

6.3.6 Pyroelektrischer Effekt (Pyro-Effekt)

Pyroelektrika. Fallen bei einer Kristallstruktur bereits im Ruhezustand die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen nicht zusammen, so liegt eine spontane Polarisation vor. Die Folge ist ein polares piezoelektrisches Material, das man dann pyroelektrisch nennt, weil die spontane Polarisation durch Erhitzen oder Abkühlen verändert wird, was äußerlich am Kristall feststellbar ist. Selbst bei Temperaturen bis zum Schmelzpunkt bleibt diese Polarisation erhalten. Ein typisches Beispiel ist dafür der bereits erwähnte Turmalin. Ein Umpolen durch ein äußeres elektrisches Feld ist nicht möglich, da selbst bei der Durchschlagsfeldstärke des Materials kein Polarisationsumschlag eintritt. Die Pyroelektrika haben also große Ähnlichkeit mit den Ferroelektrika. Der Unterschied besteht darin, dass der pyroelektrische Effekt keine Curie-Temperatur aufweist und nicht umpolbar ist. Es sind sozusagen "besonders stabile Ferroelektrika".

Quelle: http://www.uni-kassel.de/fb16/fsg/dateien/wde/Skript/WDE_TEIL_09.PDF

Es werden z. B. LiTaO_3 , Triglyzinsulfat, ferroelektrische Keramiken oder Poly-Vinylidenfluoridfolien benützt. Der Pyro-Effekt wird zum Erfassen und Messen von Wärmestrahlung im Bereich von $1\ \mu\text{m}$ bis $40\ \mu\text{m}$ angewendet, wobei dann der gleichzeitig auftretende piezoelektrische Effekt stört.

Die Umkehrung des pyroelektrischen Effekts ist der elektrokalendarische Effekt. Legt man z.B. an Turmalin ein elektrisches Feld an, so beobachtet man eine Temperaturänderung des Kristalls.

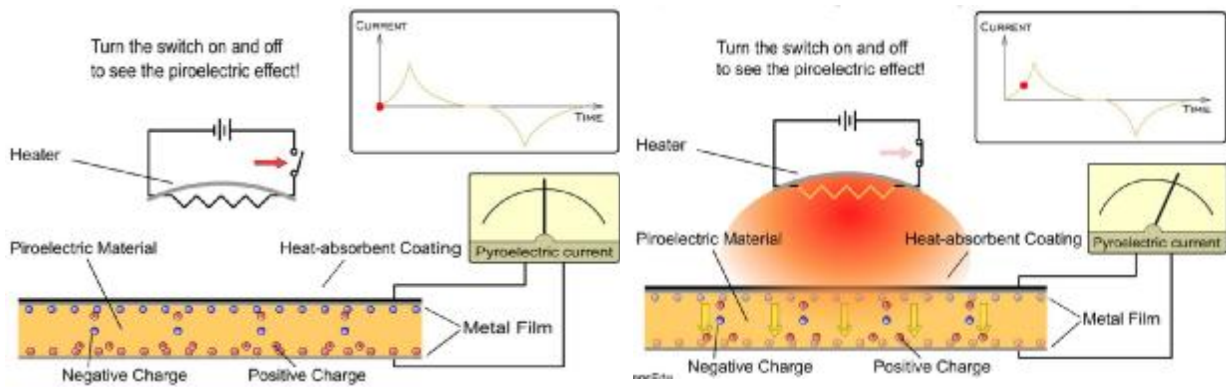
**Ferroelektrische Kristalle zeigen spontane elektrische Polarisation, das heißt, sie sind bereits ohne ein angelegtes elektrisches Feld polarisiert. In einem Ferroelektrikum kann die Richtung der spontanen Polarisation durch ein genügend starkes äußeres elektrisches Feld in die Gegenrichtung umgeklappt werden. Die phänomenologisch-makroskopische Beschreibung der Ferroelektrizität steht in Analogie zu der des Ferromagnetismus, es treten Domänen (Bereiche mit homogener Polarisation) auf. Beim Erhöhen der elektrischen Feldstärke wächst die Polarisation nur bis zu einem bestimmten Wert (ferroelektrische Sättigung); die Polarisation durchläuft in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke eine Hysteresekurve. Atomistisch wird die spontane Polarisation durch Ionenverschiebung im Kristallgitter verursacht. Quelle: Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, 2004*

Jedes Ferroelektrikum ist zugleich pyroelektrisch und piezoelektrisch. (Der piezoelektrische Effekt wird in einer der folgenden Vorlesungsstunden besprochen.) Das Umgekehrte gilt nicht: Quarz (piezoelektrisch) ist weder pyroelektrisch noch ferroelektrisch. Zudem gibt es pyroelektrische Materialien, die nicht piezoelektrisch sind. Außerdem verschwinden die pyroelektrischen Eigenschaften nicht oberhalb der Curie-Temperatur (wie bei den Ferroelektrika). Quelle: Joachim Schubert, Physikalische Effekte, Anwendungen, Beschreibungen, Tabellen, physik verlag.

When piezoelectric materials are under stress, the centers of gravity of the positive and negative charges are separated forming an electrostatic dipole and hence a polarization of the film. In pyroelectrics and electrets (Elektrete*), the centers of gravity of the positive and negative charges are separated even without a stress being applied. These will exhibit spontaneous polarization, which means that there must be permanent electrostatic charge on the surfaces of the film, with one face positive and another negative, depending on the direction of the polarization vector.

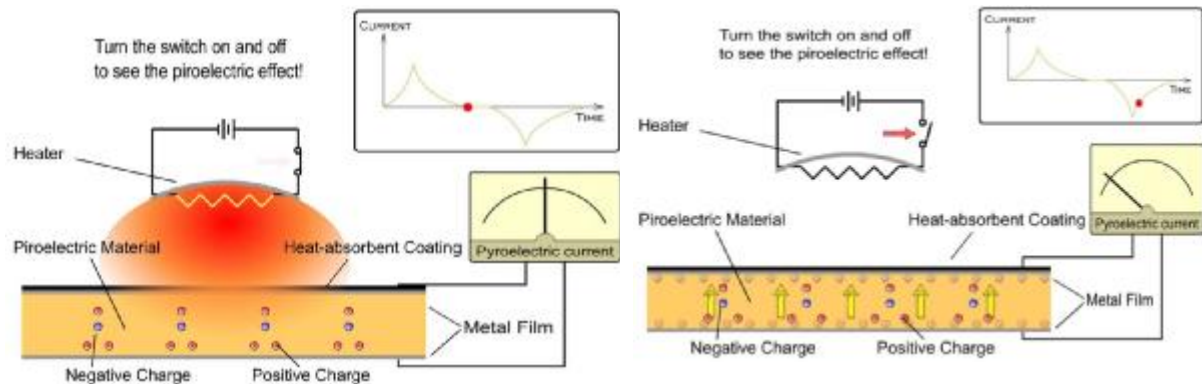
**Elektret [griechisch, ein Dielektrikum mit permanenter dielektrischer Polarisation. Analog einem Permanentmagneten bleibt die z. B. in Harzen in geschmolzenem Zustand durch ein starkes elektrisches Feld erzwungene Ausrichtung der molekularen Dipole bestehen, wenn nach der Erstarrung das Feld abgeschaltet wird. Damit sind die zuvor als Dielektrika vorliegenden Materialien ferroelektrisch mit einem permanenten Dipolmoment geworden. Ihre Polarisation lässt sich durch ein äußeres Feld nicht mehr beeinflussen. Elektrete haben ihre Analogie in den Permanentmagneten. Beispiele für Elektrete: Nylon und Wachs.*

The spontaneous polarization will be a strong function of temperature, since the atomic dipole moments vary as the crystal expands or contracts. Heating the crystal will tend to desorb the surface neutralizing ions, as well as changing the polarization, so that a surface charge may then be detected. Thus, the crystal appears to have been charged by heating. This is called the pyroelectric effect.



Pyroelektrisches Material bei Ausgangstemperatur

Pyroelektrisches Material in der Aufwärmphase: Das Material dehnt sich durch die Temperaturänderung aus. Dadurch kommt es gleichzeitig zu einer Verschiebung von Ladungen, die als Strom gemessen werden können. Die gelben Pfeile geben die Richtung der Ladungswanderung an.



Pyroelektrisches Material bei höheren Temperaturen: Die Ladungen haben sich neu verteilt.

Pyroelektrisches Material während des Abkühlens: Das Material polarisiert sich wieder zurück, wobei erneut Ladungen fließen, die sich als Strom messen lassen. Quelle: www.sensedu.com

The electric field developed across a pyroelectric crystal can be remarkably large when it is subjected to a small change in temperature. We define a pyroelectric coefficient, p , as the change in flux density, D , (D : electric flux density = elektrischer Fluss = dielektrische Verschiebung = $\epsilon_0 \cdot E + P$ with ϵ_0 = permittivity of vacuum, E = electric field vector, P = polarization vector) in the crystal due to a change in temperature, T , i.e.

$$p = \delta D / \delta T.$$

Using a capacitor, the pyroelectric voltage signal ΔU is

$$\Delta U = p \cdot d \cdot \Delta T / \epsilon_r \cdot \epsilon_0,$$

where $\epsilon_r \cdot \epsilon_0$ is the permittivity, and d the thickness of the pyroelectric film. When the temperature changes, an excess of charge appears on one of the polar faces and a current will flow in the external circuit. After the initial surge, the current dies away exponentially with time and eventually falls to zero until another temperature change comes along; this is very similar to the time-dependent behaviour of piezoelectric materials. Pyroelectric films can be used to detect any radiation that results in a change in temperature of the film but are generally used for infrared detection.

Important parameters of the materials are the heat capacity per volume, c_{th} , and the heat conductivity, g_{th} . In high accuracy measurements and thermovision applications these parameters have a great importance; they influence the sensitivity and the resolution. The Table lists the most important properties for some pyroelectric materials.

	PVDF	NaNO ₂	LiTaO ₃	TGS*
p (10⁻⁴ Cm⁻²K⁻¹)	0.25	0.4	1.8	2.8
Permittivity, ϵ_r	9	4	47	38
c_{th} (10⁶ Jm⁻³K⁻¹)	2.3	2.2	3.2	2.3
g_{th} (W/mK)	0.14	2.2	3.9	0.65

*TGS = Triglycine sulphate

PVDF: Polyvinylidenfluorid . Quelle: www.sensedu.com

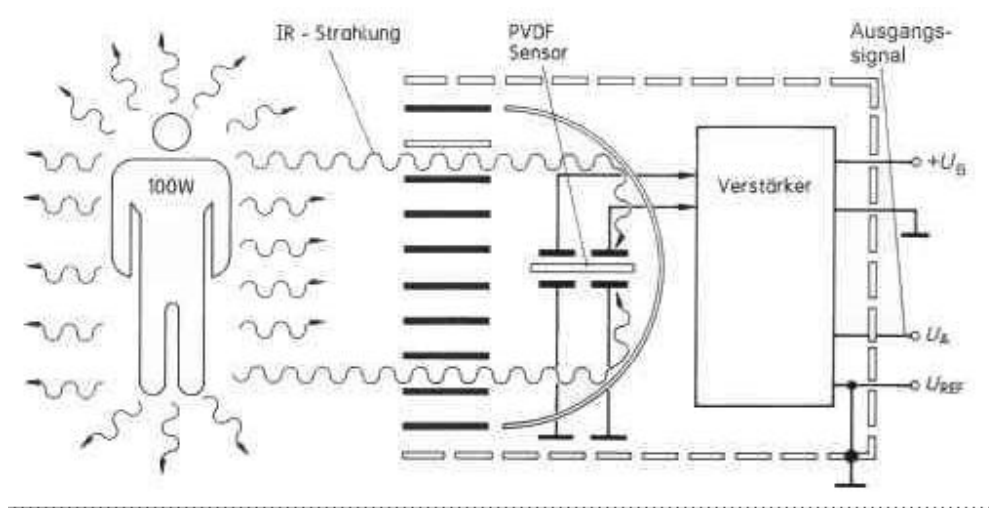
Für pyroelektrische Wandler kommen piezoelektrische Materialien in Frage, vor allem Triglyzinsulfat (TGS), Lithiumtantalat (LiTaO₃) und Polymere, wie Polyvinylidendifluorid (PVDF). Der eigentliche pyroelektrische Wandler wird hierbei hermetisch dicht gekapselt und der Wärmestrahleneintritt nur durch das Fenster gestattet. Das Fenster hat wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad und auf die spektrale Empfindlichkeit. Zur Abnahme der Oberflächenladungen +Q, -Q bzw. der elektrischen Spannung $U = Q/C$ erhalten die betreffenden Oberflächen einen Metallüberzug, der an der Fensterfläche wärmedurchlässig sein muss.

6.3.6.1 Anwendungsbeispiel: Passiv-Infrarot-Detektoren

These sensors are also useful in environmental systems, lighting controls, visitor announcers, robotics, and artificial intelligence.

Anwendung finden solche Pyrosensoren beispielsweise in Passiv-Infrarot-Detektoren zur Personenerfassung. Ein solcher PIR-Detektor ist in folgender Abbildung dargestellt. Die Infrarot-Strahlung, die von einer den Erfassungsbereich betretenden Person ausgeht, wird über einen Parabolspiegel auf ein Stück freitragender PVDF-Folie fokussiert. Eine Dicke von 10...25 μm sorgt für eine kurze Zeitkonstante des Detektors. Vor der Folie ist eine Facettenlinse angebracht, die das Sichtfeld in diskrete Bereiche einteilt. Sie sorgt dafür, dass die Bewegung einer Person diskrete Pulse im pyroelektrischen Material auslöst, da es besonders gut auf Temperaturänderungen anspricht.. Ein PVDF-Kompensationselement, auf das keine IR-Strahlung fällt, verhindert, dass der Detektor auch bei einer allgemeinen Änderung der

Umgebungstemperatur anspricht. Ein typischer Erfassungsbereich eines derartigen Sensors hat einen Radius von einigen Metern und einen Öffnungswinkel von etwa 20°.



Passiv-Infrarot-Personen-Detektor mit einer pyroelektrischen Polymerfolie. Quelle: http://www.michael-muth.de/lectures/TempSens/chap06.html#a02_3 und <http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng/radsens.html>

6.3.7 Ausdehnungsthermometer - Temperaturmessgeräte mit mechanischem Ausgangssignal

Quelle [1]

Zu dieser Gruppe von Temperaturempfängern zählen vorwiegend Ausdehnungsthermometer, bei denen die thermische Ausdehnung eines Feststoffes, einer Flüssigkeit oder eines Gases direkt zur Messung herangezogen wird (Längenänderung), oder aber Thermometer, bei denen die „Ausdehnung“ eines temperaturempfindlichen Materials indirekt zur Temperaturmessung, beispielsweise durch eine Druckänderung, herangezogen werden kann.

Ausdehnungsthermometer gibt es seit Galilei. Es handelt sich hierbei um eine lineare Teilung zwischen zwei Festpunkten:

Fahrenheit (1706): 0° Fahrenheit = Temperatur einer Mischung aus Eis und Salmiak (-17,8 °C); 100° Fahrenheit = "normale Körpertemperatur" des Menschen, was 37,78°C entspricht. Der Gefrierpunkt des Wassers liegt bei 32 °F, der Siedepunkt bei 212 °F. Quelle: <http://www.netlexikon.de/Grad-Fahrenheit.html>

bzw.

Celsius (1742): 0°C= Eis / Wasser bei 1 bar, 100°C = Dampf / Wasser bei 1 bar).

Die Temperaturskala ist thermodynamisch definiert über die ideale Gasgleichung:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

p: Druck, V: Volumen, n: Stoffmenge, R: Gaskonstante, T: absolute Temperatur (also in Kelvin)

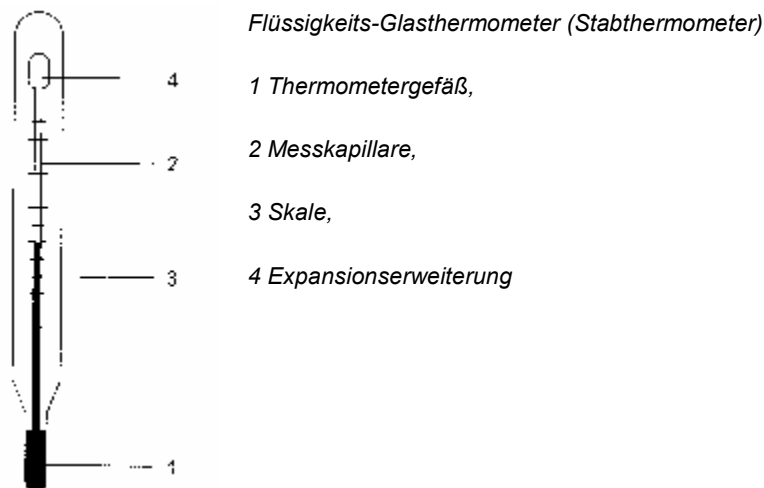
Diese Temperaturskala ist als Definition geeignet, aber zur Messung ungeeignet. Für die praktische Ausführung haben thermodynamische Thermometer keine Bedeutung erlangt, jedoch für grundlegende Arbeiten sind einige Verfahren bekannt geworden.

- Flüssigkeitsthermometer bestehend aus einem Reservoir und einer Kapillare. Für präzise Messungen ist eine Eintauchtiefe in die zu messende Substanz bis zur gemessenen Temperatur notwendig, d.h. das gesamte Ausdehnungsmaterial taucht ein, oder eine Korrektur ist erforderlich.
- Stabausdehnungsthermometer, Verwendung zweier Werkstoffe mit ungleichem Temperaturausdehnungskoeffizienten, z.B. Stahl und Invar.
- Bimetalle, hierbei eine feste Verbindung der beiden Werkstoffe. (Thermometer aus Urban)

Ausdehnungsthermometer lassen sich bei Außenthermometern und Fieberthermometern finden, bei denen die temperaturabhängige Dichte der Anzeigeflüssigkeit ausgenutzt wird (z.B. Alkohole, Quecksilber).

6.3.7.1 Flüssigkeits-Glasthermometer

Messprinzip. Die folgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau eines Flüssigkeits-Glasthermometers. Bei diesen Thermometern wird die thermische Ausdehnung einer in einem Glasgefäß befindlichen thermometrischen Flüssigkeit zur Temperaturmessung ausgenutzt. Infolge der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung der Glaskapillare und der in ihr enthaltenen Flüssigkeit ändert sich die Länge des Flüssigkeitsfadens mit der Temperatur. Als Temperaturanzeige dient das Ende der Flüssigkeitssäule, das an einer mit der Kapillare verbundenen Skale ablesbar ist. Die Empfindlichkeit eines Flüssigkeits-Glasthermometers hängt von den Eigenschaften der verwendeten Flüssigkeit, vom Kapillardurchmesser und dem Gefäßvolumen ab.



Materialien. Die zur Herstellung von Flüssigkeits-Glasthermometern verwendeten Gläser müssen thermisch möglichst nachwirkungsfrei und chemisch beständig sein. Die höchsten Verwendungstemperaturen liegen bei den meisten Gläsern bei 400 bis 460°C, bei Supremax-Glas bei 630 °C und bei Quarzglas bei 1100°C.

Bei den verwendeten thermometrischen Flüssigkeiten unterscheidet man benetzende (organische) und nicht benetzende (metallische) Flüssigkeiten, wobei mit letztgenannten geringere Messunsicherheiten erreichbar sind. Im Temperaturbereich -38 °C bis 800 °C wird Quecksilber (z.T. mit Zusätzen) verwendet, oberhalb dieser Temperaturen kommen Sonderlegierungen, z.B. Galliumlegierungen, zum Einsatz. Für die Messung tieferer Temperaturen wird eine Quecksilber-Thallium-Legierung verwendet (-38 °C bis -58 °C), unterhalb dieser Temperaturen müssen benetzende Flüssigkeiten verwendet werden, z.B.: Pentan, Alkohol, Toluol.

Bauarten. Flüssigkeits-Glasthermometer werden nach ihrer konstruktiven Form als Stab- oder Einschlussthermometer unterschieden. Bei Einschlussthermometern befindet sich die Skale auf einem von der Kapillare getrennten Skalenträger, bei den Stabthermometern befindet sie sich direkt auf der Messkapillare. Bei beiden befindet sich in der Regel am oberen Ende der Kapillare eine Expansionserweiterung zur Vermeidung einer Zerstörung des Thermometers bei Messbereichsüberschreitungen.

Flüssigkeits-Glasthermometer werden für viele Anwendungen gefertigt, sind aber nur bedingt in der Automatisierungstechnik einsetzbar.

Für einfache Temperaturregelungen können Kontaktthermometer als Schaltinstrumente, die bei einer bestimmten Temperatur einen Stromkreis schließen, verwendet werden. Dabei ist das Quecksilber in Kontakt mit einem im Thermometergefäß eingebauten metallischen Draht. In der Thermometerkapillare befindet sich ein festeingeschmolzener oder höhenverstellbarer zweiter metallischer Kontakt. Durch Steigen oder Sinken der Quecksilbersäule können somit Schaltvorgänge ausgelöst werden, die zu Regelzwecken verwendbar sind. Aufgrund der geringen Durchmesser der Schaltkontakte und der Quecksilbersäule lassen sich nur geringe Schaltleistungen realisieren, so dass als Schaltverstärker Relais mit induktionsfreiem Steuerkreis, deren Leistungsaufnahme den zulässigen Grenzwert nicht übersteigt, empfohlen werden. [6.14]

Fehlerquellen/Messunsicherheiten. Bei Flüssigkeits-Glasthermometern ist neben der allgemeinen Forderung bezüglich einer guten thermischen Ankopplung an das Messmedium folgendes zu beachten:

Schnelle Temperaturänderungen können Fehlanzeigen bewirken, wenn infolge thermischer Nachwirkungen die mit der Temperaturänderung verbundene Volumenänderungen des Gefäßmaterials nachlaufend erfolgt. Besonders bei raschen Abkühlungen von Temperaturen oberhalb 100 °C liefern Thermometer zu niedrige Anzeigen, die sich am besten am Eispunkt bestimmen lassen („Eispunktdepression“, i.a. $< 0,05\text{ °C}$). Die thermischen Nachwirkungen sind von der Glasart abhängig und klingen nach wenigen Tagen wieder ab.

Die Fehlergrenzen geeichter Thermometer sind in der Eichordnung (1988) Anlage 14: Temperaturmessgeräte zu finden. Sie sind vom betrachteten Temperaturbereich, von der verwendeten Thermometerflüssigkeit und dem Skalenwert (kleinster Strichabstand) abhängig. Die einhaltbaren Messunsicherheiten mit Flüssigkeits-Glasthermometern sind bei Berücksichtigung aller Fehlerquellen kleiner als die in der Eichordnung angegebenen Eichfehlergrenzen. Sie liegen im Temperaturbereich zwischen -58 °C und 630 °C bei ganz eintauchend justierten Thermometern mit nicht benetzender Flüssigkeit in der Größenordnung der Skalenwerte.

6.3.7.2 Zeigerthermometer - Stabausdehnungs- und Bimetallthermometer

Messprinzip/statistisches Verhalten. Bei Stabausdehnungsthermometern sind zwei stab- oder zylinderförmige Werkstoffe mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten an einem Ende fest miteinander verbunden. Am anderen, frei beweglichem Ende dient die registrierte Längendifferenz zwischen beiden als Maß für eine Temperaturänderung.

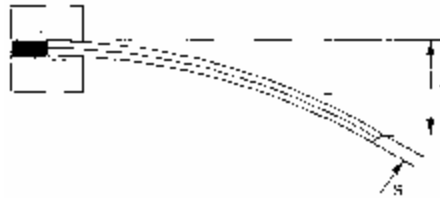
Bei Bimetallthermometern sind zwei etwa gleich dicke Metallschichten mit unterschiedlichem Ausdehnungskoeffizienten über die gesamte Länge direkt miteinander verbunden. Eine Temperaturänderung bewirkt somit eine Verformung des Sensors, die auf einen Zeiger übertragen wird oder einen Schaltkontakt auslöst. Die Kennzeichnung der Bimetalle erfolgt durch die *spezifische Ausbiegung* δ , für die bei gleicher Materialdicke und gleichem Elastizitätsmodul der beiden Komponenten gilt:

$$\delta = \frac{\sqrt{3}}{2} (\alpha_1 - \alpha_2)$$

mit α_1, α_2 Ausdehnungskoeffizienten der beiden Komponenten.

Für die *Ausbiegung* f eines einseitig eingespannten Bimetallstreifens der Länge L und der Dicke s nach einer Temperaturänderung dT gilt:

$$f = \frac{L^2}{s} \delta dT$$

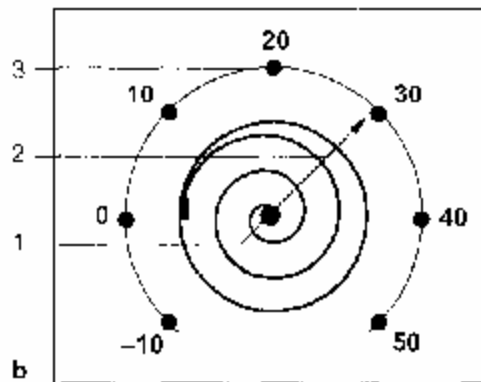
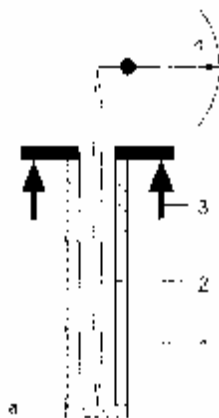


Ausbiegung eines Bimetallstreifens

Die spezifische Ausbiegung δ ist nur über einen begrenzten Temperaturbereich linear von der Temperatur abhängig, so dass sich auch f nur in einem eingeschränkten Bereich linear mit der Temperatur ändert.

Die Fehlergrenzen bei Stabausdehnungs- und Bimetallthermometern liegen bei etwa 1 bis 3% des Anzeigebereichs.

Materialien/Bauarten. Bei Stabthermometern dienen als Werkstoffe für Stäbe mit geringen Ausdehnungskoeffizienten „Invar“ (Schwerlegierung mit dem niedrigsten Wärmeausdehnungswert; linearer Wärmeausdehnungskoeffizient bei 20 – 90°C: $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ - $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), Quarz oder Keramik, die in metallischen, dünnwandigen Rohren mit großem Ausdehnungskoeffizienten auf geeignete Weise befestigt sind.



a Stabausdehnungsthermometer

1 Rohrfest,

2 beweglicher Stab,

3 Rohrbefestigung,

4 Anzeigeeinrichtung;

b Bimetallthermometer,

1 Bimetallstreifen,

2 Zeiger,

3 Skala

Als Rohrmaterialien werden z.B. Messing (bis 300 °C), Nickel (bis 600 °C) oder Chrom/Nickel-Stahl (bis 1000°C) verwendet. Die bei Stabthermometern auftretenden großen Stellkräfte werden direkt für Regelzwecke genutzt. Stabthermometer können mit elektrischen Kontakten zur Zweipunktregelung ausgestattet sein oder an hydraulische oder pneumatische Regler angeschlossen werden.

Für Bimetallthermometer werden Eisen-Nickel-Legierungen bevorzugt, wobei die Legierung mit dem geringeren Ausdehnungskoeffizienten Zusätze von Mangan enthält. Der temperaturempfindliche Teil kann eine Spiral- oder Schraubenfeder sein, die aus einem Bimetallstreifen gefertigt ist und sich bei Temperaturänderungen auf oder abwickelt. Der Ausschlag eines mit der Feder verbundenen Zeigers ist ein Maß für die erfolgte Temperaturänderung.

Anwendungsbeispiele

- Heizkörperventil-Stellantrieb,
- Starteinrichtung von Vergasermotoren (Hochlaufphase und Warmlaufphase).

Vorteile: große Typenpalette, robust, preiswert, große Hübe bei hohen Stellkräften

Nachteile: mäßiges dynamisches Verhalten, begrenzter dyn. Temperaturbereich.

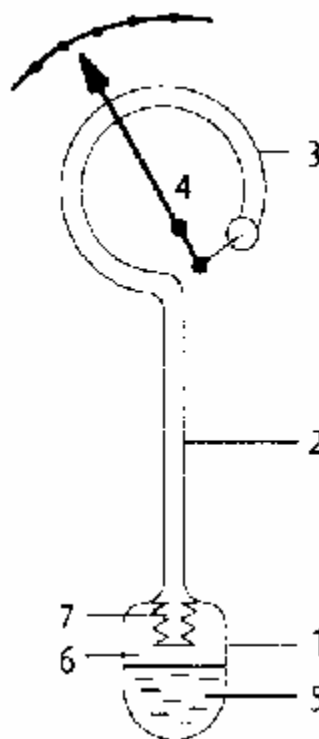
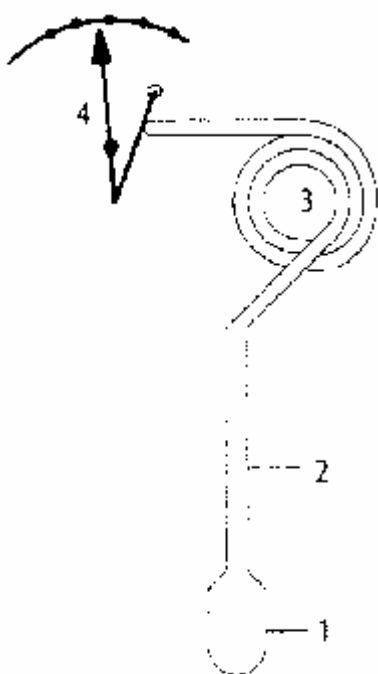
6.3.7.3 Federthermometer

Messprinzip. Bei Federthermometern wird die Temperatur über den Druck mit Hilfe elastischer Messglieder gemessen, deren Stellung durch die relative thermische Ausdehnung einer flüssigen oder gasförmigen Substanz, die sich in einem geschlossenen System befindet, bestimmt wird.

Materialien/Bauarten. Nach der Art des verwendeten temperaturempfindlichen Füllmaterials unterscheidet man Flüssigkeits-, Dampfdruck- oder Gasdruck-Federthermometer. Der grundsätzliche Aufbau ist bei allen Varianten gleich. Das Thermometergefäß aus Metall oder Glas, in dem sich das Übertragungsmedium befindet, wird der zu messenden Temperatur

ausgesetzt. Es ist über eine dünne Kapillarleitung (Innendurchmesser 0,1 bis 0,3 mm, Länge bis zu 30 m) mit dem elastischen Messglied verbunden, das auf Druckänderungen der thermometrischen Substanz reagiert und mittels Übertragungsglieder den Messzeiger bewegt. Ihr Einsatz in der Automatisierungstechnik beschränkt sich auf einfache Regelungsaufgaben.

Bei Flüssigkeits-Federthermometern ist das Thermometergefäß in Abhängigkeit vom Messbereich mit Quecksilber, Quecksilber-Thallium-Legierungen, Xylol oder Toluol vollständig gefüllt. Die Volumen- und Druckänderung als Maß für die Temperaturänderung wird von der Messfeder aufgenommen, und kann als nahezu linear betrachtet werden. Der Messbereich liegt in Abhängigkeit von der verwendeten Flüssigkeit zwischen -55 °C und 500 °C . Die Einstellzeiten sind aufgrund der Bauart sehr gering, wodurch eine Nutzung von Flüssigkeits-Federthermometern für einfache Steuer- und Regelungsaufgaben durch Anbringung von Messkontakten am Messwerk möglich wird.



a Flüssigkeits-Federthermometer

- 1 Thermometergefäß,
- 2 Kapillare,
- 3 elastisches Messglied,
- 4 Anzeigemechanismus;

b Dampfdruck-Federthermometer

- 1 Thermometergefäß,
- 2 Kapillare,
- 3 elastisches Messglied,
- 4 Anzeigemechanismus,
- 5 Thermometerflüssigkeit,
- 6 Dampf,
- 7 Faltenbalg

Bei Dampfdruck-Federthermometern ist das Thermometergefäß nur teilweise mit einer leicht siedenden Flüssigkeit gefüllt, so dass neben der flüssigen Phase auch der Dampf der thermometrischen Flüssigkeit existiert. Als Übertragungsbauteil zwischen Thermometergefäß und Kapillare mit Messglied wird häufig ein Druckübertrager (z.B. Faltenbalg) eingesetzt, der ein Austreten und Kondensieren der Thermometerflüssigkeit außerhalb des Thermometergefäßes verhindern soll. Der Sättigungsdruck der thermometrischen Flüssigkeit ist nur von der Höhe der Temperatur, nicht aber von der Flüssigkeitsmenge im Thermometergefäß abhängig. Er steigt nahezu exponentiell mit der Temperatur, so dass nichtlineare Skalen erforderlich sind. Von Vorteil ist die hohe Auflösung (Empfindlichkeit) in einem eingeschränkten Temperaturbereich, wodurch u.U. kleine Regelabweichungen abgeleitet werden können.

Bei Gasdruck-Federthermometern ist das ganze System konstanten Volumens mit einem Gas (z.B. Stickstoff oder Helium) gefüllt, dessen temperaturabhängige Druckänderung auf eine

Messfeder zur Temperaturanzeige übertragen wird. Der mechanische Aufbau und die Skalencharakteristik entsprechen denen der Flüssigkeits-Federthermometer, wobei nur geringere Verstellkräfte auftreten. Von Vorteil ist das Gasdruck-Federthermometer dann, wenn eine lineare Anzeige über einen weiten Temperaturbereich gefordert wird.

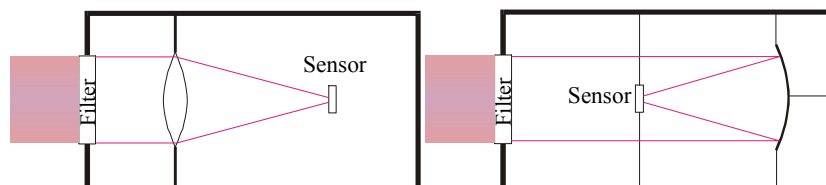
Fehlerquellen/Meßunsicherheiten. Die Umgebungstemperatur beeinflusst bei vollständig mit Flüssigkeit oder Gas gefüllten Federthermometern die Temperaturanzeige über die thermometrischen Substanzen, die sich in den Kapillaren oder Messgliedern befinden und nicht der zu messenden Temperatur ausgesetzt sind. Besonders bei längeren Kapillarleitungen sind Federthermometer häufig mit Kompensationseinrichtungen zum Ausgleich des Außentemperatureinflusses versehen. Des Weiteren sind auch die elastischen Eigenschaften der Messfeder temperaturabhängig. Wärmeleitungsprozesse über die Kapillare sind wie bei allen Berührungsthermometern zu berücksichtigen und durch geeignete Einbaubedingungen zu minimieren. Unterschiede in der Anzeige bei steigenden oder fallenden Temperaturen (Hysterese) können durch mechanische Behinderungen (Reibung) auftreten.

Die Fehlergrenzen bei Federthermometern liegen im Bereich von 1 bis 2% vom Anzeigebereich.

6.3.8 Berührungslose Thermometer

- Pyroelektrische Aufnehmer, Array (s.o.)
- Bolometer: Ein Bolometer ist ein Strahlungs- bzw. Temperaturmessgerät, welches von S.P. Langley entwickelt wurde. Beim Bolometer wird der Widerstand einer geschwärzten Platinfläche in Abhängigkeit von der absorbierten Strahlung (und damit der Temperatur der Platinfläche) in einer Brückenschaltung gemessen. Moderne Bolometer verwenden Halb- und Supraleiter, da durch die Verwendung dieser Materialien wesentlich höhere Empfindlichkeiten erzielt werden können als bei der Verwendung von Platinfolien.
- Thermokette/ Thermosäule, träge
- Photodioden (IR)
- CCD-Arrays (besonders empfindlich im IR-Bereich)

Aufbau in Kameras oder Ähnlichem:



Optischer Strahlengang:

- Linse & Filter: λ - abhängig, da Transmission $\rightarrow f = f(\lambda)$
- Hohlspiegel & Filter: λ - unabhängig, da Reflexion $\rightarrow f \neq f(\lambda)$

Wärmebild – Kamera:

- Sensor – Flächenarray
- Sensor – Zeilenarray & ein Schwenkspiegel
- Punktsensor & zwei Schwenkspiegel (hochauflösend, aber langsamer)

Literaturhinweise:

Lieneweg, Fritz, Handbuch Technische Temperaturmessung, Vieweg Verlag.

Bräuning, Günter, Überprüfung der Übereinstimmung zwischen IPTS und TTS, VDI-Verlag GmbH.

Profos, P. Handbuch der industriellen Messtechnik, Vulkan Verlag

6.3.9 Spezielle Sensoren

6.3.9.1 Quarzthermometer

Neben den bisher vorgestellten Temperatursensoren gibt es noch eine Vielzahl von spezielleren Varianten, die z.B. für Präzisionsmessungen oder berührungslose Temperaturmessung verwendet werden.

Die Eigenfrequenz von Schwingelementen ist von der Frequenz abhängig. Beim Quarz kann man durch die Schnittrichtung ein bestimmtes Temperaturverhalten erreichen. Quarzschwinger für Uhrenoszillatoren sollten natürlich eine möglichst geringe Temperaturabhängigkeit aufweisen. Es ist aber möglich, den Schwingquarz so aus dem Einkristall herauszuschneiden, dass dessen Resonanzfrequenz in guter Näherung linear von der Temperatur abhängt. Solche Temperatursensoren sind Quarzdickenschwinger. Ihre Eigenfrequenz kann wie folgt berechnet werden:

$$f_{\text{res}} = \frac{n}{2d} \sqrt{\frac{E_m}{\rho}}$$

Hierbei bedeuten d die Dicke des Schwingers, E_m das Elastizitätsmodul, ρ die Dichte, n die jeweilige Oberwelle ($n = 1$: Grundschiwingung) und m die entsprechende Schwingungsrichtung. Die Temperaturabhängigkeit wird dabei im Wesentlichen vom temperaturabhängigen Elastizitätsmodul E_m hervorgerufen.

Der Grundaufbau eines Quarzthermometers ist immer ähnlich. Benötigt wird ein Quarzschwinger für die unmittelbare Einkopplung der Temperatur in das System. Zusätzlich ist noch eine Referenz erforderlich, gegen die die vom Quarzsensor gelieferte Frequenz verglichen wird. Diese Referenz kann entweder aus einem zweiten Quarzschwinger, der einer konstanten Referenztemperatur ausgesetzt wird, oder aus einem Referenzoszillator (wie im folgenden Beispiel) bestehen. Ein Umschalter schaltet dann mit einer festen Schaltfrequenz abwechselnd die eigentliche Messfrequenz und die Referenzfrequenz auf einen Zähler. Durch dieses alternierende "Messen" erhält man als Ergebnis die Differenz zwischen Mess- und Referenzfrequenz, d.h. die Abweichung der Temperatur von der Referenztemperatur.

Durch eine entsprechende Schnittrichtung erreicht man eine Empfindlichkeit von 1000 Hz/K, wenn die 3. Harmonische etwa 28 MHz beträgt. Quarzthermometer werden vorwiegend für Präzisionsmessungen eingesetzt, da sie sehr aufwändig sind.

6.3.9.2 *Temperaturmessgeräte mit optischem Ausgangssignal*

Optische Temperaturmessverfahren nutzen physikalische Effekte, bei denen sich optische Eigenschaften bestimmter Stoffe aufgrund von Temperaturänderungen verändern. In der Automatisierungstechnik werden zunehmend faseroptische Thermometer eingesetzt.

Grundbestandteile dieser Thermometer sind Lichtquellen, Lichtleitfasern, die teilweise als Sensor präpariert sind und Fotodetektoren mit elektronischer Signalaufbereitung. Der Konstruktion faseroptischer Sensoren kann eine Vielfalt physikalischer Prinzipien zugrunde gelegt werden.

Ein faseroptischer Temperatursensor, der den Effekt ausnutzt, dass sich die Brechzahl eines optischen Mantels des Lichtleiters, und damit die Lichttransmission in einer definierten Faserkrümmung mit der Temperatur ändert. Das in einer Lichtleitfaser geführte Licht wird in einer U-förmigen Faserkrümmung teilweise aus dem Leiter ausgekoppelt. Die Intensitätsänderung des weiter zum Detektor geführten Lichtes ist ein Maß für die Temperatur. Instabilitäten der Lichtquelle oder Dämpfungsschwankungen der Lichtleiterverbindungsstellen oder -zuleitungen verfälschen das Messsignal und müssen kompensiert werden. Dazu kann über einen Lichtleiter-Y-Verzweiger ein optischer Referenzkanal zu einem zweiten Empfänger geschaltet werden. Unter Nutzung der charakteristischen Kennlinienverläufe der Sensorelemente können dann die Messfehler verursachenden Intensitätsschwankungen der Lichtquelle durch elektronische Vergleichs- und Auswerteschaltungen kompensiert werden.

Mit diesen als Berührungs- oder Eintauchthermometer zu nutzenden faseroptischen Sensoren können bei Verwendung von Stufenindexfasern in einem nahezu linearen Messbereich von etwa -50 °C bis +200 °C Temperaturen mit einer Empfindlichkeit von ca. 0,1°C gemessen werden.

Typische Anwendungsgebiete liegen insbesondere dort, wo verarbeitbare Messsignale erforderlich sind, elektronische Temperaturmesstechnik jedoch nicht oder nur problematisch einsetzbar ist, z.B. in starken elektromagnetischen Feldern und in explosiver oder aggressiver Umgebung.

6.3.9.3 *Lumineszenzthermometer*

Ein weiteres Beispiel für faseroptische Thermometer sind Lumineszenzthermometer, die die Temperaturabhängigkeit der Lumineszenz eines Sensormaterials zur Temperaturmessung nutzen. Dabei werden die Wellenlängenverschiebung des Lumineszenzlichtes oder die temperaturabhängige Abklingzeit der Lumineszenz nach Anregung mit einem kurzem Lichtimpuls genutzt.

Temperaturmesssysteme auf Basis der Lumineszenzabklingzeit: Das Licht einer Wellenlänge (600 nm) wird über ein Optikteil in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt. Am anderen Ende regen diese Lichtimpulse einen Chrom-dotierten YAG-Kristall (Yttrium-Aluminium-Granat) zur Lumineszenz an, wobei die Cr³⁺-Ionen in Abhängigkeit von der Temperatur verschiedene Energieniveaus besetzen. Ein Teil des Lumineszenzlichtes, das nach der Anregung längere Wellenlängen besitzt, wird in den Optikteil zurückgeführt, spektral gefiltert und mit einer Photodiode detektiert. In der Auswerteelektronik wird die Abklingzeit als Maß für die absolute

Temperatur T am Ort des Sensorkristalls, die von den besetzten angeregten Energieniveaus abhängt, bestimmt und der entsprechende Temperaturwert angezeigt. Die galvanische Trennung zwischen Messobjekt und Gerät durch den Einsatz von Lichtwellenleitern erlaubt einen problemlosen Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen oder in HF- und Hochspannungsanlagen. Mit dem beschriebenen Lumineszenzthermometer erreicht man im Temperaturbereich -50 °C bis 400 °C Genauigkeiten von 0,5°C.

6.3.9.4 Rauschthermometer

Bei der Temperaturmessung aus dem thermischen Rauschen wird die ungeordnete, statistische Wärmebewegung der Elektronen im Leitungsband (z.B. von metallischen Leitern) zur Messung herangezogen. Diese Bewegungen machen sich als Spannungsschwankungen an den Enden eines elektrischen Widerstandes bemerkbar und sind eine Funktion der absoluten Temperatur T. Quantitativ beruht die Rauschthermometrie auf einer von Nyquist 1928 aus allgemeinen thermodynamischen Überlegungen abgeleiteten Beziehung, die unter der Voraussetzung, dass $k \cdot T \gg h \cdot f$ ist, wie folgt beschrieben werden kann:

$$\overline{U^2} = 4kT R \Delta f .$$

Es sind:

U^2 mittleres Rauschspannungsquadrat im Frequenzband Δf ,

R frequenzunabhängiger, ohmscher Widerstand,

T thermodynamische Temperatur,

k Boltzmannkonstante

h Planck-Konstante.

Aus Gl. (6.36) lässt sich über geeignete Messverfahren direkt die thermodynamische Temperatur bestimmen. Um Absolutmessungen der in der Größenordnung des Eigenrauschens von Verstärkern liegenden Rauschspannung des Widerstandes zu vermeiden, können die Messverfahren als Vergleichsverfahren und Nullmethode ausgeführt werden. Ein Vorteil der Rauschthermometrie liegt darin, dass die Bestimmung der Temperatur unabhängig von allen Umgebungseinflüssen ist, die bei konventionellen Temperaturmessverfahren die Temperaturcharakteristik der Messfühler unkontrollierbar ändern. Im Temperaturbereich zwischen 300 und 1700 K wurden relative Messunsicherheiten von 1‰ erreicht.

6.3.9.5 Akustische Thermometer

Bei akustischen Thermometern wird die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur genutzt. Man unterscheidet resonante Messsysteme (z.B. Quarzresonator) und nichtresonante Messsysteme (z.B. Schall-Laufzeit-Messung). Im ersten Fall sind die Ausgangssignale Frequenzen und im zweiten Fall Zeitintervalle, die leicht in digitale Signale umsetzbar sind.

Die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Gasen zeigt die folgende Gleichung:

$$c(T) = c_0 \sqrt{\left[\frac{T}{T_0} \right]}$$

mit

T absolute Temperatur,

T₀ beliebige Bezugstemperatur und c₀ Schallgeschwindigkeit bei T₀.

Nach dem Puls-Echo-Prinzip kann mit rohrförmigen Eintauchsensoren aus beliebigen Materialien, in denen sich das Gas befindet, die Temperatur bis zur thermischen Belastbarkeit dieser Rohre mit Unsicherheiten von weniger als 1 K bestimmt werden [VDI/VDE 3511/1]. Bei sehr hohen Temperaturen können auch Festkörper, z.B. Wolframdrähte, eingesetzt werden, bei denen Querschnittsänderungen die Sensorstrecke begrenzen.

6.4 Temperaturkompensation

Bei Temperatursensoren wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Größe Temperatur einen großen Einfluss auf viele physikalische Vorgänge hat. Diese Effekte sind dort erwünscht. Aber diesen Einfluss hat die Temperatur natürlich nicht nur, wenn wir das gerade wollen. Sie beeinflusst viele andere Prozesse auf unerwünschte Weise. Es soll im Folgenden kurz angedeutet werden, wie man den unerwünschten Einfluss der Temperatur auf Messvorgänge kompensieren kann.

6.4.1 Kompensation mittels Referenzsensor

Eine Möglichkeit zur Temperaturkompensation besteht darin, zwei Sensoren (z.B. Magnetfeld-Sensoren) gleichen Typs nahe beieinander anzuordnen. Es wird jedoch nur einer davon der eigentlichen Messgröße (z.B. Magnetfeld) ausgesetzt, d.h., das Signal des zweiten Sensors ist nur abhängig von der auf ihn wirkenden Temperatur. Dieselbe Temperatur beeinflusst nun natürlich auch den ersten "Messsensor". Da beide gleichen Typs sind, ist der Einfluss der Temperatur bei beiden (weitgehend) gleich. Falls also keine Messgröße auf den Sensor wirkt, beträgt die Differenz beider Ausgangssignale (z.B. Spannungen) 0.

Üblicherweise speist man mit den beiden Sensorsignalen eine Brückenschaltung, die dort abgreifbare Differenzspannung ist dann (weitgehend) entkoppelt vom Temperatureinfluss auf

6.4.2 Kompensation mittels separater Temperaturerfassung

Eine weitere Methode ist auch besonders für integrierte Sensoren (z.B. mit Primärelektronik) geeignet. Hierbei wird neben dem Sensor für die eigentliche Messgröße (z.B. Magnetfeld) noch ein Temperatursensor in die Schaltung integriert. Dieser erlaubt es nun, die auf den "Messsensor" wirkende Temperatur zu ermitteln. Bei bekanntem Temperaturverhalten dieses Messsensors kann dieser Einfluss mittels geeigneter Kompensationsschaltungen (u.U. auch mittels Mikroprozessor) "herausgerechnet" werden. Man erhält somit auch ein Sensorsignal, das (weitgehend) frei vom Temperatureinfluss auf den Messsensor ist.

6.5 Anwendungen von Temperatursensoren

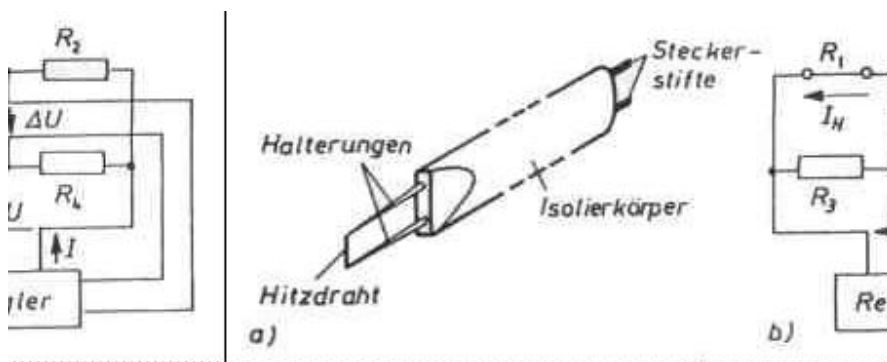
Temperatursensoren finden in vielen Bereichen Anwendungen, eben überall dort, wo die Temperatur einer Materie gemessen und anschließend elektronisch ausgewertet werden muss. Aber auch die Erfassung verschiedener anderer Größen lässt sich auf eine Temperaturmessung zurückführen.

6.1.1 Anemometrie (Strömungsmessung) - Thermische Mikro-Durchfluss-Sensoren

Bezeichnungen: Durchfluss-Gassensor, Anemometer, Microbridge Mass Airflow Sensor

Strömt ein Gas oder eine Flüssigkeit mit der Geschwindigkeit v an einem aufgeheizten Widerstandsdraht vorbei, so kühlt sich dieser unter dem Einfluss der kühlenden Strömung ab. Dieser Effekt kann zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit benutzt werden, wobei man entweder bei konstantem Heizstrom den Widerstand ermittelt (Verfahren mit konstantem Strom) oder bei konstant gehaltenem Widerstand den zugehörigen Heizstrom (s. Abb. 8.1) bestimmt (Verfahren mit konstantem Widerstand). Um eine große Empfindlichkeit zu erreichen, werden für die Messdrähte reine Metalle (meist Platin, Platin-Iridium, Nickel oder Wolfram) mit Drahtlängen von 0,3...10 mm und Drahtdurchmessern von 1 m bis 0,1 mm benutzt. Die Messdrähte haben Widerstände von einigen bis zu mehreren 10 Ω und Temperaturen von 100 bis 1000 $^{\circ}\text{C}$. Hohe Temperaturen ergeben große Empfindlichkeiten, verursachen aber eine schnelle Alterung.

Das Verfahren mit konstantem Strom ist für Strömungsgeschwindigkeiten bis etwa 15 m/s gut geeignet. Mit dem Verfahren "konstanter Widerstand" lassen sich bedeutend höhere Strömungsgeschwindigkeiten messen. Bei den dünnsten Messdrähten erreicht man eine obere Grenzfrequenz von 10 kHz. Auch Halbleiterwiderstände verwendet man wegen der starken Temperaturabhängigkeit für die Strömungsmessung. Sie haben eine Länge von 5...20 mm und einen Durchmesser von 1...3 μm . Infolge ihrer Masse sind sie träge, man erreicht hier nur Grenzfrequenzen von einigen Hertz.



Hitzdraht-Anemometrie. Quelle: <http://www.michael-muth.de/lectures/TempSens/chap08.html#a01>

a) Hitzdraht-Sonde

b) Schaltung für Verfahren mit konstantem Widerstand des Hitzdrahtes

Die Empfindlichkeit der Anemometer hängt von der spezifischen Wärme des Gases oder der Flüssigkeit, der Temperatur und vom Wärmeübergangskoeffizienten (von

Oxidationserscheinungen und Staubablagerungen) am Messdraht ab. Anemometer besitzen eine ausgeprägte Richtcharakteristik. Ein Minimum der Empfindlichkeit zeigen sie, wenn die Längsachse des Messdrahtes in Richtung der Strömung weist.

Quelle: NTB Sensordatenbank / Labor Elektronische Messsysteme Sensor No. 18 bei Franz Baumgartner // e-mail: Bu@ntb.ch // Fachhochschule Buchs / www.ntb.ch/Pubs/sensordemo/ 2002-06-27 NTB; Erstellt: 2002-03-04 von Ch. Eugster / F. Felix Überarbeitet: 2002-06-27 von F. Baumgartner / FH-Buchs / Labor Elektronische Messtechnik

6.5.1.1 Genauere Erläuterung des Messprinzips

Ein Gas der Temperatur ϑ_G , das an eine geheizte Fläche der Temperatur $\vartheta_H > \vartheta_G$ grenzt, nimmt dort thermische (kinetische) Energie auf. Der dadurch entstehende Wärmeverlust der geheizten Fläche ist proportional zur Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta = \vartheta_H - \vartheta_G$ und zur Zahl der pro Zeit auftreffenden Moleküle.

Über die Messung der Wärmeabgabe können somit auch kleine Gasströmungen bestimmt werden. In der Praxis haben sich zwei Verfahren bewährt: Das Wärmeverlustverfahren und das Wärmeverteilungsverfahren.

Wärmeverlustverfahren:

Nach der Kingschen Beziehung ist der Wärmeverlust, einer durch den Widerstand geheizten Fläche mit dem Strom I_H und der Temperatur ϑ_H an das Gas mit der Temperatur ϑ_G ($\vartheta_G < \vartheta_H$) gegeben durch:

$$P_H = I_H^2 \cdot R_H = (A + B \cdot q_m^n) \cdot \Delta\vartheta \quad n = 0.4 \dots 0.5 \quad \text{aus [1], S. 440}$$

P_H Heizleistung

q_m Massendurchfluss

R_H Heizwiderstand

I_H Strom durch den Heizwiderstand

$\Delta\vartheta$ Temperaturdifferenz $\vartheta_H - \vartheta_G$

A, B empirische Konstanten

Darin ist $A \cdot \Delta\vartheta$ der Wärmeverlust durch freie Konvektion, Wärmestrahlung und Wärmeableitung an die Halterung. $B \cdot \Delta\vartheta$ ist der Proportionalitätsfaktor für die erzwungene Konvektion. Die Apparategröße A und der Proportionalitätsfaktor B sind dabei konstante Größen. Die Idee der Schaltung (Abbildung 1) besteht nun darin, dass die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ immer konstant gehalten wird. Nach der obigen Formel bedeutet dies, dass bei Änderung des Massendurchflusses die Heizleistung P_H und somit I_H geändert werden muss, damit die Gleichung erfüllt ist.

Der Heizwiderstand R_H wird durch den Strom I_H auf eine Temperatur ϑ_H gebracht bis $R_H/R_2 = R_9/R_1$ ist. Die beiden Widerstände $R_H = R_{0H} \cdot (1 + a \cdot \vartheta_H)$ und $R_9 = R_{09} \cdot (1 + a \cdot \vartheta_G)$ sind zwei

temperaturabhängige Platin-Dünnschichtwiderstände. Man wählt $R_{0H} / R_{0g} = 1/100$ und erreicht damit, dass fast der gesamte Brückenstrom durch R_H fließt. Damit wird der Widerstand R_g nicht erwärmt und nimmt die Temperatur des Gases an. Dadurch haben nun die Widerstände eine Temperaturdifferenz von $\Delta\vartheta$. Die Widerstände R_1 und R_2 sind Konstantwiderstände. Sie werden so gewählt, dass die Regelung mit einer hohen Empfindlichkeit arbeitet. Für die Abgleichbrücke heißt das: $R_2 \cdot R_H$ und $R_1 \cdot R_g$. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $v=0$ entsteht also eine Abgleichung der Brücke und U_d wird somit 0. Wenn nun das Gas zu strömen beginnt kühlt sich der Widerstand R_H ab, U_d wird >0 und die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ ändert sich. Der Operationsverstärker mit Leistungsausgang erhöht nun den Strom I und somit auch den Heizstrom I_H , bis die Brücke wieder abgeglichen ist ($U_d=0$) und wieder die ursprüngliche Temperaturdifferenz herrscht. Damit ist auch $R_H/R_2 = R_g/R_1$. Um den Durchfluss q_m nun angeben zu können wird der Heizstrom I_H gemessen und mit Hilfe eines Mikroprozessors anhand der Formel

$$q_m = -\left(\frac{A}{B}\right)^{\frac{1}{n}} + \left(\frac{R_H}{\Delta\vartheta \cdot B}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot (I_H)^{\frac{2}{n}} \quad \text{aus [1], S. 440}$$

berechnet.

Der große Vorteil dieser Schaltung ist, dass keine Korrektur nötig ist, auch wenn sich die Temperatur des Gases ändert. Sollte dies nämlich der Fall sein ändern beide Temperaturwiderstände (R_H und R_g) ihren Widerstand um dieselbe Größe und die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ bleibt gleich.

Wärmeverteilungsverfahren:

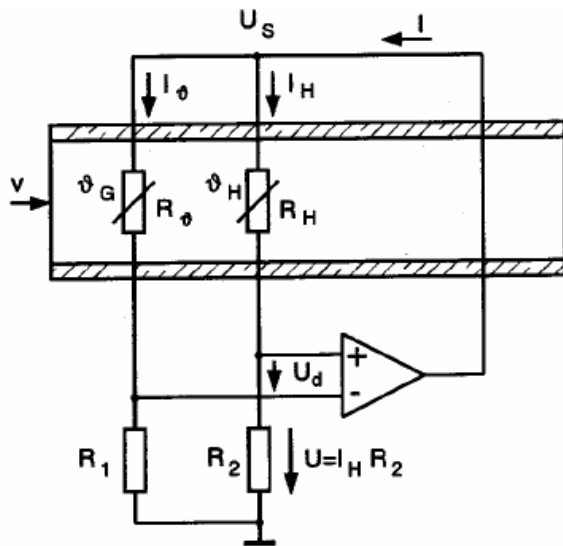
Beim Wärmeverteilungsverfahren befindet sich ein Heizwiderstand R_H zwischen zwei temperaturabhängigen Widerständen R_1 und R_2 . Der wesentliche Unterschied zum Wärmeverlustverfahren liegt darin, dass hier die Heizleistung P_H im Widerstand R_H konstant gehalten wird. Ebenfalls über die Kingsche Beziehung ändert sich nun die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ in Funktion des Durchflusses. Kingsche Beziehung umgeformt:

$$\Delta\vartheta = \frac{P_H}{A + B \cdot q_m^n}$$

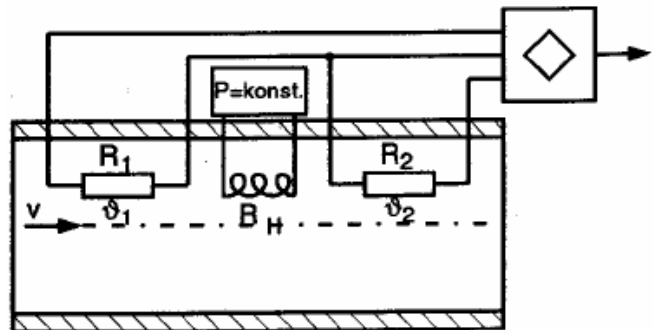
Die Temperatur des Widerstandes bleibt gleich, die Temperatur des Gases ändert sich. Ist der Durchfluss null, erwärmt sich das Gas am stärksten. Außerdem verteilt es sich in alle Richtungen gleich, es bildet sich eine Wärmeblase. Die beiden Widerstände R_1 und R_2 ändern sich in gleichem Masse.

Bewegt sich hingegen das Gas, wird die Wärmeblase verzerrt. Der vordere Widerstand wird weniger erwärmt als der hintere. Durch Anordnung der beiden Widerstände R_1 und R_2 in einer Brückenschaltung kann diese Temperaturdifferenz in eine Spannung überführt werden.

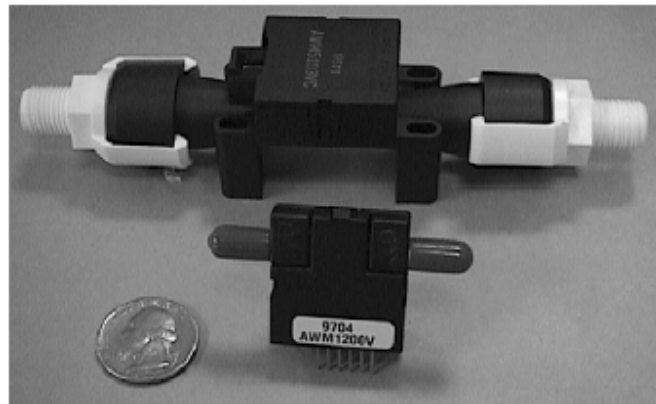
6.5.1.2 Bauformen



Schaltung Wärmeverlustverfahren [1]



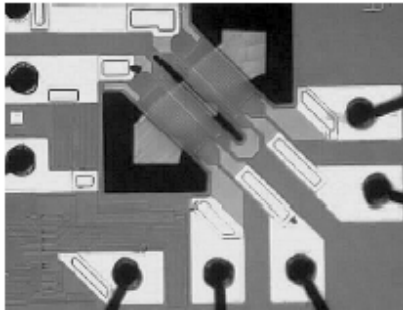
Schaltung Wärmeverteilungsverfahren [1]



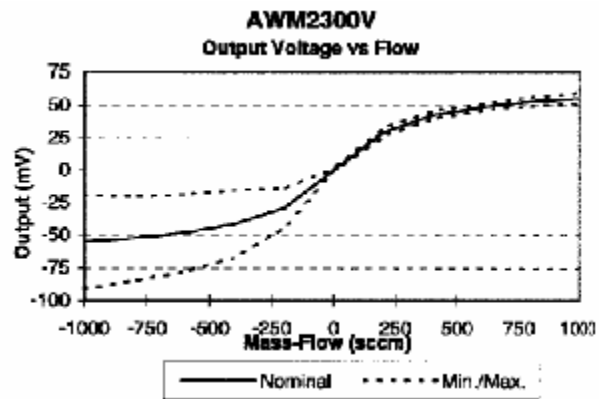
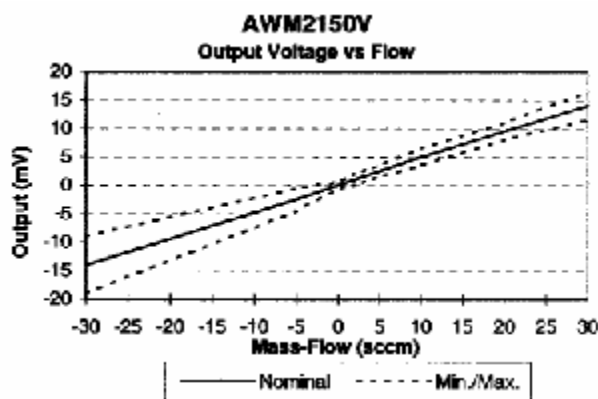
Bauformen [3]

6.5.1.3 Funktionsweisen / Produktvarianten: Beispiel Microbridge Mass Airflow Sensor

Der Microbridge Mass Airflow funktioniert nach dem Prinzip von Wärmetransport (Wärmeverteilungsverfahren). Die Luft erwärmt sich über dem Heizelement und diese Erwärmung wird dann beim Sensorelement gemessen. Die gesamte Schaltung besteht aus einem Chip. Das Bild rechts zeigt dessen Aufbau. Er besteht aus zwei Brücken, die je die Hälfte des Heizelements und ein Sensorelement enthalten. Durch beidseitige Anordnung der Sensorelemente, kann der Fluss bidirektional erfasst werden.



Aufbau [3]



Vergleich von zwei Kennlinien [2]: Charakteristik von zwei Microbridge-Sensoren vom gleichen Hersteller. Es ist gut ersichtlich, dass die Linearität nur bei kleinen Durchflussströmen gewährleistet ist. Auch die Messunsicherheit wird größer, je größer der Messwert ist.

Das Heizelement wird um 160°C über die Umgebungstemperatur aufgeheizt. Ist der Durchfluss null, so wird von beiden Sensorelementen die gleiche Wärme registriert. Bei Durchfluss kühlt sich das vordere Sensorelement ab, das nachfolgende wird erwärmt. Es entsteht eine Ausgangsspannung, deren Vorzeichen gerade die Flussrichtung anzeigt.

6.5.1.4 Daten kommerzieller Produkte

Daten Honeywell-Sensoren

Messbereich

- -1000 ... +1000 sccm* (Low Flow)
- 0 ... 20 SLPM* (High Flow)
- Auflösung: 0.01 ml/min

Genauigkeit / Fehler

- Genauigkeit: $\pm 2.5\%$ Reading ... 32% Reading
- Reproduzierbarkeit / Hysteres: $\pm 0.35\%$ Reading ... 1% Full Scale

Temperatur /Umgebung

- -25 ... 85 °C

Leitungsdruck	<ul style="list-style-type: none"> • 25 ...150 psi / 1.7 ... 10 bar
Reaktionszeit	<ul style="list-style-type: none"> • 1 ... 60 ms
Bauformen	<ul style="list-style-type: none"> • ca. 30 * 30 * 15 mm (Low Flow) • ca. 30 * 30 * 160 mm (High Flow)
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> • € 130 .. 200 (Einzelpreis)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • kleine Auflösung • kurze Reaktionszeiten • geringer Druckabfall • kleine Baugröße • hohe Reproduzierbarkeit
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • keine Messung in Druckleitungen • Linearität bei mittlerem bis größerem Durchfluss • Verträgt keine Flüssigkeiten (Kondenswasser)
Anwendungsbereiche	<ul style="list-style-type: none"> • Messung kleinster Druckabfälle und Gasströmen • Analyse: Gaschromatographie • Medizintechnik: z.B. Künstliche Beatmung • Meteorologie • Prozesskontrolle

* 1 SLPM (Standard Liter per Minute) = 1000 sccm (standard cubic centimeter per minute)

6.5.1.5 Quellen, Links

Literatur / Normen

[1] J.Niebuhr, G.Lindner; Physikalische Messtechnik mit Sensoren; ISBN 3-486-23614-8; 4. Auflage 1996

[2] Katalog: Honeywell, Environmental Condition Sensors, Sept. 98

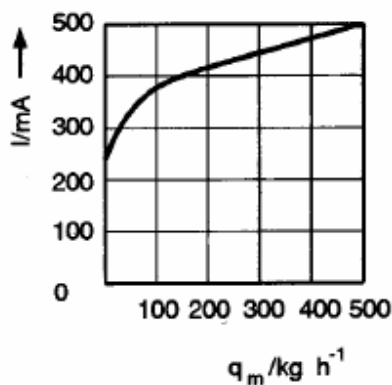
[3] Gehman, Murray, Speldrich; Reduced Package Size for Medical Flow Sensor; 2000, Honeywell

[4] H.-R. Tränkler, E. Obermeier; Sensortechnik; ISBN 3-540-58640-7; 1998

Hersteller / Distributoren

Firmen	Produkte	Links
Honeywell	Microbridge Mass Airflow Sensor (AWM-Serie)	http://www.honeywell.com/sensing
Leister	Durchfluss-Gassensor	http://www.leister.com
IST AG, Wattwil, CH	Durchfluss-Gassensor 0.01 bis 100m/s	Messbereich http://www.ist-ag.com

6.5.1.6 Ergänzungen



Beispiel zur Messbrücke (Abbildung 6): Die Temperatur des Gases beträgt $\vartheta_G=20^\circ\text{C}$. Der Widerstand $R_{0\vartheta}$ wird $1\text{k}\Omega$ gewählt und man möchte eine Temperaturdifferenz von $D\vartheta=200^\circ\text{C}$. Da nun $R_{0H}/R_{0\vartheta}=1/100$ angenommen wird, wird der Widerstand $R_{0H}=10\Omega$. Damit: $R_H=R_{0H}\cdot(1+a\cdot\vartheta_H) = 18.47\Omega$ und $R_\vartheta=R_{0\vartheta}\cdot(1+a\cdot\vartheta_G) = 1077\Omega$. ($a_{CU} = 3.85\cdot 10^{-3}$) R_1 und R_2 werden so gewählt, dass die Regelung mit hoher Empfindlichkeit arbeitet: $R_2\cdot R_H$ und $R_1\cdot R_\vartheta$.

In Luft mit $p=1\text{bar}$ ist ein Heizstrom $I_M=245\text{mA}$ erforderlich, damit im Ruhezustand ($q_m=0$) der Heizwiderstand $R_H=18.47\Omega$ beträgt und die Brücke abgeglichen ist (Abbildung 6). Bei $q_m=500\text{Kg/h}$ benötigt man dagegen $I_M=490\text{mA}$ um ebenfalls $R_H=18.47\Omega$ zu erreichen.

$$I = f(q_m) [1]$$

6.6 Vergleich der Eigenschaften der gebräuchlichsten Temperatursensortypen

Thermocouples	These are easily the most often used sensor. They are small, low cost, and relatively simple to use. They lend themselves to installation, where they cannot be removed after testing, or where they may be destroyed in testing. Thermocouples are very rugged and will withstand far more abuse than other sensor types. Electrically, the thermocouple acts as a low impedance source, allowing the measuring instrument to have a high impedance, thereby minimizing noise pickup on longer runs. Compared to other sensor types, thermocouples are relatively inaccurate and not as repeatable. Because of low-level output, non-linear e.m.f. versus temperature and the need for reference junction, the readout instrumentation is more complex than for other sensor types.
Platinum RTDs	RTDs (Resistance Temperature Detectors) are excellent but fragile sensors, offering a wide range (useful from -200 to $+660^{\circ}\text{C}$) and higher repeatability, stability, and accuracy than other sensors over this range. They are electrically superior to thermocouples because a higher e.m.f. output can be obtained, thereby producing higher sensitivity and better resolution. Because of the higher e.m.f. and no need for reference junction, the readout instrument is less complex and usually less expensive. Initial probe cost is high and care must be exercised in their application and use, and they must include a greater sensitive area. To obtain optimum accuracy, the probe and readout instrument must be calibrated as a system, thereby reducing probe interchangeability.
Thermistors	Thermistors are considerably more accurate than thermocouples from below the freezing point to just above the boiling point of water. They are highly accurate and may be selected to close interchangeability. Other advantages are relative low-cost and small size. The useful range limits the application for this sensor. Although satisfactory for industrial use, they are not as rugged as thermocouples.

Quelle: <http://www.instrulab.com/platrttd.htm>

Temperature Sensor Overview

Temperature Sensing Methods

There are two temperature sensing methods:

- Contact
- Non-contact

Contact sensing brings the sensor in physical contact with a substance or object. It can be used with solids, liquids or gases. Non-contact (infrared) temperature sensing reads temperature by intercepting a portion of the infrared energy emitted by an object or substance, and detecting its intensity. Non-contact is used to sense the temperature of solids and liquids. Non-contact cannot be used on gases due to their transparent nature.

Contact Temperature Sensor Types and Comparisons

Contact sensors, aside from capillary/bulb thermometers and bi-metal sensors, use varying voltage signals or resistance values.

Voltage Signals

Thermocouple sensors generate varying voltage signals. The different metal and alloy combinations in the thermocouple's legs produce a predictable voltage for a given temperature.

Resistance Values

Resistance temperature detectors (RTDs) generate varying resistance values. RTDs as a class are divided into two types:

- Resistance wire RTD
- Thermistor (thermally sensitive transistor)

RTDs work by producing a predictable resistance at a given temperature. Resistance wire RTDs (generally platinum) have a positive coefficient by increasing resistance with temperature increase. Thermistors are generally negative coefficient by decreasing resistance with temperature increase. Each of these three contact sensor types (RTDs, thermocouples, and thermistors) have advantages and disadvantages depending on application, desired response time and accuracy. A presentation of general benefits can help determine the most suitable contact sensor type.

Thermocouple Advantages

- Extremely high temperatures: Noble metal thermocouples may be rated as high as 1700°C (3100°F).
- Ruggedness: The thermocouples' inherent simplicity enables them to withstand shock and vibration.
- Small size/fast response: Thermocouples with exposed or grounded junctions offer nearly immediate response to temperature changes.

RTD Advantages

- Wide temperature range: Watlow platinum sensors cover temperatures from -200 to 650°C (-328 to 1200°F).
- Repeatability and stability: The platinum resistance RTD is the primary interpolation instrument used by the National Bureau of Standards from -260 to 630°C (-436 to 1135°F). Precision RTDs can be manufactured with stability of 0.0025°C per year. Industrial models typically drift less than 0.1°C per year.
- High output: The current drop across an RTD provides a much larger signal than thermocouple voltage

output.

- Linearity: Platinum and copper element RTDs follow a more linear curve than thermocouples or most thermistors.
- System wiring cost: Unlike a thermocouple, an RTD uses ordinary copper leads for extension wires and requires no cold junction compensation.
- Area sensing: Point measurements, while often desirable, may cause errors. An RTD element can be spread over a large area, improving control with area averaging, a technique impractical with thermocouples.

Thermistor Advantages

Due to wide performance and cost variations among thermistors, generalized advantages and disadvantages may not always apply. Common benefits include:

- Low sensor cost: Most thermistors in their basic form cost much less than RTDs. When assembled in protective sheaths the price difference narrows.
- High resistance: Base resistance may be several thousand ohms. This provides a larger signal change compared to resistance wire RTDs with the same measuring current, negating leadwire resistance problems.
- Interchangeability: Many newer thermistor models are trimmed to very tight tolerances over limited temperature ranges.
- Point sensing: Thermistor beads may be pinhead size for point sensing.

Contact Sensor Conclusions

- Thermocouples are best suited to high temperatures, environmental extremes, or applications requiring microscopic size sensors.
- RTDs are best for most industrial measurements over a wide temperature range, especially when sensor stability is essential for proper control.
- Thermistors are best for low cost applications over limited temperature ranges.

Non-Contact Sensors

A non-contact (infrared) sensor intercepts and converts emitted infrared heat into a voltage signal. Construction characteristics of non-contact sensors use a lens to concentrate radiated infrared energy onto a thermopile. The voltage signal produced by the thermopile is sent onto an electronics package for amplification and conditioning before being retransmitted as either a voltage or current signal. Non-contact temperature sensors generally react and register (respond) faster than contact temperature sensors.

Non-Contact Temperature Sensor Advantages

The reasons for using non-contact over contact temperature sensing are:

- When physical contact with the object or substance would deface or contaminate
- The process or object moves
- A process requires a faster response than is possible with a contact sensor
- Can be isolated from contaminated or explosive environments by viewing through a window

Contact vs. Non-contact Sensor Comparisons

Contact Temperature Sensors

Advantages

- Relatively rugged
- Economical
- Wide application range
- Relatively accurate
- Simple to apply

Disadvantages

- Requires physical contact, may damage, mar or contaminate
- Can cause wear on rotary components (slip rings)
- Slow to respond relative to non-contact sensing
- Acts as a heatsink, alters readings on small objects

Non-contact Temperature Sensors

Advantages

- Relatively rugged
- Remote mounting away from heat source
- Ideal for measuring objects in motion
- Does not interfere with process
- Faster response (milliseconds compared to seconds for contact sensing)
- Can sense temperature of irregular shaped objects
- Will not deface, mar or contaminate
- Will not act as a heatsink

Disadvantages

- Will not measure gas temperatures
- Emissivity variations
- Field-of-view (spot size) restrictions
- Ambient temperature restrictions
- Indicated temperature affected by environmental conditions (dust, smoke, etc.)

Quelle: http://www.anafaze.com/products/guides/sensor/sesg_ovr.cfm