

1.11 Temperaturmessung

1.11.1 Einführung

Der Begriff Temperatur ist unmittelbar an den Begriff "**Wärmeenergie**" gekoppelt: Zwei völlig gleichartig aufgebaute Körper speichern den gleichen Betrag an Wärmeenergie, wenn sie dieselbe Temperatur aufweisen. Um an beiden Körpern dieselbe Temperaturerhöhung zu verursachen, muss beiden dieselbe Wärmeenergie zugeführt werden. Betrachtet man dagegen verschiedenartige Körper gleicher Temperatur, z.B. ein Stahlblock und einen gleichgroßen Styroporblock, so kann ersterer sehr viel mehr Wärmeenergie speichern als derjenige aus Styropor, und für dieselbe Temperaturerhöhung wird man dem Stahlblock deutlich mehr Wärmeenergie zuführen müssen als dem Styroporblock. Der Zusammenhang zwischen dem Wärmeinhalt eines Körpers und seiner Temperatur ist also u.a. abhängig von Stoffart und Masse.

Bringt man zwei Körper dergleichen Temperatur miteinander in Kontakt (gegen ihre Umgebung seien sie isoliert), so behalten beide ihre Temperatur, ein (Netto-) Wärmeaustausch findet nicht statt. Dabei ist es gleichgültig, ob sie aus gleichem oder unterschiedlichem Material bestehen, auch ihr Massenverhältnis ist dabei ohne Einfluss. Man bezeichnet den Zustand zweier Körper als **thermisches Gleichgewicht**, wenn sie die gleiche Temperatur aufweisen und miteinander in thermischem Kontakt stehen.

Befinden sich die Körper auf unterschiedlicher Temperatur, so findet ein Wärmefluss in Richtung des kälteren Körpers statt. Die pro Zeiteinheit übertragene Wärmemenge ist näherungsweise proportional zur Temperaturdifferenz. Der (Netto-) Wärmetransport ist Null, wenn beide Körper die gleiche Temperatur angenommen haben.

Diese wichtigen Zusammenhänge sind den meisten aus dem praktischen Alltag mehr oder weniger geläufig. Ebenso einsichtig ist die Tatsache, dass die Temperatur eine **skalare Größe** ist: Man kann ihr keine Richtung zuordnen (wohl aber dem Wärmefluss).-

Betrachtet man feinste Partikel in einer Flüssigkeit (z.B. Fetttropfchen in Milch) unter einem Mikroskop, so sieht man diese eine ungeordnete Zitterbewegung ausführen. Diese rührt daher, dass die Partikel von Molekülen in ihrer Umgebung angestoßen werden. Die Bewegung der Moleküle ist völlig chaotisch und umso intensiver, je höher die Temperatur der Emulsion ist. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass mit steigender Temperatur sich die (mittlere) Geschwindigkeit und die Geschwindigkeitsfluktuationen der Stoßpartner erhöhen. Die in der chaotischen Bewegung aller Teilchen eines Körpers enthaltene gesamte kinetische Energie ist letztlich die Wärmeenergie eines Körpers. Das verdeutlicht, dass die Temperatur ein **makroskopischer Parameter** ist: Nicht einem einzelnen Atom oder Molekül, sondern nur einem Ensemble vieler Teilchen kann man eine Temperatur zuordnen. Zu beachten ist dabei, dass die geordneten Bewegungen von Teilchen, z.B. in einer strömenden Flüssigkeit, nicht zu ihrer Temperatur beitragen.

1.11.2 Die Bedeutung der Temperatur

Die Bedeutung der Größe Temperatur lässt sich bereits aus der Tatsache ableiten, dass die meisten Lebewesen Sinnesorgane entwickelt haben, die auf Temperaturen ansprechen: Zu niedrige oder zu hohe Temperaturen lassen biochemische Prozesse zu langsam oder zu schnell ablaufen. Temperatursensoren ermöglichen es den Lebewesen, ungünstige Temperaturen zu meiden oder ihre "Betriebstemperatur" innerhalb weniger Zehntel Grad einzustellen. Im technischen Bereich ist die Temperatur ein wichtiger Zustandsparameter, von dem viele andere Größen (Länge, Volumen, Druck etc.) und Prozesse abhängen. Beispiele für temperaturabhängige Prozesse sind z.B. das Trocknen von Lacken, Phasenumwandlungen in Werkstoffen, chemische Reaktionen. Um solche Prozesse optimal ablaufen zu lassen, muss die Temperatur i.d.R. innerhalb enger Toleranzen eingestellt werden. Dies kann durch Heizungen bzw. Kühlaggregate geschehen, sofern geeignete Temperatursensoren zur Verfügung stehen, um einen Regelkreis zu realisieren. Es existieren heute eine Reihe unterschiedlicher Sensoren, die sich in Messunsicherheit, Messbereich, Ansprechzeit, Handhabung, und Preis unterscheiden und auf verschiedenen Messprinzipien basieren.

1.11.3 Temperaturskalen

Die heute gebräuchlichsten Temperaturskalen sind die Kelvin-Skala und die Celsius-Skala.

Die Kelvin-Skala wird hauptsächlich im wissenschaftlichen Bereich verwendet, die Celsius-Skala zumeist in der Industrie und im Alltag.

1.11.3.1 Kelvin-Skala:

1 Kelvin ist der 273,16-te Teil der Temperaturdifferenz zwischen dem Tripelpunkt des Wassers und dem absoluten Nullpunkt, der durch den 2. Hauptsatz der Thermodynamik festgelegt ist. Als Tripelpunkt bezeichnet man jenen Zustand, bei dem die drei Phasen fest, flüssig und gasförmig miteinander im Gleichgewicht sind. Dieser Zustand liegt bei Wasser vor, wenn die Temperatur $+0.01^{\circ}\text{C}$ und der Druck 610.6 Pa beträgt [siehe Stöcker, Horst: Taschenbuch der Physik, Verlag Harry Deutsch, 1998]. Aus Grundprinzipien der Thermodynamik folgt auch, dass Temperaturen gemäß der Kelvin-Skala stets positiv sind, d.h. Temperaturen unterhalb des absoluten Nullpunktes nicht auftreten können. Die Kelvin-Skala ist unabhängig von den Eigenschaften spezieller Thermometer.

1.11.3.2 Celsius-Skala:

Die Celsius-Skala ist gegenüber der Kelvin-Skala um 273,15 Grad verschoben. Die Teilung beider Skalen ist gleich, d.h. die Temperaturdifferenz $1\text{K} = 1^{\circ}\text{C}$. Die Definition des K bzw. $^{\circ}\text{C}$ stimmt sehr gut mit der bis 1954 gültigen Festlegung überein, nach der 1 Kelvin bzw. 1°C der 100-te Teil zwischen dem Siedepunkt (100°C) und dem Schmelzpunkt des Wassers (0°C) bei Normaldruck $1\text{ atm} = 101325\text{ Pa}$ war.

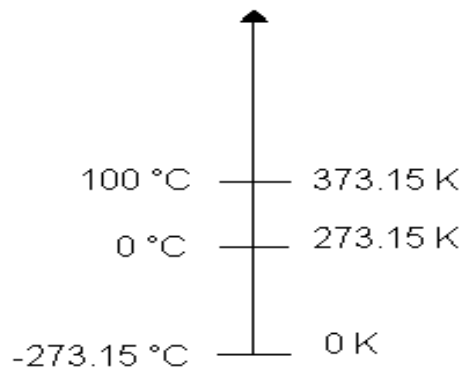


Bild 61: Versatz von Kelvin und Celsius- Skala

Die **Fahrenheit-Skala** ist in englischsprachigen Ländern, besonders in den USA gebräuchlich. Als Fixpunkte wurden die Temperaturen $0^{\circ}\text{F} = -17,8^{\circ}\text{C}$ und $100^{\circ}\text{F} = 37,8^{\circ}\text{C}$ definiert.

Die **Rankine-Skala** stellt eine Fahrenheit-Skala dar, nur wird als Nullpunkt der absolute Nullpunkt definiert.

Daraus ergeben sich die folgenden Umrechnungsformeln:

$$\frac{T_C}{^{\circ}\text{C}} = \frac{5}{9} \left(\frac{T_F}{^{\circ}\text{F}} - 32 \right) \quad (133)$$

$$\frac{T}{\text{K}} = \frac{5}{9} \left(\frac{T_F}{^{\circ}\text{F}} + 459,67 \right) = \frac{5}{9} \frac{T_R}{^{\circ}\text{R}} \quad (134)$$

T in K
 T_C in $^{\circ}\text{C}$
 T_R in $^{\circ}\text{R}$ (häufig auch $^{\circ}\text{Rank}$)
 T_F in $^{\circ}\text{F}$

Wesentlich seltener verwendet man heute die Réaumur-Temperaturskala. Wegen der gleichartigen Abkürzung ($^{\circ}\text{R}$) kann sie leicht mit Temperaturangaben in $^{\circ}\text{Rankine}$ verwechselt werden.

1.11.4 Messung der Temperatur

Zur Messung der Temperatur werden physikalische Effekte und Verfahren bevorzugt herangezogen, die reproduzierbare und eindeutige Messungen ermöglichen, wie:

- Längen- und Volumenausdehnung von Stoffen z.B. Volumenänderung von Flüssigkeiten und Gasen
- Wechsel charakteristischer Zustände: z.B. Schmelzpunkte, Erstarrungspunkte, Siedepunkte
- Änderung von charakteristischen Eigenschaften z.B. Änderungen von Transparenz, Reflexion, Farbe, des elektrischen Widerstandes, der Strahlungsemission, des Elastizitätsmoduls.

1.11.5 Kalibrierung von Thermometern

Die Kalibrierung der Thermometer erfolgt im technischen Bereich mit Hilfe von Temperatur-Fixpunkten. Diese Fixpunkte wurden zuletzt 1990 international festgelegt, präzisiert und in einem Standard, der "Internationalen Temperaturskala von 1990" (ITS 90) veröffentlicht. Sie enthält vor allem Tripelpunkte von Gasen und Erstarrungspunkt von Metallen, jeweils ermittelt von verschiedenen metrologischen Staatsinstituten.

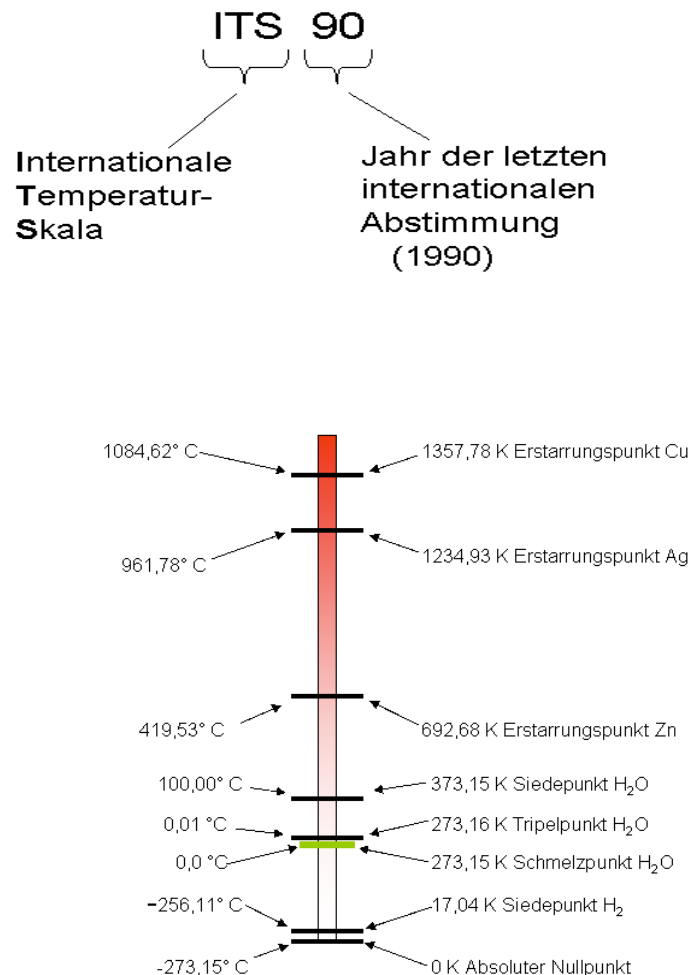


Bild 62: Internationale Temperaturskala (Tripelpunkt H₂O bei 610.6 Pa Druck, Siedepunktangabe H₂ für 0.333306 Pa Druck, sonst: Normaldruck= 0.101325 MPa)

1.11.6 Probleme bei der Temperaturmessung:

- Der Sensorkörper muss (bei kontaktierenden Sensoren) die zu messende Temperatur annehmen, denn letztlich **messen Berührthermometer nur ihre eigene Temperatur!**
- Die Herstellung des thermodynamischen Gleichgewichts erfordert einen Energieaustausch und beansprucht hierfür Zeit. Damit ist u.a. auch festgelegt, wann der Sensor die richtige Temperatur anzeigt bzw. welche Messabweichung zu erwarten ist.
- Sofern die Wärmekapazität des Sensors gegenüber der des Messobjekts nicht vernachlässigt werden darf, kann der Sensor dessen Temperatur auch verändern.
- Die Sensoren führen i.d.R. über ihre Zuleitungen Wärmeenergie nach außen ab und verändern die Temperatur des Messobjektes.

1.11.7 Temperaturmessverfahren

1.11.7.1 Volumen- und Längenänderung

Diese Messprinzipien beruhen auf der Tatsache, dass bei den meisten Substanzen in weiten Temperaturbereichen das Volumen (Flüssigkeiten, Gase) bzw. die Länge mit zunehmender Temperatur monoton steigt (Ausnahme: z.B. Dichteanomalie des Wassers bei 4 °C). In Flüssigkeitsthermometern kann die Volumenzunahme der Arbeitsflüssigkeit (i.d.R. Alkohole oder Quecksilber) an einem Steigrohr beobachtet werden. Bei Bimetallthermometern sind zwei Metalle mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten miteinander verschweißt. Temperaturänderungen bewirken so eine messbare Durchbiegung.

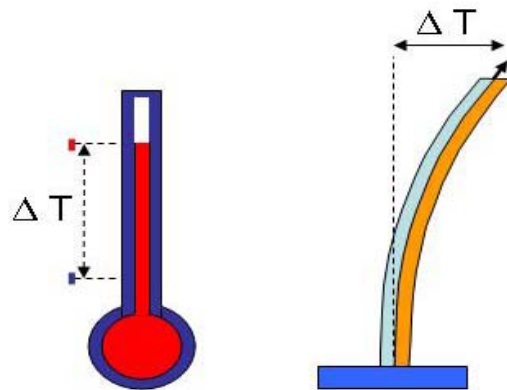


Bild 63: Flüssigkeitsthermometer (links) und Bimetallthermometer(rechts)

Dabei gilt näherungsweise für das Volumen V bzw. die Länge x :

$$V(T) = V(T_0) * [1 + \gamma(T - T_0) + \dots] \quad (135)$$

mit γ als thermischer Volumenausdehnungskoeffizient in m^3/K , und

$$x(T) = x(T_0) * [1 + \alpha(T - T_0) + \dots] \quad (136)$$

mit α als thermischer Längen- Ausdehnungskoeffizient in m/K ;

Dabei stellt T_0 die Bezugstemperatur dar, für die das gemessene Volumen $V(T_0)$ bzw. die Länge $x(T_0)$ des Sensormaterials bekannt ist.

1.11.7.2 Thermoelektrizität

Stehen zwei verschiedene Metalle (A, B) miteinander in Kontakt, so gehen Elektronen von dem Metall A mit der kleineren Elektronenaustrittsarbeit auf das Metall B mit der größeren Elektronenaustrittsarbeit über. Somit lädt sich Metall A gegenüber Metall B positiv auf (Bild 64).

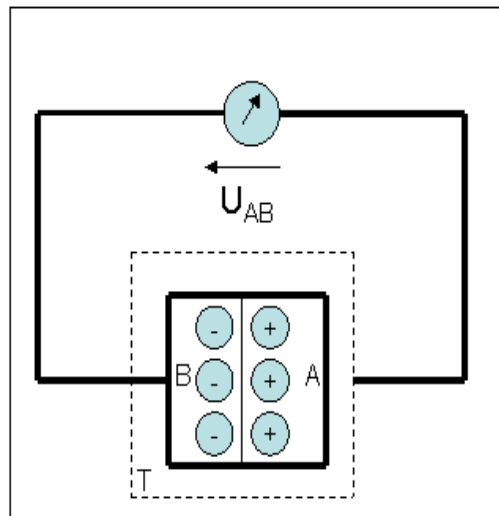


Bild 64 : Ladungsverschiebung an der Kontaktstelle zweier Metalle

Die in der Berührungsschicht entstehende Spannung (Thermospannung) steigt mit der Temperatur. Sie liegt bei Raumtemperatur im Bereich einiger Millivolt.

Die Thermospannung U_{AB} steigt nicht streng linear mit der Temperatur, in der Regel kann man aber innerhalb eines kleineren Temperaturbereiches (einige 10 Grad) von einem linearen Zusammenhang ausgehen:

$$\Delta U = U_{AB}(T_1) - U_{AB}(T_0) = k \Delta T \quad (137)$$

Die Thermospannung kann z.B. mit einem Multimeter gemessen werden. Dabei wird der Leiterkreis geschlossen. Hierdurch berühren sich erneut unterschiedliche Metalle, es wird eine weitere Thermospannung generiert, die in die Spannungsmessung eingeht. Da das zweite Thermoelement ohnehin unvermeidlich ist, wählt man sinnvollerweise einen Messaufbau nach Bild 65:

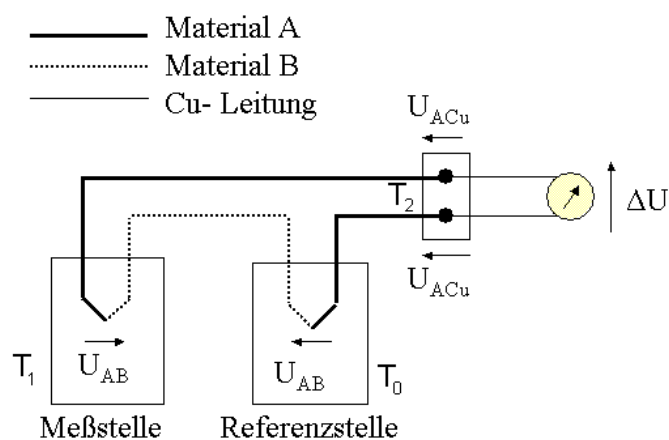


Bild 65: Messung der Thermospannung

Die Kontaktstelle der beiden Leiter A und B befindet sich im thermischen Gleichgewicht mit dem Messobjekt, das die Temperatur T_1 habe. Eine zweite Kontaktstelle derselben Leitermaterialien befindet sich auf einem bekannten Temperaturniveau T_0 . Dieses sollte konstant gehalten werden oder

mit einer Vergleichsmethode gemessen werden. Weitere Kontaktstellen, die Thermospannungen erzeugen, sind die Übergänge vom Material A zu den Messleitungen, i.d.R. aus Kupfer. Die Spannung ΔU , die sich z.B. mit einem Multimeter messen lässt, ergibt sich unter Anwendung der Maschenregel zu:

$$\Delta U + U_{ACu}(T_2) + U_{AB}(T_1) - U_{AB}(T_0) - U_{ACu}(T_2) = 0 \quad (138)$$

Man erkennt, dass die Thermospannungen, die beim Übergang zu den Kupferleitungen entstehen, sich kompensieren, sofern diese Klemmstellen dieselbe Temperatur T_2 aufweisen. Für die zu messende Spannung gilt schließlich:

$$\Delta U = U_{AB}(T_0) - U_{AB}(T_1) \quad (139)$$

Häufig werden Thermoelemente an Auswertegeräte angeschlossen, bei denen die (Absolut-) Temperatur der im Gerät integrierten Referenzstelle mit einem Vergleichsverfahren gemessen wird. Die Messunsicherheit dieser Referenzmessung geht natürlich in die Gesamtmessunsicherheit ein.

Obwohl fast jede Kombination von zwei verschiedenen Metallen eine Thermospannung liefert, haben sich nur einige davon für die Temperaturmessung bewährt:

Pt-PtRh:

- Temperaturbereich: 0°C bis +1300 °C
- kleiner Temperaturspannungskoeffizient ($k = 0.643 \text{ mV} / 100 \text{ K}$)
- sehr genau und reproduzierbar
- relativ beständig gegen Oxidation und Korrosion in höheren Temperaturbereichen
- relativ teuer

Cu-Konstanten:

- Temperaturbereich: -250°C bis +400 °C
- hoher Temperaturspannungskoeffizient ($k = 4.25 \text{ mV} / 100 \text{ K}$)
- schlechte Linearität
- Cu bei höheren Temperaturen nicht beständig gegen Luftsauerstoff

Fe-Konstanten:

- Temperaturbereich: -250°C bis +700 °C
- hoher Thermospannungskoeffizient ($k = 5.37 \text{ mV} / 100 \text{ K}$)
- Fe stark korrosionsanfällig
- keine zeitliche Konstanz der thermoelektrischen Eigenschaften

NiCr-Ni:

- Temperaturbereich: -200°C bis +1000 °C
- hoher Thermospannungskoeffizient ($k = 4.1 \text{ mV} / 100 \text{ K}$)
- relativ genau und beständig
- ausreichende Linearität der Temperatur-/Spannungskurve
- Verzunderung durch Oxidation ab 600 °C

Beispiel: Weisen die Thermoelemente (NiCr und Ni) in einem Schaltkreis eine Temperaturdifferenz von 25 K, so wird an den Klemmen eine Spannung vom Betrag $U = 4.1 \text{ mV} \cdot 25 \text{ K} / 100 \text{ K} = 1.025 \text{ mV}$ gemessen (die Polarität hängt davon ab, welches Thermoelement die höhere Temperatur aufweist).

Der Thermospannungskoeffizient k (häufig auch als Thermokraft bezeichnet) wird i.d.R. als mittlere Spannungsdifferenz pro 100 K Temperaturerhöhung angegeben. Alle leitenden Materialien können in einer "thermoelektrischen Spannungsreihe" geordnet werden. Diese gibt an, welche Thermospannungsdifferenz ein Leiter mit einem Referenzleiter ausbildet, wenn eine Kontaktstelle 0°C, die andere 100 °C aufweist. Als Referenzmaterial wird häufig Kupfer, Blei oder Platin angegeben.

Folgende Tabelle 12 gibt einige Zahlenbeispiele:

Material	Thermospannung in mV
Germanium	+29,7
Eisen	+1,34
Zink	0,03
Kupfer	0
Gold	0,01
Blei	-0,26
Aluminium	-0,32
Platin	-0,59
Quecksilber	-0,60
Kalium	-1,43
Nickel	-2,04

Tabelle 12: Thermospannungen bezogen auf Kupfer; $T_0=0^\circ\text{C}$, $T_1=100^\circ\text{C}$

Die einfachste Form eines Thermoelementes besteht aus zwei Metalldrähten, deren Enden verlötet oder verschweißt sind. Die Kontaktstelle stellt den Sensor dar. Können die Thermoelemente in der physikalisch/ chemischen Umgebung Schaden nehmen, werden diese durch Ummantelung (Bild 66) geschützt. Eine besonders kompakte Form stellen dabei die Mantelthermoelemente dar. Die Thermoerdrähte werden in hochtemperaturfestes, keramisches Pulver eingebettet, welches von einem Mantel aus hochlegiertem Stahl umgeben ist. Die Außendurchmesser von Mantelthermoelementen liegen zwischen 0,25 mm und 6 mm.

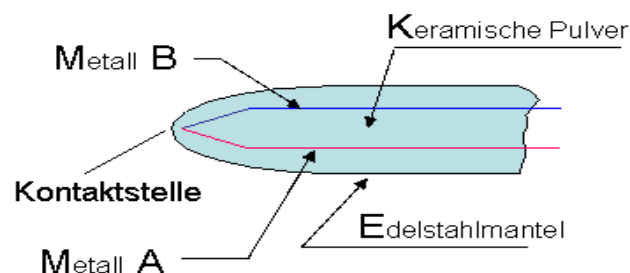


Bild 66 : Mantelthermoelement

Die Messung der Thermospannungen erfolgt normalerweise hochohmig, d.h. der Strom im Leiterkreis ist i.d.R. vernachlässigbar. Die Thermospannung ist nur von den Materialpaarungen und Temperaturdifferenzen abhängig. Wird der Leiterkreis aber niederohmig geschlossen (im Extremfall durch Kurzschluss), so fließt ein Strom, der außer von den verwendeten Materialien und Temperaturdifferenzen auch vom gesamten Leitungswiderstand (und damit von Leiterlängen und Querschnitten) abhängt. Es ist daher vorteilhaft, die auftretenden Thermospannungen zur Temperaturmessung heranzuziehen und nicht die Ströme. Das Auftreten einer Spannungsdifferenz infolge von Temperaturgradienten wird allgemein als **Siebeck-Effekt** bezeichnet.

Ein weiterer thermoelektrischer Effekt ist der **Peltier-Effekt**. Dieser bezieht sich darauf, dass die Kontaktstelle zweier Leiter bei Stromfluss Wärme freisetzt bzw. absorbiert, je nach Stromrichtung. Die Beträge von freigesetzter bzw. aufgenommener Wärme sind bei gleichen Strombeträgen identisch. Die Wärmeleistung P an der Kontaktstelle ist dabei dem Stromfluss proportional:

$$P = \Pi * I$$

(140)

Der Zusammenhang zwischen dem Thermospannungskoeffizienten k und dem Peltierkoeffizienten Π ist durch die 1. Thomsonsche Gleichung gegeben:

$$\Pi = kT \quad (141)$$

1.11.7.3 Widerstandsthermometer

Widerstandsthermometer basieren auf dem Messprinzip, dass der elektrische Widerstand eines Leiters oder Halbleiters von der Temperatur abhängt. Bevorzugt kommen metallische Widerstände zum Einsatz, insbesondere Platin und Nickel, deren Widerstand gut reproduzierbar mit der Temperatur ansteigt. Mit entsprechendem Aufwand lassen sich Temperaturen mit einer relativen Unsicherheit von nur 10^{-4} bestimmen. Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur kann man beschreiben durch:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2 + \dots) \quad (142)$$

α und β sind der lineare bzw. quadratische thermische Widerstandskoeffizient.

R_0 ist der Widerstand bei einer Bezugstemperatur, z.B. bei $T_0 = 0^\circ\text{C}$. In der Regel genügt es, in der Nähe der Bezugstemperatur von einer linearen Näherung auszugehen:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha' T) \quad (143)$$

α' ist der mittlere Temperaturbeiwert, der die mittlere Widerstandsänderung im Bereich von 0°C bis 100°C angibt:

$$\alpha' = \frac{R(T = 100^\circ\text{C}) - R(T = 0^\circ\text{C})}{R(T = 0^\circ\text{C}) * 100^\circ\text{C}} \quad (144)$$

Tabelle 13 zeigt die mittleren Temperaturbeiwerte einiger Metalle und ihren Anwendungsbereich für Widerstandsthermometer

Material	Verwendungsbereich	α'
Nickel	-60°C bis 150°C	$6,17 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Kupfer	-50°C bis 150°C	$4,27 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Platin	-220°C bis 850°C	$3,85 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Tabelle 13: Temperaturbeiwerte einiger Metalle

Neben Metall- Widerstandsthermometern werden auch temperaturabhängige Halbleiter- Widerstände wegen ihres höheren Temperaturbeiwertes verwendet. Man unterscheidet Halbleiterwiderstände mit positivem Temperaturkoeffizienten (PTC) und solche mit negativem Temperaturkoeffizienten. HNTC-Widerstände sind NTC für den Hochtemperaturbereich (Bild 67).

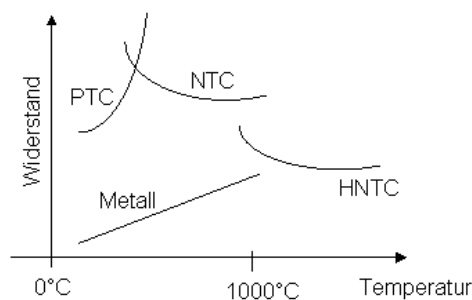


Bild 67: Widerstandverlauf verschiedener Temperatursensoren

PTC- Widerstände weisen zumeist nur geringe Stabilität bzw. Wiederholpräzision auf und sind nur in einem kleinen Messbereich einsetzbar, so dass sie i.d.R. nur für Überwachungsaufgaben eingesetzt werden. Bild 67 zeigt typische Kennlinienverläufe verschiedener Widerstandsthermometer; zu beachten ist der nichtlineare Verlauf bei PTC, NTC und HNTC. Für Temperaturbereiche, in denen die Kennlinien eine geringe Steigung aufweisen, sind die betreffenden Typen nicht zur Temperaturmessung geeignet.

Beim Einsatz von Widerstandsthermometern ist darauf zu achten, dass der Messstrom den Widerstand nicht nennenswert erwärmt. So sollte z.B. bei den handelsüblichen metallischen 100-Ohm- Widerstandsthermometern der Messstrom 10 mA nicht überschreiten. Die Wärmekapazität des Messobjektes und eine ggfs. schlechte thermische Ankopplung sind bei der Dimensionierung des Messstromes zu berücksichtigen! Die Bilder 68, 69 und 70 zeigen den prinzipiellen Aufbau und industrielle Bauformen von Widerstandsthermometern.

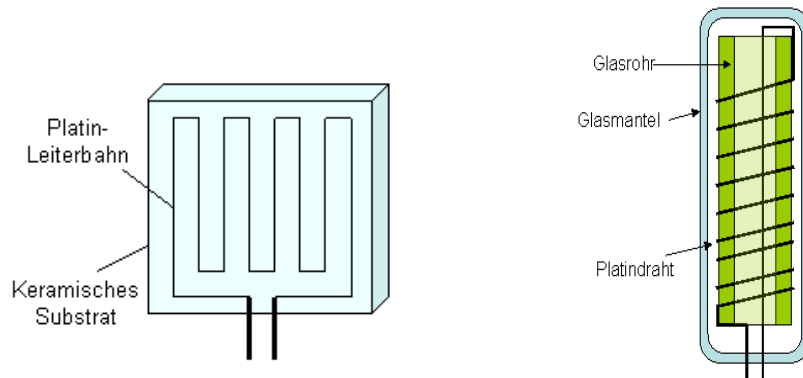


Bild 68: Aufbau von Widerstandsthermometern (Prinzip)



Bild 69: Industrielle Bauform eines Widerstands- Thermometers

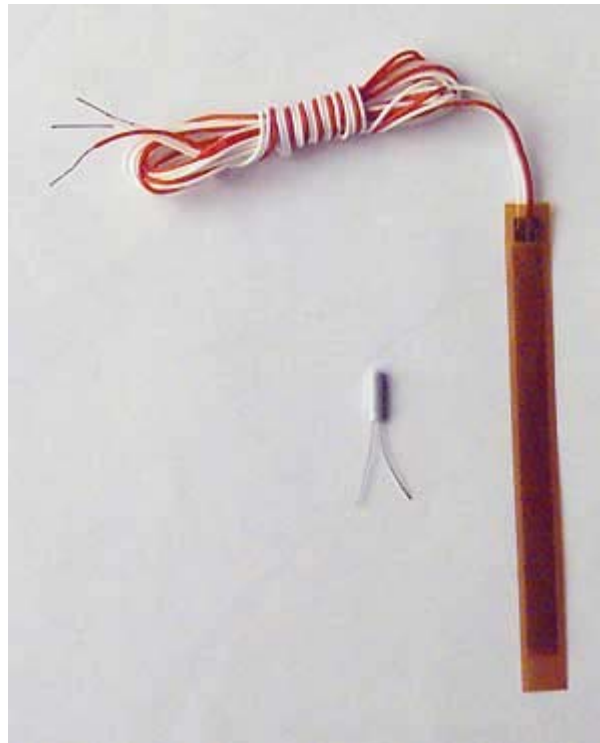


Bild 70: Industrielle Bauformen von Widerstands- Thermometern

1.11.7.4 Pyrometer

Als Pyrometer bezeichnet man eine Klasse von Gerätetypen zur Temperaturmessung, die sich in ihrem Aufbau und Einsatzbereich unterscheiden. Alle Pyrometer basieren auf dem physikalischen Effekt, dass Festkörper und Flüssigkeiten abhängig von ihrer Temperatur eine elektromagnetische, vorwiegend infrarote Strahlung ($T < 1000\text{K}$) abgeben. Daher wird diese Strahlung im Folgenden kurz mit Wärmestrahlung bezeichnet. Für die abgegebene Wärmestrahlung gelten zwei grundlegende Tatsachen:

- Die Gesamtstrahlungsleistung steigt mit der Objekttemperatur stark an.
- Die spektrale Verteilung der Wärmestrahlung verschiebt sich mit zunehmender Temperatur hin zu kurzen Wellenlängen.

Die spezifische Ausstrahlung R , also die pro Flächenelement in den Halbraum abgegebene Strahlungsleistung, wird durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz nach Gl. 145 beschrieben:

$$R = \sigma T^4 \quad R \text{ in } \text{W/m}^2 \quad (145)$$

mit $\sigma = 5.669 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

Das Plancksche Strahlungsgesetz beschreibt die spektrale Verteilung der Wärmestrahlung:

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad \text{in } \text{W/m}^3 \quad (146)$$

mit $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $k = 1.38056 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

(h =Plancksches Wirkungsquantum, c = Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, k =Boltzmann-Konstante)

Die Beziehung Gl. 146 gibt an, welche Strahlungsleistung pro Einheitsfläche (1 m^2) von den elektromagnetischen Wellen des Wellenlängenintervalls $d\lambda$ abgegeben wird.

Gl. 146 gilt streng genommen nur für einen idealisierten Fall, dem des "schwarzen Körpers". Ein schwarzer Körper ist per Definition ein Körper, der alle einfallende Strahlung absorbiert.

Die Absorption (das Absorptionsvermögen) α , also das Verhältnis von absorbierter zu eingestrahelter Strahlungsleistung, ist für reale Körper stets kleiner als 1. Auch geschwärzte Oberflächen sind nicht schwarz im thermodynamischen Sinne. Die bestmögliche Annäherung an einen schwarzen Körper

stellt eine kleine Öffnung eines Hohlraumes dar (natürlich auch der Hohlraum selbst), dessen Innenwände die Temperatur T aufweisen: Strahlungsenergie, welche durch das Loch in den Hohlraum eindringt, wird zunächst nur z. T. absorbiert. Die Wahrscheinlichkeit, dass die reflektierte/gestreute Strahlung durch das (kleine!) Loch wieder austritt, ist gering. Sie wird eher erneut auf die Innenwände treffen, teilweise absorbiert und so fort, so dass sie letztlich nahezu vollständig absorbiert wird. Die Öffnung hat somit (in guter Näherung) das Absorptionsvermögen $\alpha=1$.

Andererseits lässt sich das Emissionsvermögen ε (auch Emissivität genannt) einer Oberfläche definieren als das Verhältnis der Wärmestrahlung, die sie real abgibt, zu der Wärmestrahlung, die eine schwarze Oberfläche abgeben würde (bei gleicher Größe und Temperatur).

Aus der Thermodynamik ist bekannt, dass das Emissionsvermögen einer Oberfläche (nicht zu verwechseln mit dem Reflexionsvermögen) gleich dem Absorptionsvermögen ist (für jede Wellenlänge). Anders formuliert: Ein guter (schlechter) Absorber von Wärmestrahlung stellt auch einen guten (schlechten) Emittor dar. So weist die Öffnung eines Hohlraumes eine Emissivität von nahezu 1 auf, ein Metallspiegel dagegen hat eine Emissivität zwischen 0 und 0,1. Bei der berührungslosen Temperaturmessung mittels eines Pyrometers ist die Kenntnis der wellenlängenabhängigen Emissivität $\varepsilon(\lambda)$ der zu messenden Oberfläche entscheidend, da diese nach Gl. 147 in die spezifische spektrale Abstrahlung eingeht (Bild 71).

Unter Berücksichtigung des Emissionsvermögens lautet die spektrale Verteilung der Wärmestrahlung:

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{\varepsilon(\lambda) 2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (147)$$

mit

$$0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (148)$$

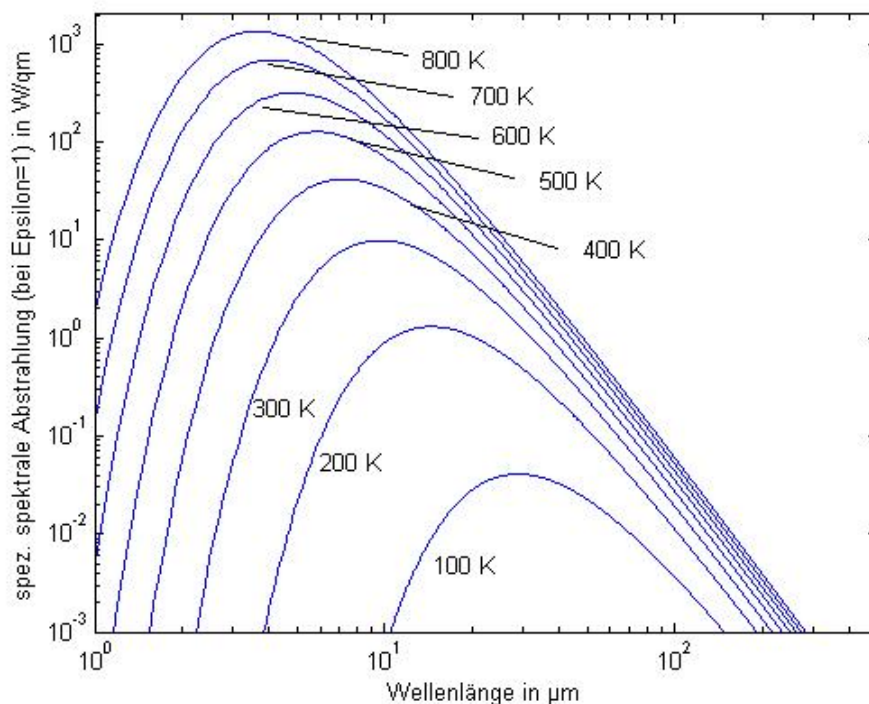


Bild 71 : Spezifische spektrale Abstrahlung für versch. Temperaturen

Je nach Applikation unterschiedliche Pyrometer-Bauarten zum Einsatz, die als gemeinsames Merkmal die Wärmestrahlung erfassen und mit der Temperatur über Gl. 147 oder über eine Kalibrierung in Beziehung setzen.

Zumeist wird die Wärmestrahlung über infrarotdurchlässige Optiken gesammelt und einem Sensor zugeführt. Dieser kann eine z.B. infrarotempfindliche Photozelle, ein Photowiderstand, ein Thermowiderstand oder ein Thermopile (eine miniaturisierte) Serienschaltung mehrerer

Thermoelemente sein. Manche Pyrometer nutzen dabei einen großen Spektralbereich der Wärmestrahlung (Gesamtstrahlungs-pyrometer), während andere nur einen schmalen Wellenlängenbereich optisch herausfiltern und somit nur in einem kleinen Wellenlängenintervall $\lambda \pm \Delta\lambda$ messen (Spektralpyrometer). Beide Pyrometer-Typen setzen die auf den Sensor fallende Strahlungsleistung mit der Temperatur in Beziehung. Das kann sich nachteilig auswirken, weil z.B. eine verschmutzte Linse, Hindernisse im Strahlengang oder auch einfach eine zu geringe Größe des Messobjektes zu systematischen Messabweichungen führen. Die Quotienten- oder Verhältnispyrometer filtern zwei eng benachbarte Wellenlängenbereiche $\lambda_1 \pm \Delta\lambda$ und $\lambda_2 \pm \Delta\lambda$ aus der einfallenden Wärmestrahlung heraus, messen deren Intensitäten separat und bilden den Quotienten beider Messwerte. Geometriefaktoren und Einflüsse durch Strahlengang- Hindernisse kürzen sich heraus, ebenso die Emissivität, sofern die für beide Wellenlängen λ_1 und λ_2 gleich ist. Diesem Vorteil steht i.d.R. eine höhere Messunsicherheit nachteilig gegenüber.



Bild 72 : Handelsüblicher Pyrometer (Bildquelle: Kleiber Infrared GmbH)

1.11.7.5 Sondermessverfahren

In der keramischen Industrie werden **Seigerkegel** verwendet. Das sind keramische Körper, die bei einer festen Temperatur T_w (± 5 °C) erweichen. T_w lässt sich über die Zusammensetzung der Keramiken (Kalium- und Natriumoxid, Kalk, Magnesia etc.) in einem weiten Bereich variieren.

Metallkennkörper werden ebenfalls nur in Spezialfällen eingesetzt. Sie schmelzen bei Erreichen einer bestimmten Temperatur.

Bei **Temperatur-Farben** unterscheidet man **Einfachthermokolore**, die durch Farbänderungen eine bestimmte Temperatur anzeigen, von **Mehrfachthermokoloren**, deren Farben sich stetig oder in Stufen mit der Temperatur ändern.

1.11.7.6 Rückwirkung des Sensors auf das Messobjekt

Wird eine physikalische Größe gemessen, so bedeutet dies, dass sich der Zustand eines geeigneten Sensors in Abhängigkeit dieser Größe ändert. In den meisten (allen?) Fällen verändert aber auch der Sensor den Zustand des Messobjekts, was zu systematischen Fehlern führt.

Die Wechselwirkungen zwischen Sensor und Messgut sollten bekannt sein, um den systematischen Fehler zu minimieren oder rechnerisch zu kompensieren (ersteres ist in jedem Fall vorzuziehen).

Diese Wechselwirkungen sollen nun für die Temperaturmessung mit berührenden Sensoren untersucht werden:

Eine wesentliche Eigenschaft berührender Temperatursensoren besteht in der Tatsache, dass sie grundsätzlich nur ihre eigene Temperatur messen!!!! Um dennoch die Temperatur eines Messobjektes zu bestimmen, muss der Sensor mit diesem in thermischen Kontakt gebracht werden. Dann wird Wärmeenergie vom Messobjekt in den Sensor übergehen (oder umgekehrt, in jedem Fall: von warm nach kalt), bis beide die gleiche Temperatur aufweisen.

Der Sensor wird sich folglich erwärmen und das Messobjekt abkühlen, oder umgekehrt, und der Sensor zeigt nicht mehr die ursprüngliche Temperatur des Messobjekts an.

Beispiel: Temperaturmessung in einem Wassergefäß:

Das Wasser habe anfangs die Masse M_W , die Wärmekapazität C_W und die Temperatur T_W , der Sensor die Masse M_S , die Wärmekapazität C_S und die Temperatur T_S .

Zwei Aussagen werden für die nachfolgende Berechnung benötigt:

1. Die Temperaturen von Wasser und Sensor sind nach dem Eintauchen gleich.
2. Die gesamte Wärmeenergie Q_{ges} von Sensor und Wasser ändert sich nicht. Die Wärmeenergie eines Körpers berechnet sich dabei als Produkt aus Masse (in kg), Wärmekapazität (in $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$) und Temperatur (in Kelvin), wenn vorausgesetzt werden kann, dass die Wärmekapazität temperaturunabhängig ist.

Es gilt:

$$Q_{\text{ges}} = Q_W + Q_S = M_W C_W T_W + M_S C_S T_S = (M_W C_W + M_S C_S) T_{\text{ges}} \quad (149)$$

Diese Gleichung lässt sich nun nach der resultierenden Temperatur T_{ges} umformen:

$$T_{\text{ges}} = \frac{M_W C_W T_W + M_S C_S T_S}{M_W C_W + M_S C_S} \quad (150)$$

Den systematischen Fehler bei der Temperaturmessung zu minimieren heißt hier, dafür zu sorgen, das $T_{\text{ges}} \approx T_W$. Das gelingt, wenn $T_S = T_W$ (dann muss T_W aber schon bekannt ist, womit sich die Messung erübrigt), oder das Produkt $M_S C_S$ klein gegenüber $M_W C_W$ ist.

Den systematischen Fehler wird man nicht auf Null reduzieren können. Aus dem Messwert T_{ges} lässt sich der eigentlich interessante Wert nach Auflösen der Gleichung 149 nach T_W bestimmen. Nicht berücksichtigt in die Analyse systematischer Fehler sind Einflüsse wie z.B. Wärmeabfluss durch Messkabel.