestimmung des Optimums und des Maximums der Kühlkapazität für das vorgesehene Element dividiere man den errechneten Wert der Gesamtwärmeleistung durch den aus dem Diagramm entnommenen relativen Wert. Nach der Allgemein-Spezifikations-Liste wählt man ein Element aus, mit  $Q_{max}$  größer als das Maximum  $Q_{max}$ , aber kleiner als das Optimum  $Q_{max}$ . Es ist empfehlenswert, dass das gewählte Element mit einem  $Q_{max}$  nah bei dem Optimum  $Q_{max}$  liegt, weil sich dadurch ein besserer Wirkungsgrad ergibt. Ein Element, dessen  $Q_{max}$  nah zum Maximum  $Q_{max}$  liegt, ist zwar preiswerter, hat aber im Ergebnis eine kleinere Kühlkapazität.



Peltier - Elemente sind thermoelektrische Elemente (TE), die als Wärmepumpe arbeiten. Quelle: <http://www.quick-ohm.de/peltier/erlauterung.html>

Peltier-Elemente haben einen schlechteren Wirkungsgrad als herkömmliche Kompressor-Kühlschränke. Nun muss der Wirkungsgrad bei der Auswahl eines Kühlsystems nicht so wichtig sein, sondern weitere Eigenschaften können entscheidend sein. Auf diese wird im folgenden Abschnitt kurz eingegangen.

Im Gegensatz zum Kompressor-Kühlschrank besitzt eine Peltier-Kühlung keine bewegten Teile. Deshalb ist diese geräuschlos und vibriert nicht. Peltier-Elemente besitzen auch kein Gasführungssystem das leck werden könnte. Zum Betrieb einer solchen Kühlung ist nur eine tiefe Betriebsspannung nötig, was beim Betrieb mit einer Autobatterie von Vorteil ist. Von großer Bedeutung ist die äußerst präzise Regulierbarkeit (Beim Kompressorkühlschrank existieren meist nur die zwei Zustände Ein oder Aus.) Peltier-Elemente kann man auch sehr klein bauen. Die Kleinsten sind so groß wie eine Bleistiftspitze und können phantastische Kühlleistungen von bis zu 40 W Wärmeabtransport pro m<sup>2</sup> erreichen.

Messbereich:	Temperatur: -270°C bis 1760°C (Typ-abhängig); spezielle bis 3000°C  Thermospannung zwischen 6 bis 53 µV/K (Typ-abhängig , siehe Tabelle 1)
Genauigkeit/Fehler:	Temperaturtoleranz des Thermopaars (siehe Tabelle 1 unter Grenzabweichung)  Fehlergrenze des Vergleichsstellen-Thermostaten oder der Vergleichsstellen-Korrektionsspannungsquelle [etwa +/- 0.1°C]

	<p>Ungewollte Thermospannungen an Kontaktstellen im Messkreis [± einige <math>\mu\text{V}</math>]</p> <p>Fehlergrenzen und Auflösung des Spannungsmessers im entsprechenden Messbereich beachten</p> <p>Das Thermoelement darf mit dem Messobjekt nur so viel Wärme austauschen, damit keine Temperaturverfälschung eintritt. Die Ansprechzeiten sind von der Baugröße abhängig und liegen zwischen 1s und 1ms</p> <p>Die Messeinrichtung sollte möglichst hochohmig sein. Die Eingangsfehlspannung (Nullpunktsfehler) des Spannungsmessers muss sehr klein sein. Übertemperatur bewirkt kristalline Veränderungen, was zu einer Veränderung der Thermospannung sowie zur Korrosion und Verminderung des Isolationswiderstandes führt.</p>
Bauformen:	<p>Zylindrisch mit Durchmessern von 0.3mm bis einige mm.</p> <p>Unzählige Bauformen erhältlich für Anwendungen im industriellen Bereich (Chemie, Verfahrenstechnik). Meist werden im industriellen Umfeld genormte Thermoelement-formen und Schutzrohre verwendet.</p>
Kosten:	<p>Klasse 1: ab € 25 (Einzelstück)</p> <p>Klasse 2: ab € 7</p>
Vorteile:	<p>Großer Messbereich, gute Linearität, Robustheit, Langzeitstabilität der Kennlinie,</p> <p>geringe Kosten, Möglichkeit der punktförmigen Temperaturmessung.</p>
Nachteile:	<p>Kleine Messspannungen, die durch unerwünschte Thermospannungen im Messkreis gestört werden. Oft ist ein Vergleichsstellen-Thermostat oder eine Korrektionsspannungsquelle erforderlich.</p>
Anwendungsbereiche:	<p>Temperatur- und Temperaturdifferenzmessungen über sehr grosse Bereiche,</p> <p>Strahlungspyranometer, Thermokreuze für HF-Strommessungen (echte Effektivwertmessungen)</p>

Für verschiedene Materialpaarungen existieren internationale Normen, die Thermospannungen, Toleranzen, Kennfarben für Elemente, Einzeldrähte, Ausgleichleitungen und Isolationen, Einbauformen, Schutzrohre und genormte Messeinsätze. Teilweise bestehen auch nationale

Normen. DIN IEC 584 enthält die Grundwerte ihrer Thermospannungen und die Koeffizienten für ihre Polynomdarstellung.

#### 6.3.3.1 Quellen, Links

#### Literatur

[1] J.Niebuhr, G.Lindner; Physikalische Messtechnik mit Sensoren; ISBN 3-486-23614-8; Auflage 1996

[2] U.Tietze, Ch.Schenk; Halbleiterschaltungstechnik; 1999, ISBN 3-540-64192-0, Springer Verlag

[3] L. v. Körtvelyessy; Thermoelement Praxis; Vulkan Verlag Essen; ISBN 3-8027-2140-3; Auflage 1987

#### Hersteller / Distributoren

Heraeus, BRD Thermoelemente <http://www.heraeus.de/d/sensors.htm>

Omega, USA Thermoelemente <http://www.omega.com/temperature/>

Thermoest, France Thermoelemente, Kalibrierstelle <http://www.thermoest.com/>

Sensycon, BRD Thermoelemente [http://www.sensycon.de/welco\\_d.htm](http://www.sensycon.de/welco_d.htm)

Analog Device Thermoelement-Verstärker [http://www.analog.com/product/Product\\_Center.html](http://www.analog.com/product/Product_Center.html)

PMR, Austria Thermoelement, Temperatursensoren <http://www.pmr.co.at>

Maxim Thermoelement-Verstärker <http://www.maxim-ic.com/>

Allgemeine Infos Temperatursensoren <http://www.temperatures.com/>

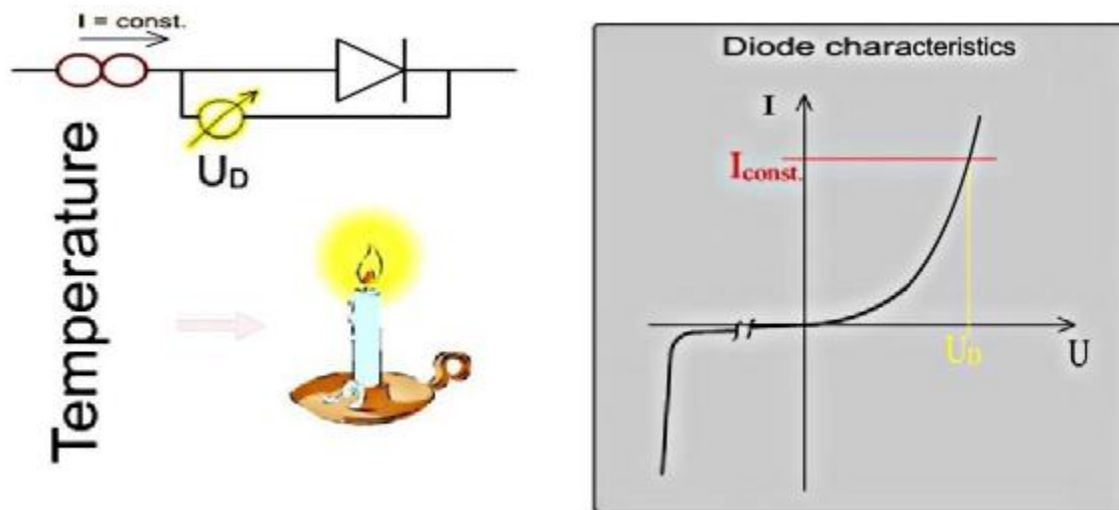
Update:02.02.00 / Autor:Mueller Claudio; Ergänzung: F. Baumgartner 30.07.01 / NTB / Labor Elektronische Messtechnik

#### 6.3.4 Dioden-Thermoelemente

Semiconductor pn-junctions show an analogous effect as thermocouples. The different electron band structure at both sides causes a rectifying behaviour of the device. The pn-junction of such diode has a temperature dependent voltage-current characteristic:

$$U_D = (k \cdot T / e) \cdot \ln(I / I_0),$$

where  $U_D$  is the diode voltage;  $I$  its current;  $k$  the Boltzmann constant;  $e$  is the electron charge, and  $I_0$  is the reverse current. If the supply is a constant current source, the voltage is a linear function of the absolute temperature. This ideal behaviour is only disturbed by the temperature dependency of  $I_0$ .

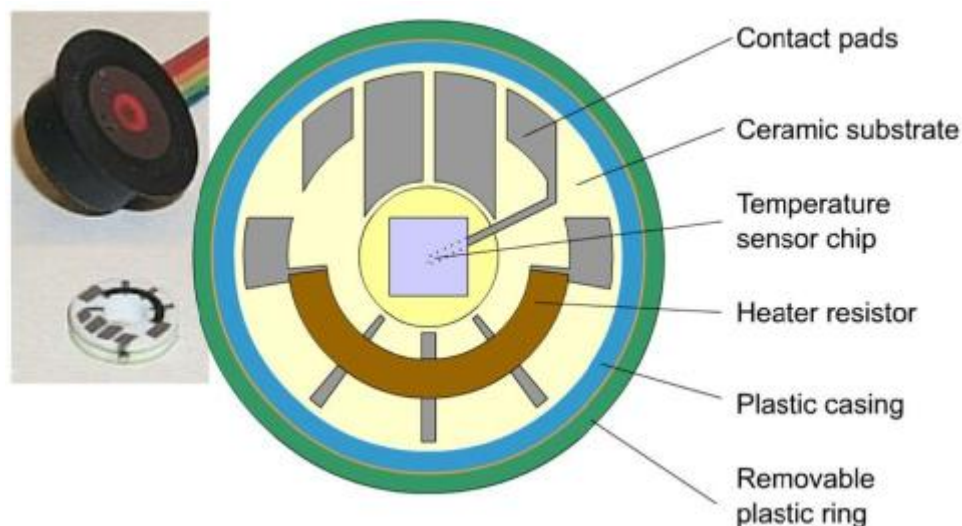


Bei Temperaturänderung ändert sich die Steigung im  $I/U$ -Diagramm der Diode. Quelle: [www.sensedu.com/Structures/semiconductor devices/diode-based](http://www.sensedu.com/Structures/semiconductor%20devices/diode-based).

Multi-emitter transistors can easily be prepared with exact basis-emitter junction area ratio. Connecting them as diodes that are driven by the same current (using an analog current mirror, for example), their voltage difference will be independent of the reverse currents, only the area ratio appears in the result.

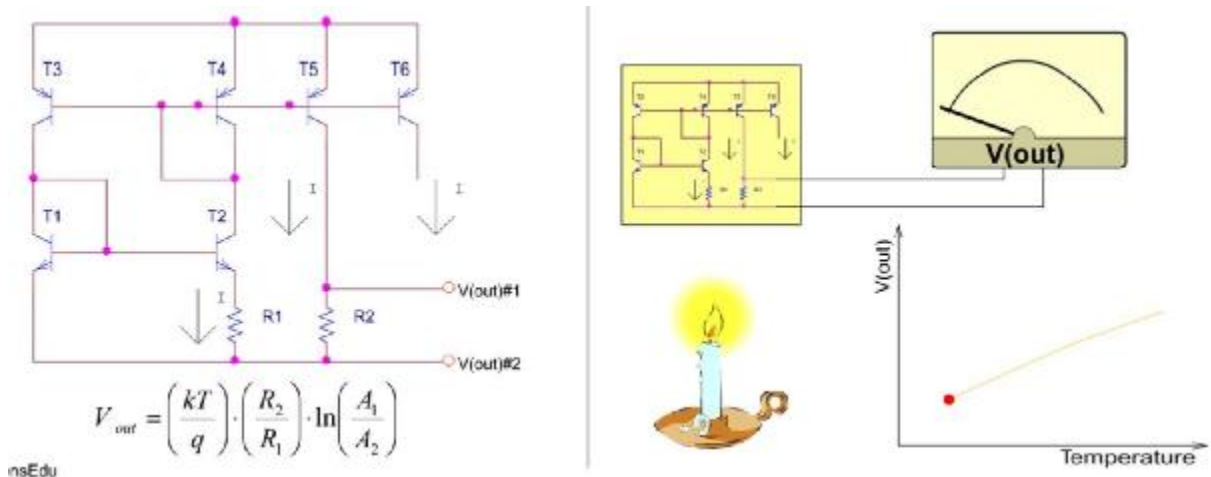
Solche pn-Dioden Temperatursensoren haben den Vorteil, miniaturisiert werden zu können. Eine Anwendung findet sich z.B. in einem transcutanen Blut-Sauerstoffsensoren (siehe auch spätere Vorlesung zu Gassensoren) zur Überwachung der Hauttemperatur.

A new type transcutaneous  $pO_2$  sensor structure is presented here, which is based on multilayer ceramic technology. The electrodes are made by thick film technology using small amounts of precious metals. The heating element is an integrated thick film resistor and a pn-junction is used for temperature sensing. The device works on  $43.5\text{ }^\circ\text{C}$  temperature. The ceramic body was molded into a plastic package.



Aufbau des transcutanen Blut-Sauerstoffsensors (Gassensor) mit Hezelement (Widerstandsschicht) und integriertem pn-Diodenthermometer.

...



Quelle: [www.sensedu.com](http://www.sensedu.com) Measuring parameters/thermal/pn-junction...

### 6.3.5 Dem Seebeck-Effekt überlagerte Effekte

#### 6.3.5.1 Joule-Effekt (1841)

Erwärmung eines Leiters bei Stromdurchgang (durch innere Reibungseffekte der Ladungsträger). Die entstehende Wärme ist dem Widerstand des Leiters, dem Quadrat der Stromstärke und der Zeit proportional. Der Joule-Effekt überdeckt die Benedicks-Effekte und die Thomson-Effekte.

#### 6.3.5.2 Benedicks-Effekte (1916/1918)

In einem homogenen Leiterstück entsteht eine Thermospannung, wenn längs des Leiters ein extrem hohes Temperaturgefälle besteht (1. Benedicks-Effekt).

#### 6.3.5.3 Thomson-Effekt (1856)

Dem Seebeck-Effekt überlagert ist der Thomson-Effekt (William Thomson = Lord Kelvin): Fließt in einem homogenen Leiter ein Strom und herrscht in diesem zusätzlich ein Temperaturgefälle, so wird je nach Stromrichtung zusätzlich zur Joule'schen Wärme eine Wärmemenge erzeugt oder absorbiert. Fließt der Strom in Richtung wachsender Temperatur, so wird bei positivem Koeffizienten Wärme erzeugt, bei negativem Koeffizienten Wärme absorbiert. Bei umgekehrter Stromrichtung drehen sich die Verhältnisse um. Die erzeugte Wärme ist dem fließenden Strom und der Temperaturdifferenz proportional. Der Thomson-Effekt wird durch den Joule-Effekt (Joule'sche-Wärme) verstärkt, der quadratisch vom Strom abhängt.

Aus Symmetriegründen muss es einen inversen Thomson-Effekt geben, wobei ein sich ändernder Temperaturgradient eine Thermospannung erzeugt. Der Effekt ist noch nicht nachgewiesen. Beide Effekte werden als thermoelektrische Effekte 2. Ordnung bezeichnet.

Diese elektrothermischen homogen-Effekte treten gegenüber anderen Effekten bei metallischen Leitern zurück, sind jedoch bei Metall-Halbleiterkombinationen zu berücksichtigen. Die Größenordnung liegt bei einigen Mikrovolt pro Grad.