

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

FRENZEL

GRUNDLAGEN DER BETRIEBSMESS- TECHNIK

4

TEMPERATURMESSUNG I

HERAUSGEBER
INGENIEURSCHULE FÜR
FEINWERKTECHNIK JENA

1004-04/62

Herausgeber:

Ingenieurschule für Feinwerktechnik
Jena

Grundlagen der Betriebsmeßtechnik

Lehrbrief 4

Temperaturmessung I

von

Klaus Frenzel

2. Auflage

1962

Zentralstelle für Fachschulausbildung
— **Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —**
Dresden

Inhaltsverzeichnis zu Teil I

	Seite
1. Grundsätzliches zur Temperaturmessung	1
1.1 Wärmeaustausch zwischen Prüfling und Thermometer	1
1.2 Die Einstellzeit eines Thermometers	3
1.3 Eine Eigenart der Temperaturmessung...	11
1.4 Zusammenfassung zum Abschnitt 1	13
2. Die Temperaturskalen	14
3. Meßmethoden und Meßgeräte	22
3.1 Ausdehnungsthermometer	23
3.11 Flüssigkeitsausdehnungsthermometer	23
3.12 Metallausdehnungsthermometer	31
3.2 Temperaturmessung durch Druckmessung	36
3.21 Flüssigkeitsdruckthermometer	36
3.211 Allgemeine Grundlagen	36
3.212 Technische Ausführung	42
3.213 Anzeigebereich und Anzeigegenauigkeit	46
3.22 Dampfspannungsthermometer	49
3.221 Allgemeine Grundlagen	49
3.222 Meßprinzip und gerätetechnischer Aufbau	51
3.3 Elektrische Temperaturmeßverfahren	55
3.31 Temperaturmessung mit Thermoelementen	56
3.311 Grundprinzip	56
3.312 Auswahl der Thermoschenkel	58
3.313 Die gebräuchlichsten Thermoelemente und ihre Grundwertreihen	65
3.314 Drahtstärken und Isolierung der Thermoschenkel	68

1. Grundsätzliches zur Temperaturmessung

Messen heißt vergleichen. Im Prinzip ist auch die Temperaturmessung ein solcher Vergleich, ein Vergleich der Temperatur des zu untersuchenden Körpers mit der Temperatur des Thermometers.

1.1 Wärmeaustausch zwischen Prüfling und Thermometer

Im allgemeinen wird die Temperatur des Thermometers eine andere als die des Prüflings sein. Bringen wir Thermometer und Prüfling miteinander in Berührung, so wird zwischen beiden infolge der Temperaturdifferenz ein Austausch an Wärmemenge so lange stattfinden, bis beide Körper im thermischen Gleichgewicht sind. Körper sind dann im thermischen Gleichgewicht, wenn jeder Körper in der Zeiteinheit die gleiche Wärmemenge (in Kalorien) aufnimmt, die er abgibt. Führt man einem Körper vom Gewicht $G \text{ kp}$, dessen spezifische Wärme $C \frac{\text{kcal}}{\text{kp}^\circ\text{C}}$ ist, die Wärmemenge von $Q \text{ kcal}$ zu, so erhöht sich seine Temperatur von $t_1 \text{ grd C}$ auf $t_2 \text{ grd C}$, also um $\Delta t \text{ grd C}$. Dasselbe gilt im umgedrehten Sinne für Wärmeentzug. Dieser Sachverhalt wird durch die Formel

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta t \text{ kcal} \quad (1)$$

ausgedrückt. Im Falle des thermischen Gleichgewichtes ändert sich der Wärmeinhalt der Körper nicht, ihre Temperaturen sind constant. Dies gilt sowohl für Wärmeübertragung durch Leitung als auch durch Strahlung. Das Produkt $G \cdot c = \frac{Q}{\Delta t}$ ist die Wärmekapazität C , diejenige Wärmemenge, die notwendig ist, um einen Körper vom Gewicht G und der spezifischen Wärme c um 1°C zu erwärmen. Setzt man nämlich in (1) $\Delta t = 1^\circ \text{C}$, so wird $Q = G \cdot c = C$. Bei den meisten Temperaturmessmethoden erfolgt der Wärmeaustausch zwischen Meßfühler und Prüfling bei direkter Berührung durch Wärme-

leitung. Zur Erklärung dieses Vorgangs benötigen wir
Bild 1. Im Augenblick des Beginns der Messung habe der

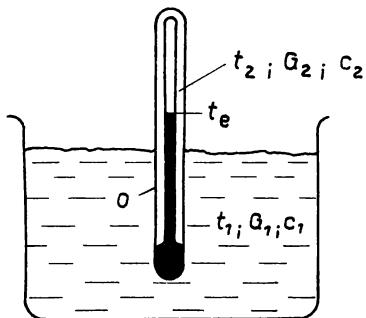


Bild 1

Prüfling mit der Wärmekapazität $G_1 \cdot c_1 = C_1$ die Temperatur t_1 , das Thermometer mit der Wärmekapazität $G_2 \cdot c_2 = C_2$ die Temperatur t_2 . Es soll $t_1 > t_2$ sein. Als Folge dieser Temperaturdifferenz zwischen Prüfling und Thermometer tritt Wärmeenergie durch die gemeinsame Berührungsfläche 0 vom Medium zum Meßgerät über und zwar so lange, bis der Temperaturunterschied $t_1 - t_2$ gleich Null ist.

Beide Körper haben dann die gleiche Temperatur t_e und der Meßvorgang ist beendet. Für die Endtemperatur t_e gilt:

$t_1 \geq t_e \geq t_2$. Die Temperatur des Prüflings hat sich um $\Delta t_1 = t_1 - t_e$ erniedrigt, weil er die Wärmemenge $Q = C_1 \cdot \Delta t_1$ an das Thermometer abgegeben hat. Dessen Temperatur hat sich um $\Delta t_2 = t_e - t_2$ erhöht, weil

$$Q = C_2 \cdot \Delta t_2$$

Da nun vom Prüfling abgegebene Wärmemenge
= vom Thermometer aufgenommene Wärmemenge
ist, gilt:

$$C_1 \cdot \Delta t_1 = C_2 \cdot \Delta t_2$$

Die Temperaturänderung des Prüflings ist dann:

$$t_1 - t_e = \Delta t_1 = \frac{C_2}{C_1} \cdot \Delta t_2 \quad (2)$$

Aus der Beziehung (2) müssen wir für die Temperaturmessung wichtige Schlußfolgerungen ziehen:

t_1 ist die Temperatur des Prüflings, die durch die Messung bestimmt werden soll. Nach Beendigung des Wärmeabtauschs zeigt das Thermometer die Temperatur t_e an. Die Messung ist um $\Delta t_1 = t_1 - t_e$ falsch. Aus (2) geht hervor, daß der Fehler Δt_1 umso größer wird, je größer die Wärmekapazität $C_2 = G_2 \cdot c_2$ des Thermometers im Vergleich zu der des Prüflings und je größer die Abweichung der Fühlertemperatur von der des Prüflings zu Beginn der Messung ist. Die gesuchte Temperatur t_1 des Prüflings kann ermittelt werden nach der Formel:

$$t_1 = t_e + \frac{C_2}{C_1} \cdot (t_e - t_2)$$

wobei t_2 die vom Thermometer bei Beginn und t_e die vom Thermometer nach Ablauf des Wärmeaustausches angezeigte Temperatur ist.

Fassen wir zusammen:

Jeder Meßfühler stört das thermische Gleichgewicht des Prüflings. Der dadurch entstehende Meßfehler kann vernachlässigbar klein werden, wenn die Wärmekapazität des Meßführers möglichst klein gemacht und seine Anfangstemperatur möglichst in die Nähe der zu erwartenden Temperaturanzeige gebracht wird.

1.2 Die Einstellzeit eines Thermometers

Wir sprachen vom Vorgang des Wärmeaustausches zwischen Thermometer und Prüfling. Uns interessiert nun der zeitliche Verlauf des Vorganges, besonders:

nach welcher Zeit t_e ist er beendet, wann kann man am Thermometer ablesen?

Für die folgenden Betrachtungen soll wieder Bild 1 dienen.

Die in der Zeit dz durch die gemeinsame Berührungsfläche O fließende Wärmemenge dQ wollen wir als "Wärmestromstärke" $\frac{dQ}{dz} = q$ bezeichnen. Dieser Wärmestrom hängt in seiner Größe und Richtung von der Differenz zwischen der Temperatur t_1 des Prüflings und der augenblicklichen Temperatur t_a des Thermometers ab. Die Stromstärke wird ferner der Größe der Berührungsfläche O proportional sein. Es gilt also die Beziehung:

$$\frac{dQ}{dz} = q = \alpha \cdot O (t_1 - t_a) \quad (3)$$

Der Proportionalitätsfaktor α ist die sog. "Wärmeübergangszahl". Sie gibt an, wieviel kcal in 1 sec bei einer Temperaturdifferenz von $1^\circ C$ durch den cm^2 der Grenzfläche O fließen. Die Wärmeübergangszahl hat also die Dimension $kcal \cdot sec^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot C^{-1}$ und ist ein Maß für die Güte der Wärmeleitung. Gleichung (3) lässt sich auch in der Form

$$q = \alpha \cdot O (x_1 - x_2) \quad (4)$$

schreiben, wobei $x_1 = t_1 - t_2$ die größte auftretende Temperaturdifferenz zwischen Prüfling und Thermometer und $x_2 = t_a - t_2$ die Temperaturzunahme des Thermometers bezogen auf seine Anfangstemperatur t_2 ist.

Es sei nun $\frac{dx_2}{dz}$ die Anzeigegeschwindigkeit, die umso größer wird, je größer der Wärmestrom q ist und umso kleiner, je größer die Kapazität $C = G \cdot c$ ist, die vom Strom q gefüllt werden muß:

$$\frac{dx_2}{dz} = \frac{q}{C}$$

Den Wert für q aus (4) eingesetzt ergibt:

$$\frac{dx_2}{dz} = \frac{\alpha \cdot O}{G \cdot c} \cdot (x_1 - x_2) \quad \text{oder}$$

$$\frac{G \cdot c}{\alpha \cdot 0} \cdot \frac{dx_2}{dz} + x_2 = x_1 \quad (5)$$

Die Differentialgleichung (5) beschreibt den Verlauf der Thermometeranzeige t_a in Abhängigkeit von der Zeit z . Da beim Eintauchen in das zu messende Medium das Thermometer schlagartig der Temperaturdifferenz $x_1 = t_1 - t_2$ ausgesetzt wird, können wir x_1 als zeitliche Sprungfunktion auffassen (Bild 2).

Nehmen Sie jetzt bitte Ihren Lehrbrief "Höhere Mathematik für Regelungsingenieure" zur Hand und kontrollieren den Gang der Lösung unserer Differentialgleichung. Es handelt sich hier um eine inhomogene Dgl. erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten:

$$T x_2' + x_2 = x_1 \quad \text{mit} \quad T = \frac{G \cdot c}{\alpha \cdot 0}$$

Die homogene Dgl. lautet

$$T x_2' + x_2 = 0.$$

Ihre Lösung ist der bekannte e-Ansatz

$$x_2 = C \cdot e^{-\frac{z}{T}}; \quad x_2' = \left(\frac{dC}{dz} - \frac{C}{T} \right) \cdot e^{-\frac{z}{T}}$$

Die Lösung der homogenen Dgl. ist eine partikuläre Lösung der inhomogenen. Die partikuläre Lösung in die inhomogene Dgl. eingesetzt, ergibt:

$$T \left(\frac{dC}{dz} - \frac{C}{T} \right) \cdot e^{-\frac{z}{T}} + C \cdot e^{-\frac{z}{T}} = x_1$$

$$\frac{dC}{dz} = \frac{x_1}{T} \cdot e^{\frac{z}{T}} + \frac{C}{T}$$

Nach Trennung der Variablen

$$dC = \frac{x_1}{T} \cdot e^{\frac{z}{T}} \cdot dz$$

und Integration erhalten wir für die Constante C den Ausdruck

$$C = x_1 \cdot e^{\frac{z}{T}} + k$$

k = Integrationskonstante.

Diese Lösung ist nur berechtigt, wenn x_1 konstant, d.h. eine Sprungfunktion ist (Bild 2).

Mit unserer aus der inhomogenen Dgl gewonnenen Konstanten C gehen wir in die partikuläre Lösung und erhalten somit die allgemeine Lösung:

$$x_2 = (x_1 e^{\frac{z}{T}} + k) e^{-\frac{z}{T}}$$

oder

$$x_2 = x_1 + k e^{-\frac{z}{T}}$$

Mit Hilfe der Anfangsbedingung bestimmen wir die Integrationskonstante k.

Zur Zeit $z = 0$ ist die Temperaturdifferenz zwischen Prüfling und Thermometer am größten, also $t_1 - t_2 = x_1$, die angezeigte Temperatur $t_a = t_2$, also $x_2 = t_2 - t_2 = 0$!
Setzen wir diese Werte in die allgemeine Lösung ein, so erhalten wir

$$0 = x_1 + k \cdot 1 \quad (\text{denn } e^0 = 1)$$

$$\therefore x_1 = k$$

Die Differentialgleichung (5) hat damit die Lösung

$$x_2 = x_1 - x_1 e^{-\frac{z}{T}}$$

oder

$$x_2 = x_1 \left(1 - e^{-\frac{z}{T}}\right) \quad (6)$$

Für x_2 und x_1 , werden die entsprechenden Werte und $T = \frac{G \cdot c}{\alpha \cdot 0}$ eingesetzt.

$$t_a - t_2 = (t_1 - t_2) \left[1 - e^{-\frac{\alpha \cdot 0}{G \cdot c} \cdot z}\right] \quad (7)$$

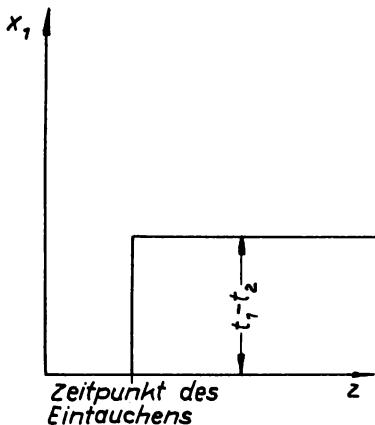


Bild 2

Im Bild 3 ist Gleichung (7), $t_a = f(z)$, dargestellt.

Zur Zeit $z = 0$, also zu Beginn des Wärmeaustausches zwischen Fühler und Prüfling ist der Wert der e-Funktion in (7) gleich eins und damit:

$$t_a - t_2 = 0 \quad \text{oder} \quad t_a = t_2$$

Wieviel Zeit vergeht nun, bis die vom Thermometer angezeigte Temperatur t_a

gleich der Temperatur t_1 des Prüflings geworden ist? Lassen wir in (7) $z \rightarrow \infty$ gehen, dann strebt der Wert

$$e^{-\frac{\alpha \cdot 0}{G \cdot c} \cdot z} \rightarrow 0$$

Gleichung (7) geht dann über in die Form:

$$t_a - t_2 = t_1 - t_2$$

oder

$$\underline{t_a = t_1}$$

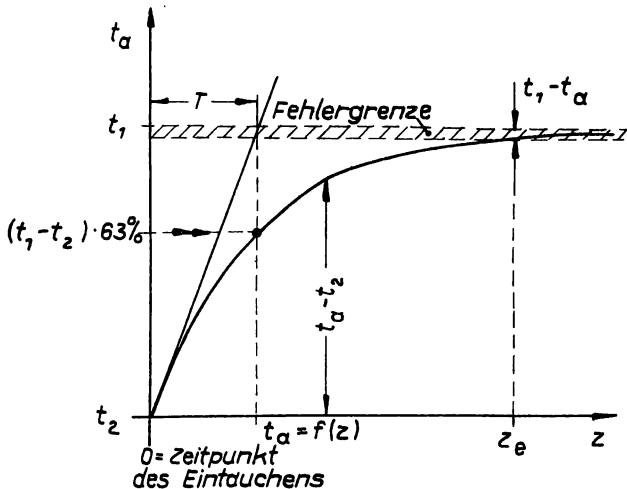


Bild 3

Die Thermometeranzeige t_a nähert sich asymptotisch der zu messenden Temperatur t_1 . Diese Tatsache verleitet zu dem Schluß, daß eine genaue Temperaturmessung durch Wärmeübertragung unmöglich ist, da die Temperatur des Frühlings nach unendlich langer Zeit erreicht wird. In der Praxis kann der Wärmeübertragungsvorgang und damit die Messung als abgeschlossen gelten, wenn die Temperaturdifferenz $t_1 - t_a$ die Fehlergrenze des Anzeigegerätes erreicht hat. Das ist durchaus bei endlich großen Einstellzeiten z_e der Fall (Bild 3 und 4). Neben der Größe der Fehlergrenze ist der mehr oder weniger steile Verlauf der Übergangsfunktion $t_a = f(z)$ (Gleichung (7)) für die Größe der Einstellzeit bestimmd. Große Steigung bedeutet kleine Einstellzeit (Bild 4).

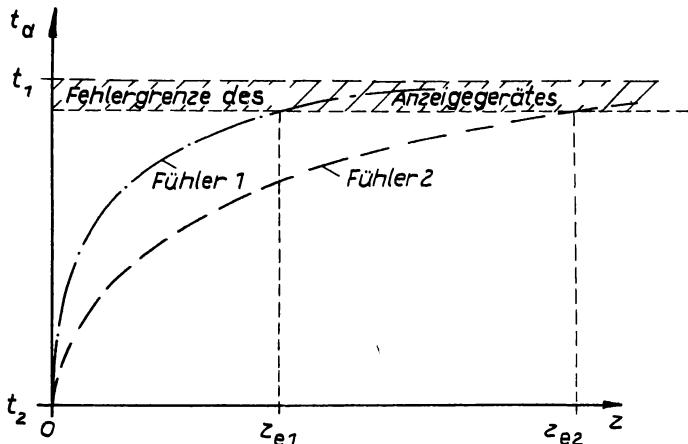


Bild 4

Die Steigung der Kurve $t_a = f(z)$ ist:

$$\frac{d(t_a - t_2)}{dz} = (t_1 - t_2) \cdot \frac{\alpha \cdot 0}{G \cdot c} \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot 0}{G \cdot c} z} \quad (8)$$

Um möglichst kurze Einstellzeiten zu bekommen, müssen nach Gleichung (8) wärmeübertragende Oberfläche 0 und Wärmeübertragungszahl α möglichst groß, das Gewicht G und die spezifische Wärme c des Meßfühlers möglichst klein gehalten werden, besonders, wenn rasch veränderliche Temperaturen gemessen werden sollen.

Bei Präzisionsmessungen muß die Temperatur t_1 genau ermittelt werden. Man kann sie aus der Gleichung (7) errechnen

$$(7) \quad t_a - t_2 = (t_1 - t_2)(1 - e^{-\frac{z}{T}}) \quad \text{mit } \frac{G \cdot c}{\alpha \cdot 0} = T$$

nach t_1 aufgelöst:

$$t_1 = \frac{t_a - t_2 e^{-\frac{z}{T}}}{1 - e^{-\frac{z}{T}}} \quad (7a)$$

In Gleichung (7a) ist t_1 die gesuchte wirkliche Temperatur, die erst nach unendlich langer Zeit angezeigt wird. t_2 ist die vom Thermometer zu Beginn des Eintauchens angezeigte Temperatur. t_a ist eine beliebige, zum Zeitpunkt z angezeigte Temperatur. Bei der Rechnung ist darauf zu achten, daß in die Formel (7a) nur zusammengehörige Werte von t_a und z eingesetzt werden. Zur Berechnung von t_1 fehlt nur noch der Wert der Konstanten T . In der Differentialgleichung (5) hat das Glied $\frac{dx^2}{dz}$ die Dimension $\frac{\text{grd}}{\text{sec}}$, alle anderen Glieder die Dimensionen grd. Da man nur Größen gleicher Dimensionen addieren kann, muß der Faktor $\frac{G.c}{\alpha \cdot 0} = T$ von $\frac{dx^2}{dz}$ die Dimension einer Zeit haben. T ist eine Zeit, die sogenannte Übergangszeit des Fühlers.

Setzen wir in der Gleichung (7) $z = T$, so erhalten wir:

$$t_a - t_2 = (t_1 - t_2)(1 - e^{-\frac{T}{T}}) = (t_1 - t_2)(1 - \frac{1}{e})$$

Nun ist $\frac{1}{e} = 0,37$ und damit

$$t_a - t_2 = (t_1 - t_2)(1 - 0,37)$$

$$t_a - t_2 = (t_1 - t_2) \cdot 0,63$$

Die Übergangszeit T ist die Zeit, die der Fühler braucht, um die Anzeige um 63 % der Differenz $t_1 - t_2$ ansteigen zu lassen (bzw. fallen zu lassen, wenn $t_1 < t_2$). Sie kann experimentell gut bestimmt werden. Man setzt den Fühler, der die Temperatur t_2 anzeigt, plötzlich einer bekannten Temperatur t_1 aus, indem man ihn z.B. in siedendes Wasser eintaucht. ($t_1 = 100^\circ \text{C}$). Nun wird der zeitliche Verlauf von t_a aufgenommen. Das geschieht mit einer Stoppuhr oder einem Schreibgerät, bei schnellanzeigenden elektrischen

Thermometern mit einem Schleifenoszillographen. An der Stelle, wo die Kurve $t_a = f(z)$ den Wert 63 % von $t_1 - t_2$ erreicht (z.B. 63°C), schneidet das Lot durch diesen Kurvenpunkt auf die Zeitachse dort die Übergangszeit T ab (Bild 3).

Somit kann T einmalig bestimmt werden. Der Berechnung von t_1 steht nichts mehr im Wege.

Rechnen Sie hierzu folgende Übungsaufgabe:

Ein Thermometer zeige als Anfangstemperatur 18°C an.

Sodann wird es in das zu messende Medium eingetaucht und zeigt nach $z = 35$ sec eine Temperatur von 125°C an!

Zur Bestimmung der Übergangszeit wurde das Thermometer, mit der Anfangstemperatur $t_2 = 20^\circ\text{C}$ in siedendes Wasser getaucht, in Abhängigkeit von der Zeit folgende Temperaturen anzeigen:

z	sec	0	4	10	15	18	22	25	30	40	80
t_a	$^\circ\text{C}$	20	34,4	51,2	62,5	67,0	73,6	77,0	82,0	88,5	98,5

Die Übergangszeit kann aus der anhand der Tabelle gezeichneten Kurve $t_a = f(z)$ graphisch oder rechnerisch durch Interpolation in der gegebenen Tabelle bestimmt werden. Wenn Sie richtig gerechnet haben erhalten Sie $T = 20$ sec und $t_1 = 147,5^\circ\text{C}$.

1.3 Eine Eigenart der Temperaturmessung ergibt sich aus der Tatsache, daß sich die Thermometeranzeige asymptotisch der zu messenden Temperatur nähert. Allgemein wird von einem Anzeigegerät gefordert, daß der Einstellvorgang eine gedämpfte Schwingung ist. Der Zeiger pendelt um die Gleichgewichtslage von Richtkraft und Gegenkraft des Meßwerkes, wobei unter anderem die Reibungskraft R die Dämpfung bewirkt. Die Schwingungsenergie wird nach einer bestimmten Zeit so weit abgenommen haben, daß die Reibungskraft nicht mehr überwunden werden kann und der Zeiger unkontrollierbar

oberhalb der Gleichgewichtslage stecken bleibt (Bild 5). Durch Mittelwertbildung aus einer möglichst großen Anzahl von Messungen kann der wirkliche Meßwert beliebig genau angenähert werden, da die Häufigkeit der positiven und negativen Fehler bei genügend großer Anzahl von Messungen etwa gleich ist. Bei der Temperaturmessung liegen die Verhältnisse völlig anders. Die Anzeige nähert sich nur von einer Seite dem Meßwert. So treten bei fallender Anzeige nur positive, bei steigender Anzeige nur

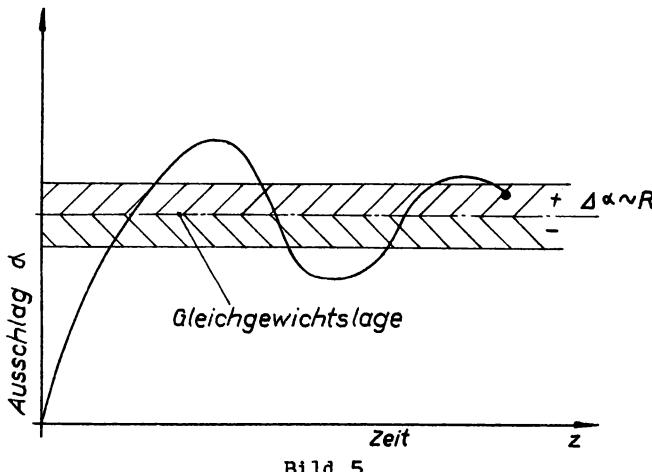


Bild 5

negative Meßfehler auf (Bild 6). Die Möglichkeit der beliebig genauen Annäherung des wahren Meßwertes durch Mittelwertbildung entfällt bei der Temperaturmessung wegen der asymptotischen Annäherung der Anzeige an den Istwert. Diese Eigenart der Temperaturmessung wirkt sich sehr ungünstig auf die Meßgenauigkeit aus.

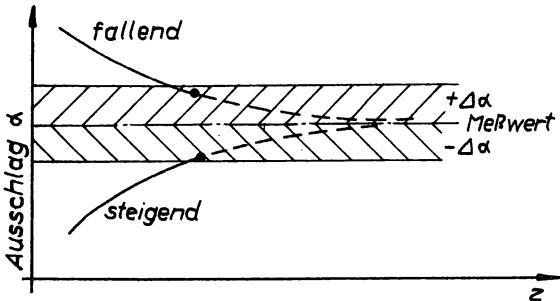


Bild 6

1.4 Zusammenfassung zum Abschnitt 1

Im Abschnitt 1. "Grundsätzliches zur Temperaturmessung" haben wir den Vorgang der Wärmeübertragung zwischen Thermometer und Prüfling kennengelernt. Es ergab sich hierbei:

1. Jeder Temperaturfühler stört durch seine Wärmekapazität die Temperatur des Prüflings und ruft Meßfehler hervor.
2. Um diese Meßfehler klein zu halten, muß die Wärmekapazität des Fühlers klein sein.
3. Die Einstellzeit eines Temperaturmeßgerätes ist theoretisch unendlich groß.
4. In der Praxis treten wegen begrenzter Anzeigegenauigkeit der Meßgeräte endlich große Einstellzeiten auf, die durch die Gerätekonstanten Θ , G und c schon bei der Konstruktion des Temperaturfühlers beeinflußt werden können.
5. Bei der Temperaturmessung ist es nicht möglich, durch Mittelwertbildung aus Meßreihen Fehlereinflüsse zu beseitigen.

2. Die Temperaturskalen

Durch das Temperaturempfinden, das seinen Sitz hauptsächlich in der Oberfläche der Haut hat, ist uns der Temperaturbegriff qualitativ gegeben. Diese Empfindung gestattet es uns, Körper verschiedener Temperaturen in eine Folge einzuzuordnen, bei der jeder folgende Körper eine höhere Temperatur als der vorangehende hat. Diesem Empfinden ist es auch zuzuschreiben, daß die Temperatur als vierte Grundgröße in das technische und auch in das physikalische Maßsystem aufgenommen wurde, obwohl sich die Temperatur durch die mechanische Wärmetheorie in den drei Grundgrößen der Maßsysteme ausdrücken läßt. Der Temperaturbegriff ist uns also in qualitativer Hinsicht durch das Wärmeempfinden gegeben. Quantitativ dagegen, für maßtechnische Zwecke, muß eine Maßeinheit definiert werden und eine Temperaturskala, die vom menschlichen Temperaturempfinden unabhängig ist, die den sehr engen Bereich der Temperaturempfindung nach oben und unten erweitert. Für die Temperatur existiert nun kein natürliches Maß wie für die Länge, das Gewicht und die Zeit. Die Temperaturmessung muß sich auf die Beobachtung physikalischer Größen stützen, die von der Temperatur eindeutig nach bestimmten Gesetzen abhängen.

Die Temperaturskala kann ganz willkürlich festgelegt werden. Celsius hat nun zwei zu jeder Zeit und einfach feststellbare Temperaturen als Fix- oder Festpunkte der Temperaturskala, der Celsiusskala, gewählt:

1. Die Temperatur des bei 760 Torr schmelzenden Eises;
2. die Temperatur des bei gleichem Druck siedenden Wassers.

Der Eispunkt des Wassers wird mit 0 grd C, der Siedepunkt des Wassers wird mit 100 grd C bezeichnet. Um aus diesen beiden Fixpunkten eine Skala werden zu lassen, um zwischen diesen beiden Temperaturen Zwischenwerte einschalten zu können (der Fachmann spricht hierbei von

"interpolieren"), wollen wir zunächst die Eigenschaften von Flüssigkeiten benutzen, ihr Volumen mit der Temperatur zu ändern.

Ein kugeliger Glaskörper, an den eine enge, genau kalibrierte Glaskapillare angesetzt ist, wird mit Quecksilber gefüllt. Man stellt ihn nacheinander in ein Gefäß mit schmelzendem Eis und mit siedendem Wasser und markiert die Lage des Quecksilbermaniskus (Bild 7a und b). Diese Markierungen entsprechen den Temperaturen 0 grd C und 100 grd C. Teilt man das so gewonnene Intervall in 100 gleiche Teile, so entspricht der Abstand von einem Teilstrich zum nächsten der Temperatureinheit: Ein Grad Celsius = 1 grd C. Die so gewonnene Temperaturskala kann nun zu höheren und tieferen Temperaturen mit gleicher Skalenteilung erweitert oder extrapoliert werden. Temperaturen unter 0 grd C sind negativ Temperaturen.

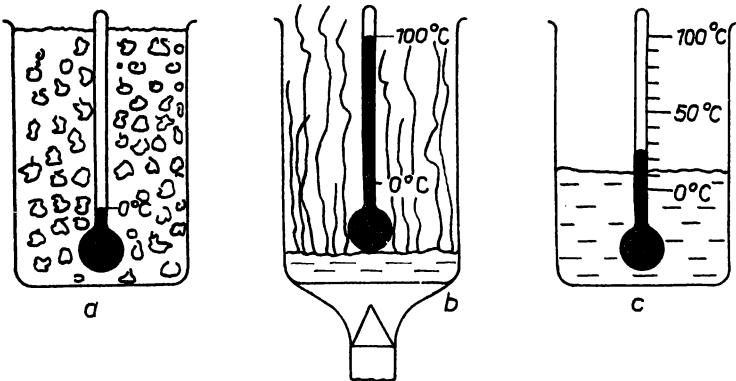


Bild 7

Es zeigt sich aber, daß die verschiedenen Flüssigkeiten auch verschiedenes Ausdehnungsverhalten zeigen. Nicht nur, daß die Ausdehnungskoeffizienten verschieden groß sind, sie ändern sich mit der Temperatur unterschiedlich stark. Das heißt: Unsere Temperaturskala ist von den ther-

mischen Eigenschaften der Füllflüssigkeiten abhängig. So weichen zum Beispiel die Werte einer mit Alkohol und einer mit Hg hergestellten Skala bei 50° C um mehrere Zehntelgrad voneinander ab, obwohl die Flüssigkeitsstände bei 0 grd C und 100 grd C genau übereinstimmend gemacht wurden. Flüssigkeiten eignen sich nicht zur Darstellung der Temperaturskala.

Wesentlich günstigere Eigenschaften zeigen die Gase. Das Gay-Lussacsche Gesetz für ideale Gase

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273,16} \text{ grd } t \right) \quad (9)$$

oder

$$V_t - V_0 = \frac{V_0}{273,16} t$$

auch

$$\frac{dV_t}{dt} = \frac{V_0}{273,16}$$

bei konstantem Druck besagt, daß sich das Volumen eines jeden idealen Gases, bei einer Temperaturänderung von $dt = 1$ grd C, um $\frac{1}{273,16}$ seines Volumens V_0 bei 0 grd C. ändert.

Die Temperatureinheit 1 grd C ist damit als Volumenausdehnung eines idealen Gases um $\frac{1}{273,16}$ seines Nullgradvolumens exakt definiert.

Die aus dieser Definition der Maßeinheit hervorgehende Temperaturskala wird die "Thermodynamische Temperaturskala" genannt. Die Temperaturmessung ist somit auf eine Volumenmessung idealer Gase zurückgeführt. Gleichung (9) läßt sich auch in der Form

$$V_t = V_0 \left(\frac{273,16 + t}{273,16} \right) \quad (10)$$

schreiben.

Setzt man in (10) $t = -273,16$ grd C, so wird $V_t = 0$. Der absolute Nullpunkt der Temperaturskala liegt bei $t = -273,16$ grd C, denn negative Volumina sind undenkbare. Im Bild 8 ist die Gleichung (9) bzw. (10) graphisch dargestellt. Wird in (10) $t + 273,16 = T$ gesetzt

$$V_T = V_0 \frac{T}{273,16}$$

so entspricht das im Bild 8 einer Versetzung der Volumen-

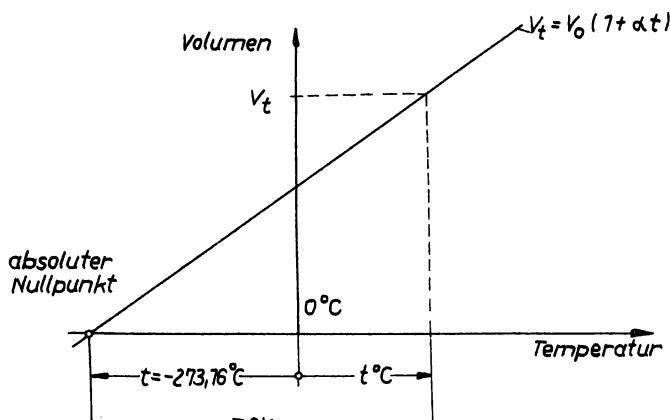


Bild 8

achse in den absoluten Nullpunkt der Temperaturskala. Die Temperatur T wird also ab absolutem Nullpunkt gezählt und wird daher mit "absolute Temperatur" bezeichnet. Sie wird in Grad Kelvin [grd K] gemessen.

Der Nullpunkt der Kelvinskala ist gegen den der Celsius-skala um 273,16 grd zu tieferen Temperaturen verschoben. Beide Skalen benutzen die gleiche Maßeinheit:

$$1 \text{ grd C} = 1 \text{ grd K}$$

Nach dem Gesetz über die Temperaturskala vom 7.8.1924 liegt allen Temperaturmessungen die thermodynamische Temperaturskala zugrunde mit der Maßgabe, daß der Eispunkt und der Siede-

punkt des Wassers mit 0 grd C bzw. mit 100 grd C zu bezeichnen sind.

Die nur rein theoretisch definierte thermodynamische Temperaturskala wird realisiert durch ein mit Wasserstoff (H_2) oder Helium (H_e) gefülltes Gasthermometer. Der kubische Ausdehnungskoeffizient für H_2 und H_e ist

$$0,00366 \text{ grd}^{-1} = \frac{1}{273,16 \text{ grd}}$$

Der Umgang mit solchen Gasthermometern¹⁾ erfordert einen umfangreichen Aufwand an Aufbau, Bedienung und Berechnung, daß einwandfreie Messungen nur in besonders dafür ausgerüsteten Laboratorien möglich sind. Man führte daher 1948 eine internationale Gebrauchsskala, kurz: "Internationale Temperaturskala 1948", ein. Sie beruht auf einer Anzahl von Fixpunkten, denen auf Grund der thermodynamischen Skala bestimmte Temperaturen zugeordnet sind, sowie auf der Angabe von Interpolationsinstrumenten, die nach bestimmten Vorschriften bei den Fixpunkten geeicht werden. Die Fixpunkte sind so gewählt, daß sie ohne größeren Aufwand hergestellt werden können. Die Interpolationsinstrumente dienen zum Einschalten beliebiger Temperaturen zwischen den Fixtemperaturen.

Tabelle 1

Gesetzliche Temperaturfixpunkte

Art des Fixpunktes	zugeordnete Temperatur in grd C
Siedepunkt des Sauerstoffes (Sauerstoffpunkt)	-182,970
Schmelzpunkt des Eises (Eispunkt)	0,000
Siedepunkt des Wassers (Wasserdampfpunkt)	100,000
Siedepunkt des Schwefels (Schwefelpunkt)	444,600
Erstarrungspunkt des Silbers (Silberpunkt)	960,800
Erstarrungspunkt des Goldes (Goldpunkt)	1063,000

1) S.Kohlrausch, Prakt.Phys., Bd. I, S.156, Abb. 77

Die Tabelle 1 enthält die gesetzlich festgelegten Temperaturfixpunkte für einen Atmosphärendruck von 760 Torr (Quecksilbersäule). Außerdem sind noch eine Reihe sekundärer Fixpunkten festgelegt worden, deren wichtigste in Tabelle 2 enthalten sind

Tabelle 2

Art des Fixpunktes		zugeordnete Temperatur in grd C
Siedepunkt Naphthalin		218,0
Erstarrungspunkt Zinn		231,8
" Kadmium		321,0
" Zink		419,45
" Antimon		630,5
Schmelzpunkt Platin		1773,0
" Wolfram		3380,0

Der gesamte Bereich der Temperaturskala kann nicht von einem Interpolationsinstrument erfaßt werden. Man teilt die Skala in vier aneinander grenzende Bereiche ein und legt dafür folgende Interpolationsmethoden fest:

1. Bereich

Er umfaßt die Temperaturen zwischen dem Eispunkt = 0 grd C und dem Antimonpunkt = 630,5 grd C. Als Interpolationsinstrument dient ein Platinwiderstandsthermometer, dessen Widerstand R_t nach folgender Beziehung von der Temperatur t abhängt:

$$R_t = R_0 (1 + A \cdot t + B \cdot t^2) \quad (11)$$

Der Widerstand R_t wird mit einer Meßeinrichtung (z.B. Wheatstonesche Brücke) bestimmt, R_0 ; A und B sind Konstanten, die durch Eichung an den Fixpunkten ermittelt werden. Im Bereich 1 liegen 3 Fixpunkte, der Eispunkt,

der Wasserdampfpunkt und der Schwefelpunkt, deren Temperaturen bereits festliegen. Durch Eintauchen des Platinwiderstandes in schmelzendes Eis mit $t = 0$ grd C wird nach (11) $R_t = R_0$. Die erste Konstante ist bereits bestimmt. Taucht man den Platinwiderstand nun nacheinander in siedendes Wasser mit $t = 100$ grd C und siedenden Schwefel mit $t = 444,6$ grd C, so erhält man aus (11) die beiden Gleichungen

$$R_{100} = R_0(1 + A \cdot 100 + B \cdot 100^2)$$

und

$$R_{444,6} = R_0(1 + A \cdot 444,6 + B \cdot 444,6^2)$$

aus denen A und B bestimmt werden können. Sind die Konstante R_0 , A und B für ein bestimmtes Widerstandsthermometer ermittelt, so kann nach (11) zu jedem gemessenen R_t die zugehörige Temperatur errechnet werden. Die Beschaffenheit des Platindrahtes muß so sein, daß $R_{100}/R_0 = 1,3910$ ist.

2. Bereich

Er umfaßt die Temperaturen zwischen dem Sauerstoffpunkt $t = -182,97$ grd C und dem Eispunkt. Die Interpolation erfolgt wieder mit einem Platinwiderstandsthermometer nach der Gleichung

$$R_t = R_0 \cdot 1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C(t - 100) \cdot t^3$$

R_0 , A und B sind wie unter 1. zu bestimmen, die Konstante C wird durch Eichung am Sauerstoffpunkt ermittelt.

3. Bereich

Er umfaßt die Temperaturen zwischen dem Antimonpunkt $t = 630,5$ grd C und dem Goldpunkt $t = 1063$ grd C. In diesem Bereich wird mit einem Thermoelement aus Platinrhodium - Platin interpoliert, dessen Thermoelektrische Kraft von der Temperatur t nach folgender Formel abhängt:

$$e = a + bt + ct^2$$

a, b und c sind wieder Apparatekonstante, die durch Anschluß an die Fixpunkte: Antimonpunkt, Silberpunkt und Goldpunkt nach der gleichen Methode wie unter 1. bestimmt werden. Die Vergleichsstellentemperatur des Thermoelementes ist auf 0 grd C festgelegt; ebenso gelten Vorschriften in bezug auf die Reinheit des Thermoschenkelmaterials.

4. Bereich

Er faßt alle Temperaturen oberhalb des Goldpunktes. Als Interpolationsgert dient ein Strahlungspyrometer, ein Gerät, welches die vom zu prüfenden Körper ausgesandte Wärmestrahlung zur Messung benutzt. Als Vergleichsenergien werden die Strahlungsenergien des schwarzen Körpers herangezogen.

Über die Temperaturnmessung mit Widerstandsthermometern, Thermoelementen und Strahlungspyrometern erfahren wir in den folgenden Abschnitten mehr.

Genauere Angaben über die praktische Temperaturskala und ihre Interpolationsmethoden, sowie Literaturhinweise finden Sie bei: Kohlrausch, Praktische Physik, Bd. I und in DIN 1953. (VDI-Temperaturmeßregeln, 3. Auflage).

3. Meßmethoden und Meßgeräte

Zwischen einer großen Anzahl physikalischer Größen und der Temperatur besteht ein gesetzmäßiger Zusammenhang. So sind z.B. die Länge eines Metallstabes, das Volumen und der Druck einer Flüssigkeit, der Druck eines Gases oder eines Dampfes, der elektrische Widerstand eines Metalldrahtes, die von einem Körper ausgesandte Licht- und Wärmestrahlung von der Temperatur abhängig. Man kann daher aus der Messung dieser Größen, die sich eindeutig mit der Temperatur ändern, auf die Temperatur schließen. Geräte, deren Anzeige direkt die Temperatur abzulesen gestatten, heißen Thermometer. Daneben ist für Meßgeräte sehr hoher Temperaturen die Bezeichnung "Pyrometer" gebräuchlich.

Man teilt die Thermometer in zwei große Gruppen ein:

1. Der Wärmeaustausch zwischen Temperaturfühler und dem zu untersuchenden Stoff geschieht durch Wärmeleitung bei Berührung. Solche Thermometer heißen Berührungsthermometer
2. Die Wärmevermittlung zwischen Temperaturfühler und Prüfling geschieht durch Wärme- und Lichtstrahlen. Eine Berührung zwischen Meßfühler und Prüfling erfolgt nicht. Selbst das Vorhandensein eines "strahlungsvermittelnden" Mediums ist nicht erforderlich, da die Wärme- und die Lichtstrahlen ein Teilspektrum der elektromagnetischen Wellen sind. Der Vorgang der Wärmeübertragung ist der selbe wie der von der Sonne auf die Erde. Die Geräte sind unter dem Namen Strahlungsthermometer bzw. Strahlungspyrometer bekannt.

Die Berührungsthermometer sind in den Abschnitten 3.1 bis 3.4 behandelt, die Strahlungspyrometer werden im Abschnitt 3.5 besprochen.

3.1 Ausdehnungsthermometer

Die Ausdehnungsthermometer sind die einfachsten im Aufbau und die bequemsten in der Handhabung. Sie zählen daher zu den gebräuchlichsten Thermometern. Ihre Wirkungsweise beruht auf der Dehnung von Flüssigkeiten und festen Stoffen als Folge einer Temperaturänderung.

3.11 Flüssigkeitsausdehnungsthermometer

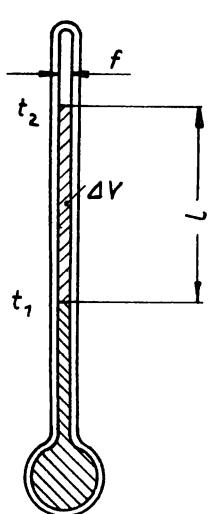


Bild 9

In den im Bild 9 gezeigten Glaskörper mit angeschmolzener Glaskapillare vom Querschnitt f ist die Meßflüssigkeit gefüllt. Sie ändert ihr Volumen bei Temperaturerhöhung von t_1 grd C auf t_2 grd C um

$$v_2 - v_1 = \Delta V = v_1 \alpha \cdot (t_2 - t_1)$$

Die Volumenvergrößerung erfolgt in den freien Raum der Glaskapillare hinein. Die Flüssigkeit steigt so hoch bis der erfüllte Raum

$$l \cdot f = v_1 \cdot \alpha \cdot (t_2 - t_1) = \Delta v$$

geworden ist.

Die Verschiebung l der Flüssigkeitssäule ist dann

$$l = \frac{v_1 \cdot \alpha}{f} \cdot (t_2 - t_1) \quad (12)$$

Die Temperaturmessung ist auf eine Längenmessung zurückgeführt worden.

Die Flüssigkeit soll einen möglichst großen und über den ganzen Meßbereich von der Temperatur möglichst wenig abhängigen Ausdehnungskoeffizienten α haben, damit die Anzeigeempfindlichkeit genügend groß wird und eine linear geteilte Skala verwendet werden kann.

Ausschlaggebend für die Wahl der Füllflüssigkeit ist ferner deren Erstarrungs- und Siedepunkt, da der Meßbereich des Thermometers nur innerhalb dieses Temperaturintervalls liegen kann.

Als Thermometerflüssigkeit findet in erster Linie Quecksilber Verwendung. Sein Anwendungsbereich liegt etwa zwischen - 30 grd C und + 300 grd C. Zur Vermeidung von Oxydation wird der Raum über dem Quecksilber luftleer gemacht oder mit Stickstoff gefüllt. Setzt man bei Stickstofffüllung den freien Kapillarraum unter Druck, so verschiebt sich die obere Meßgrenze zu höheren Temperaturen und zwar

bei einem Druck von	10 at	bis	500 grd C
" " "	20 at	" .	600 grd C
" " "	70 at	"	750 grd C

Mit Thermometern, die mit einer Legierung aus 91,5 % Quecksilber und 8,5 % Thallium gefüllt sind, lassen sich Temperaturen bis - 59 grd C messen.

Für die Messung tiefer Temperaturen werden die Thermometer mit organischen Flüssigkeiten gefüllt, deren drei wichtigste Alkohol mit Meßbereichen zwischen - 110 und + 50 grd C, Toluol mit Meßbereichen zwischen - 70 und + 100 grd C und Techn. Pentan mit Meßbereichen zwischen - 200 und + 20 grd C sind.

Die für die Glaskapillaren verwendeten Glassorten müssen eine kleine Wärmedehnung besitzen. Ihr Erweichungs- oder Einsenkpunkt muß über der oberen Meßgrenze des Thermometers liegen. Bis zu 300 grd C wird Jenaer Glas 16 III (roter Längsstreifen), bis 500 grd C 59 III oder 2954 III (schwarzer Streifen), bis 760 grd C Supremax-Glas und bis 750 grd C Quarzglas verwendet. Bei allen hochgradigen Thermometern

(über 300 grd C) besteht Explosionsgefahr, da die Innen- drücke zwischen 10 und 100 at liegen!

Die Flüssigkeitsthermometer sind in zwei verschiedenen Formen im Handel: als Einschlußthermometer (Bild 10) und als Stabthermometer (Bild 11).

Beim Einschlußthermometer sind die dünne Kapillare und der Skalenträger aus Milchglas in ein dünnwandiges Schutzrohr aus Glas eingeschlossen. Durch die im Bild 10 gezeigte Kapillarenform wird zur besseren Erkennbarkeit des Fadens ein breites Fadenbild erzeugt. Bei höheren Temperaturen (etwa oberhalb 400 grd C) ruft die Wärmeausdehnung der Milchglasskala schlecht beherrschbare Meßfehler hervor. Man benutzt daher zur Messung dieser Temperaturen die im Bild 11 gezeigten Stabthermometer, bei denen die Skala direkt auf die dickwandige Glaskapillare aufgeätzt ist. Die Sichtbarkeit des Fadens ist wegen des kreisförmigen Querschnitts der Kapillare schlechter als beim Einschlußthermometer.

Mit zunehmender Größe des Meßbereiches der Thermometer wächst bei gleichbleibender Anzeigeempfindlichkeit die Baulänge der Thermometer oder es wird, wenn man wegen der Unhandlichkeit und der großen Empfindlichkeit gegen Beschädigung die Baulänge begrenzen muß, die Anzeigeempfindlichkeit mit wachsendem Meßbereich geringer. Unter der Anzeigeempfindlichkeit verstehen wir hier die Änderung der Länge des Flüssigkeitsfadens mit der Temperatur, also den Differentialquotienten von (12)

$$E_a = \frac{dl}{d(t_2 - t_1)} = v_1 \cdot \alpha \cdot \frac{1}{f} \quad (13)$$

Für große Meßbereiche muß, damit die Baulänge ein bestimmtes Maß nicht überschreitet, der lichte Querschnitt der Glaskapillare f vergrößert werden. Damit sinkt aber die Empfindlichkeit. Aus Formel (13) geht aber auch hervor, daß nicht benötigte Anzeigebereiche durch Erweiterung der Kapillarenquerschnitte sehr zusammendrückt werden können,

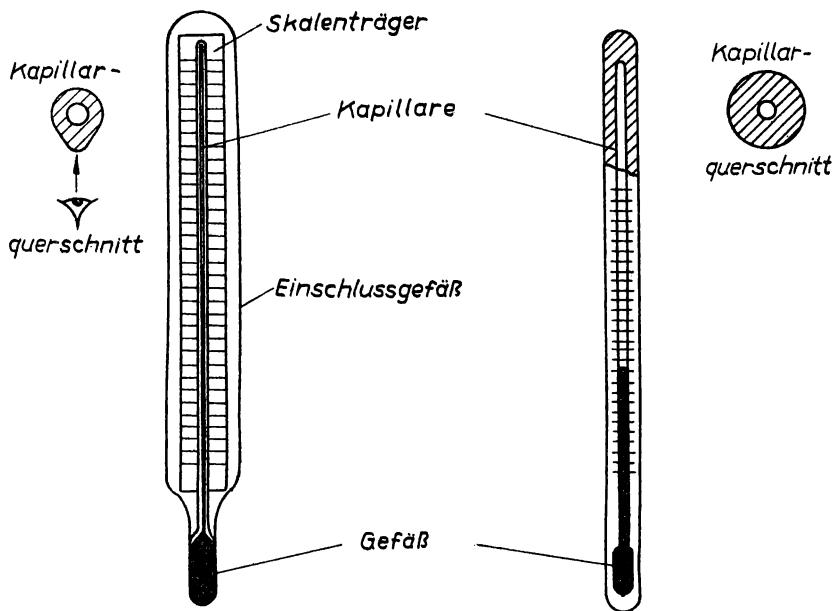


Bild 10

Einschlußthermometer

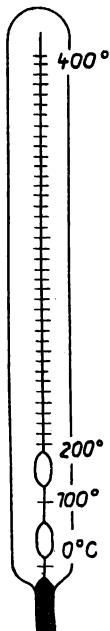
Bild 11

Stabthermometer DIN 12780

während in den benötigten Bereichen durch enge Kapillaren eine gute Empfindlichkeit erzielt werden kann, ohne daß die Baulänge trotz höherer Meßtemperaturen übermäßig groß wird. Bild 12 zeigt ein solches Thermometer, bei dem die Bereiche von 0 bis 100 und von 100 bis 200 grd unterdrückt sind. Um das Gerät eichen und prüfen zu können, wird an den Fundamentalpunkten 0 grd C und 100 grd C die Empfindlichkeit durch verengte Kapillaren erhöht. In DIN 12776 und 12777 sind ganze Sätze solcher Thermometer mit aneinander anschließenden Meßbereichen als Allihn- und Anschütz-Sätze genannt.

Flüssigkeitsthermometer sollten so benutzt werden, daß sich der ganze Flüssigkeitsfaden in dem Raum befindet, dessen Temperatur gemessen werden soll.¹⁾ Die Formel (12) gilt nur

1) = DIN 1953; 2.131



dann, und die angezeigte Temperatur t_a stimmt nur dann mit der wirklichen Stofftemperatur t_w überein, wenn die gesamte Füllflüssigkeit die zu messende Temperatur besitzt. Da in den meisten Fällen Messungen mit herausragendem Faden gemacht werden, werden die Thermometer auch im allgemeinen mit herausragendem Faden geeicht. Die Eichordnung fordert aber, daß auf der Rückseite der Skala Eintauchtiefe und Temperatur des herausragenden Fadens bei der Eichung vermerkt sein müssen. Abweichung von diesen Werten im Betriebsfall ergeben, wenn auch kleinere, Meßfehler. Größer werden diese Meßfehler, wenn das Thermometer ohne Herausragen des Fadens geeicht wurde. Es macht sich eine Korrektur des Meßergebnisses nach der Näherungsformel.

$$t_w = t_a + n \cdot \gamma \cdot (t_a - t_f)$$

Bild 12
erforderlich.

Hierin bedeuten:

- t_w die wirkliche Temperatur
- t_a die am Thermometer abgelesene Temperatur
- n die Länge des herausragenden Fadens in grd C.
- t_f die mittlere Temperatur des herausragenden Fadens
- γ den von der Glassorte abhängigen, scheinbaren Ausdehnungskoeffizienten der Füllflüssigkeit im Glase.

In Tabelle 3 sind die gebräuchlichsten γ -Werte enthalten.

Tabelle 3

Hg in Jenaer Glas 16 III	$\gamma = \frac{1}{6370}$
Hg in Jenaer Glas 59 III	$\gamma = \frac{1}{6130}$
Toluol, Pentan, Alkohol	$\gamma = \frac{1}{800}$

Die genaue Ermittlung der mittleren Fadentemperatur t_f bereitet einige Schwierigkeiten. Sie erfolgt meist mit Hilfe eines gewöhnlichen Thermometers, das mit seinem Gefäß in der Mitte des herausragenden Fadens parallel am Thermometerschaft angebracht wird (siehe Bild 13). Die so ermittelte Temperatur kann nur ganz grob der gesuchten Fadentemperatur entsprechen. Die Korrektur ist sehr primitiv und ungenau. Man soll aber beachten, daß man auch durch schlechte Korrekturen dem wirklichen Wert näher kommt und in jedem Fall eine schlechte Korrektur besser ist als gar keine.

Es soll nun das im Bild 13 gezeigte Beispiel gerechnet werden. Das Quecksilberthermometer besteht aus Jenaer Glas 16 III.

$$\gamma = \frac{1}{6370}; \quad t_a = 60^\circ \text{ C}; \quad t_f = 20^\circ \text{ C}; \quad n = 40^\circ \text{ C}.$$

$$t_w = 60 + 40 \cdot \frac{1}{6370} \cdot (60-40)$$

$$t_w = 60^\circ + 0,126^\circ$$

$$\underline{t_w = 60,13^\circ}$$

In der praktischen Betriebsmeßtechnik haben die Glasthermo-

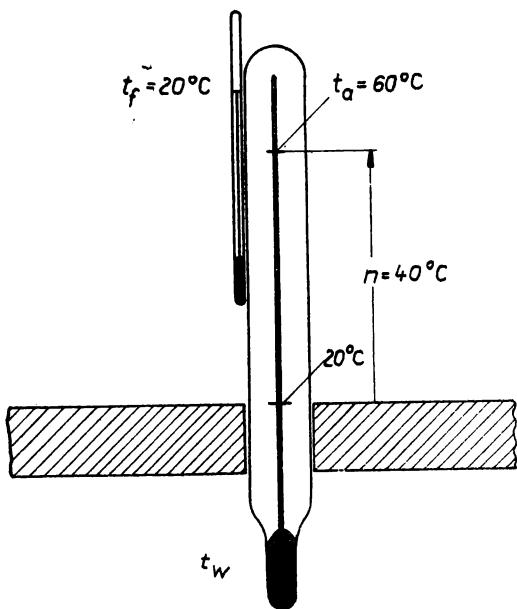


Bild 13

meter in großer Zahl Anwendung gefunden. Ihre Bedeutung sinkt aber immer mehr, da eine Vielzahl von Fabrikationsabläufen von zentralen Meßwarten überwacht und gesteuert werden. Die Glästhermometer können nur mit großem Aufwand für die Fernübertragung von Meßwerten eingerichtet werden.

Von großer Bedeutung sind heute nach wie vor die hochwertigen Thermometer für Eich-, Prüf- und Abnahmzwecke, die mit amtlichen Prüfprotokollen (DAMG) versehen sind.

Als steuerndes Meßgerät für die Zweipunkt-Temperaturregelung soll das Quecksilber-Kontakt-Thermometer noch erwähnt werden. Das Thermometer hat zwei Skalen, eine obere Kontaktinstellskala und eine untere Ableseskala. (Bild 14).

Durch einen im Gerätelkopf befindlichen Eisenkern mit äußerlich aufgesetzten Drehmagneten wird die auf einer Mikrometerspindel laufende Wandermutter auf- oder abbewegt, bis sie auf die gewünschte Kontakttemperatur der

oberen Skala eingestellt ist. Ein mit der Wandermutter fest verbundener Kontakt draht führt in die Meßkapillare und endet an dem Punkt der Ableseskala, die der eingestellten Kontakttemperatur entspricht. Erreicht der Quecksilberfaden die eingestellte Temperatur, wird ein an den Außenklemmen A und B liegender Stromkreis geschlossen. Dessen Strom wird zur Betätigung eines Relais benutzt, welches wiederum die Heizung abschaltet. Die Benutzung eines Relais macht sich notwendig, weil der Kontakt, um Wärmeentwicklung zu vermeiden, nur mit schwachen Strömen belastet werden darf.

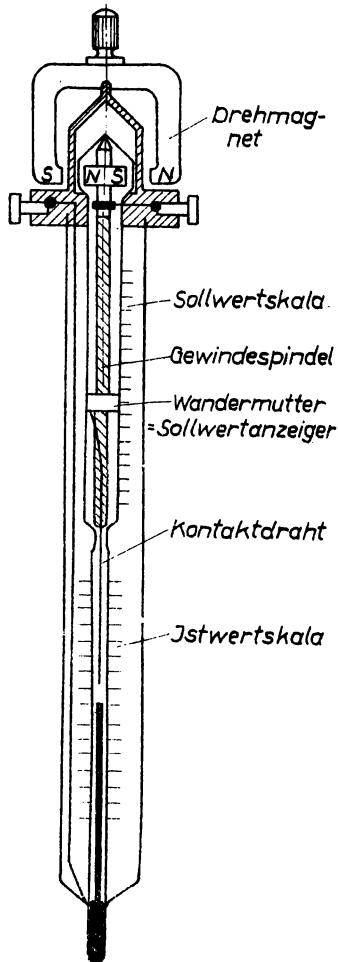


Bild 14

3.12 Metallausdehnungsthermometer

Die Wirkungsweise dieser Thermometer beruht darauf, daß ein Metallkörper seine Länge L_0 , die er bei einer Temperatur t_0 besitzt, auf die Länge L_t verändert, wenn seine Temperatur den Wert t annimmt. Dieser Sachverhalt wird durch die Gay-Lussacsche Formel

$$L_t = L_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)] \quad (14)$$

beschrieben. Die Temperaturmessung wird hier wie unter 3.11 auf eine Längenmessung zurückgeführt. Zur Messung der Längenänderung

$$\Delta L = L_t - L_0 = L_0 \cdot \alpha \cdot (t - t_0) \quad (15)$$

wird aber ein Vergleichskörper benötigt, der bei Temperaturschwankungen keine Längenänderungen zeigt, also ein temperaturunabhängiges Längennormal.

Im Bild 15a ist der prinzipielle Aufbau eines Metallausdehnungsthermometers gezeigt. Der Ausdehnungskörper erhält die Gestalt eines einseitig verschlossenen Rohres von der Länge L_0 . Der Vergleichskörper, der bei der Temperatur t_0 grd C ebenfalls die Länge L_0 habe, ist mit dem Boden des Ausdehnungsrohres fest verschweißt. Bei Erwärmung des Fühlers von t_0 grd C auf t grd C dehnt sich das Rohr entsprechend der Formel (15) um ΔL aus. Der Vergleichskörper verschiebt sich gegenüber dem oberen Rohrrand ebenfalls um ΔL , wenn das Material des Vergleichskörpers den Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_v = 0$ besitzt, d.h., wenn der Vergleichskörper seine Länge nicht ändert. Ein solches Material gibt es nicht! In der Praxis wird der Vergleichskörper stets eine, wenn auch kleine, temperaturabhängige Längenänderung

$$\Delta L_v = L_0 \cdot \alpha_v (t - t_0)$$

aufweisen, die der Längenänderung des Ausdehnungskörpers ΔL entgegenwirkt (Bild 15c). Als resultierende Längenänderung ΔL_r des Gerätes erhält man dann

$$\Delta L_r = \Delta L - \Delta L_v = L_0 (\alpha - \alpha_v) (t - t_0) \quad (16)$$

Diese resultierende Längenänderung wird mit einem Getriebe stark vergrößert sichtbar gemacht.

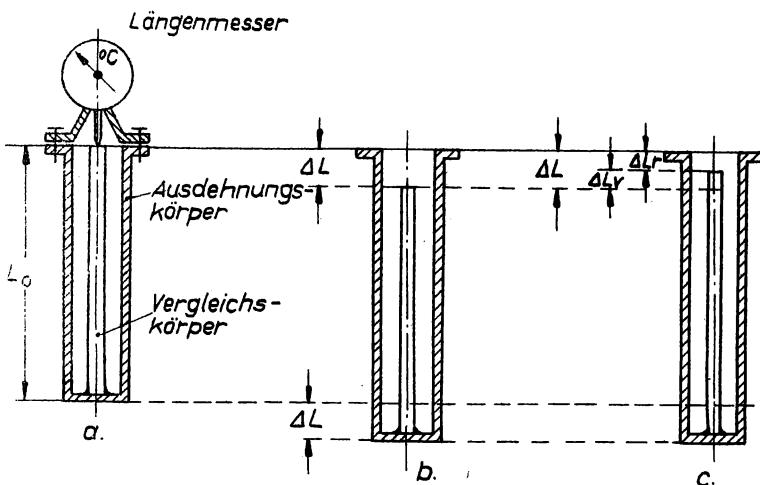


Bild 15

Für die Auswahl des Fühlermaterials gelten folgende Gesichtspunkte:

- Der Schmelzpunkt des Materials für Ausdehnungs- und Vergleichskörper muß oberhalb der zu messenden Höchsttemperatur liegen.
- Das Material muß eine gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber dem Medium besitzen, dessen Temperatur gemessen werden soll.

c) Die Empfindlichkeit E des Gerätes, das ist die Längenänderung pro Grad Temperaturänderung

$$E = \frac{dL_r}{d(t-t_0)} = L_0 (\alpha - \alpha_v) \quad (\text{aus 16})$$

ist der Ausgangslänge L_0 und der Differenz der Ausdehnungskoeffizienten direkt proportional. Der Ausdehnungskoeffizient für das Ausdehnungskörpermaterial α soll möglichst groß, der Ausdehnungskoeffizient für den Vergleichskörper α_v soll möglichst klein sein. Eine Temperaturabhängigkeit der Ausdehnungskoeffizienten ist äußerst unerwünscht, weil das eine nicht linear geteilte Skala zur Folge hat.

Die Forderungen a) und c) widersprechen sich, weil Metalle mit großem Ausdehnungskoeffizient stets einen niederen Schmelzpunkt haben. Als Materialien für den Ausdehnungskörper haben sich bewährt:

Aluminium $\alpha = 22$ bis $26 \cdot 10^{-6} \text{ grd}^{-1}$ Meßgrenze bei 400 grd C
Messing $\alpha = 18$ bis $19 \cdot 10^{-6} \text{ grd}^{-1}$ Meßgrenze bei 400 grd C
Stähle $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} \text{ grd}^{-1}$ Meßgrenze bei 1000 grd C

Die Dehnungszahlen α nehmen durchweg um $0,5 \cdot 10^{-6}$ je 100 grd C Temperaturanstieg zu. Die Vergleichskörper werden aus Invar-Stahl $\alpha_v = 2 \cdot 10^{-6} \text{ grd}^{-1}$, aus Porzellan $\alpha_v = 3 \cdot 10^{-6}$ und in seltenen Fällen aus dem teureren Quarz mit einem vernachlässigbar kleinen α_v hergestellt. (Ein Quarzstab von 1 m Länge dehnt sich bei 1000 grd Temperaturänderung etwa um 0,8 mm aus, $\alpha_v = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ grd}^{-1}$).

Die Baulängen dieser Geräte sind verhältnismäßig groß. Soll ein aus Messing und Porzellan bestehendes Thermometer bei einer Temperaturänderung von 400 grd C eine Längenänderung von 4 mm erzielen, so wird nach Formel (16) seine Baulänge:

$$L_0 = \frac{L_r}{(\alpha - \alpha_v)(t-t_0)} = \frac{4 \text{ mm}}{(19-3) \cdot 10^{-6} \text{ grd}^{-1} \cdot 400 \text{ grd}} = 625 \text{ mm groß}$$

Die trotz großer Baulängen erzielten kleinen Längenänderungen (bei 200 grd C etwa 2 mm) müssen mechanisch sehr hoch übersetzt zur Anzeige gebracht werden. Die dadurch bedingten Übertragungsgenauigkeiten setzen die Meßgenauigkeit herab. Man kann diese Fehler mit $\pm 2\%$ des Skalenbereiches annehmen. Die großen Abmessungen des Fühlers ergeben eine große Wärmekapazität $C = Q \cdot c$. Trotz guten Wärmeüberganges, das Meßelement ist in direkter Be- rührung mit dem zu prüfenden Medium, wird nach Abschnitt 1.2, Formel (8) die Einstellzeit groß. Zur Messung schnell veränderlicher Temperaturen kann das Gerät nicht eingesetzt werden. Der Einsatzbereich dieser Thermometer be- schränkt sich auf Meßräume genügend großer Ausdehnung, wie Kesselzüge, Fuchs- und Abgaskanäle. Dabei wird die Temperatur längs des ganzen Fühlers sicher nicht der zu messenden Temperatur entsprechen, sondern sich am äußeren Ende mehr oder minder der Außentemperatur nähern. Da die Anzeige aber der mittleren Temperatur längs des Fühlerrohres entspricht, weicht die angezeigte Temperatur von der zu messenden ab. Diese Fehler treten zu den mechani- schen hinzu. Die Stabthermometer werden daher oft erst nach Einbau unter Betriebsbedingungen geeicht. Den aufgezeigten Nachteilen dieser Meßmethode stehen zwei wesentliche Vorteile entgegen:

- a) Der Aufbau der Geräte ist denkbar einfach (Bild 16). Sie sind daher billig und sehr robust.
- b) Die Geräte entwickeln sehr große Stellkräfte, die das Meßprinzip besonders für Regelungszwecke geeignet ma- chen. Das Stellglied des Reglers kann direkt vom Meß- führer ohne Benutzung von Hilfsenergie betätigt wer- den. Hier liegt auch der große Anwendungsbereich dieser Geräte.

Die im Bild 16 dargestellte Bauart ist unter dem Namen "Metallstabthermometer" bekannt.

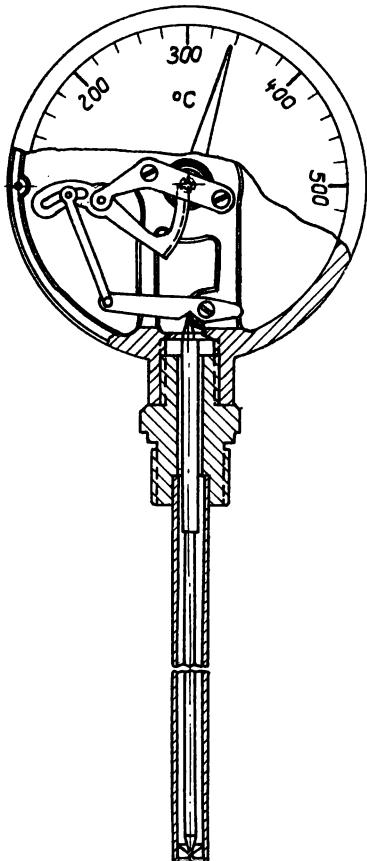


Bild 16

Metalle. Der Drehwinkel φ steigt mit abnehmender Dicke. Um große Ausschläge zu erzielen, wird man die Streifendicke d möglichst klein halten. Dem sind jedoch Grenzen

Eine andere Ausführungsform stellen die "Bimetallthermometer" dar. Werden zwei Metallstreifen mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten durch Aufeinanderwalzen fest miteinander zu einem Bimetallstreifen verbunden, so krümmt sich der Streifen bei Temperaturerhöhung nach der Seite des Metalls mit dem kleineren Ausdehnungskoeffizienten. Wickelt man einen solchen Bimetallstreifen der gestreckten Länge L und der Dicke d zu einer Spirale auf, (Bild 17) verbindet das eine Ende mit einer drehbar gelagerten Achse und hält das andere Ende am Gehäuse fest, so wird ein auf der Achse befestigter Zeiger bei Temperaturerhöhung um t grd C um den Winkel

$$\varphi = \frac{2\pi}{d} \Delta\alpha (t - t_0) 10^{-4}$$

in Bogeneinheiten

ausschlagen. $\Delta\alpha$ ist die Differenz der Ausdehnungskoeffizienten der beiden

gesetzt, weil das aufgebrachte Drehmoment der Spirale mit dem Quadrat der Streifendicke abnimmt.¹⁾

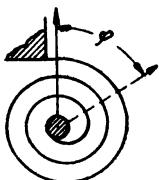


Bild 17

Der Meßbereich der Bimetallthermometer liegt zwischen - 50 und + 400 grd C mit Fehlergrenzen zwischen $\pm 0,5$ bis $\pm 3\%$ des Meßbereiches.

In der Industrie wird das Bimetallthermometer nur für untergeordnete anzeigennde Messungen verwendet. Das Meßprinzip hat aber bei der

Temperaturkompensation anderer Meßgeräte Bedeutung erlangt. Oft findet es auch in Temperaturwächtern und Temperaturwarnanlagen Verwendung als kontaktgebendes Maßelement. Als Motorschutzschalter finden wir das Bimetall als Schutz gegen länger dauernden Überstrom an Elektromotoren.

3.2 Temperaturmessung durch Druckmessung

3.21 Flüssigkeitsdruckthermometer

3.211 Allgemeine Grundlagen

Bei den Flüssigkeitsfederthermometern wird die Temperaturmessung auf die Messung eines Flüssigkeitsdruckes zurückgeführt. Schließt man nämlich eine Flüssigkeit in ein Gefäß constanten Volumens so ein, daß eine Ausdehnung verhindert ist, so wird sich bei Erwärmung der Flüssigkeit deren Druck erhöhen.

Im Bild 18a ist das Prinzip, im Bild 18b die technische Ausführung des Flüssigkeitsfederthermometers gezeigt. Es

1) Näheres bei: K.Roth, "ATM" 1952 J 711-1/ H.Fahlenbach
"Das Thermobimetall ETZ 72 (1951) / J.Bingel, "Thermo-Bimetalle" Arch.f.Metallkd. 3 (1949)

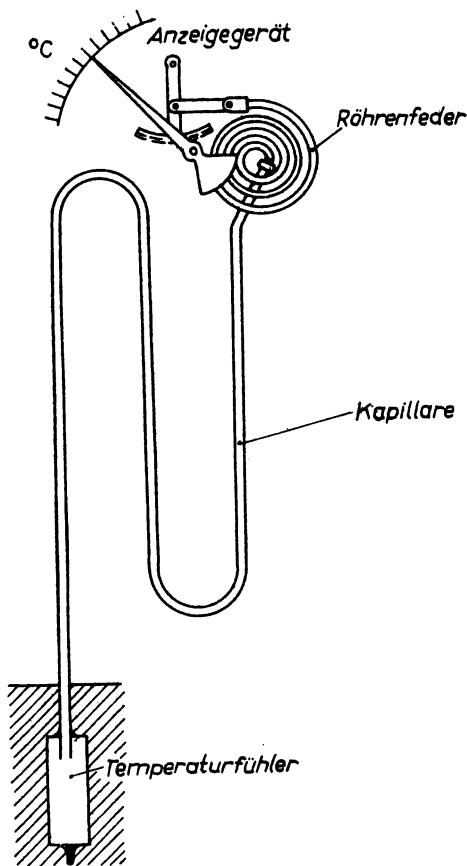


Bild 18 a

besteht aus einem Temperaturfühler, dem wärmeaufnehmenden Teil des Thermometers, einem Manometer, meist eine Bourdonfeder, dessen Skala in grd C geteilt ist, dem anzeigenenden Teil des Gerätes und einem Kapillarrohr, welches den Fühler mit dem Druckmesser verbindet. Das gesamte System - Fühler, Kapillarrohr und Manometer - stellt das

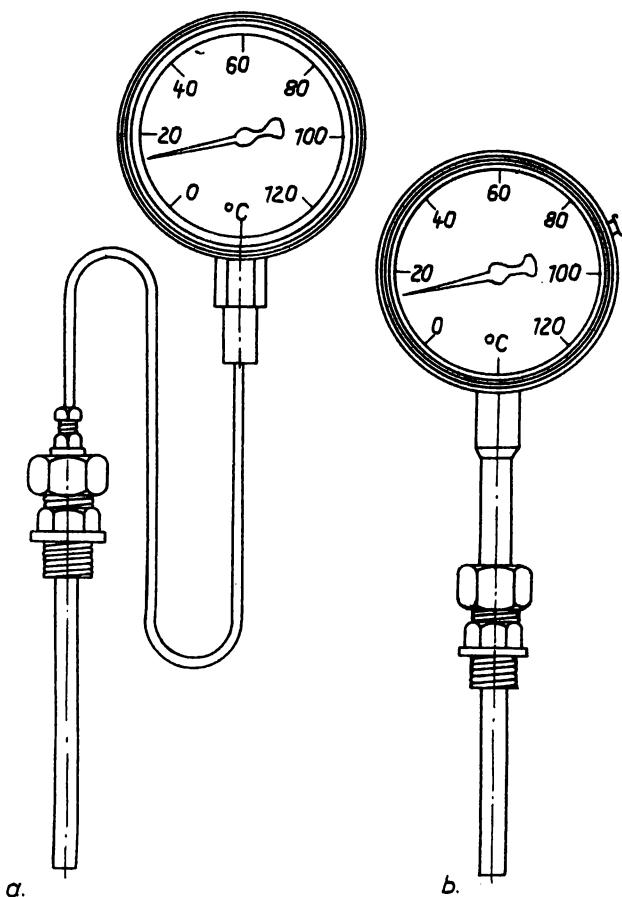


Bild 18 b

Gefäß constanten Volumens dar und wird gasfrei mit der Ausdehnungsflüssigkeit gefüllt.

Allgemein kann die Zustandsänderung der Flüssigkeit durch den mathematischen Ansatz

$$F(P; t; v) = 0 \quad \text{oder} \\ v = f(Pt) \quad (18)$$

beschrieben werden. v ist das spezifische Volumen $\frac{V}{G}$ (auf die Gewichtseinheit 1 kp bezogen), P der absolute Druck, t die Temperatur. Das vollständige Differential¹⁾ der Gleichung (18) lautet:

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_{t=\text{const}} \cdot dP + \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_{P=\text{const}} \cdot dt$$

oder

$$\frac{dv}{dt} = \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_t \cdot \frac{dP}{dt} + \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_P \quad (19)$$

Wir setzen zunächst voraus, daß sich das Volumen der die Sperrflüssigkeit einschließenden Gefäße nicht ändert:

$$dv = 0$$

also die Druckänderung mit der Temperatur bei constantem Volumen stattfindet:

$$\frac{dP}{dt} = \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_{v=\text{const.}}$$

Die Gleichung (19) kann dann in der Form

$$0 = \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_t \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_v + \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_P \quad \text{oder} \\ \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_t \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_v \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial v}\right)_P = -1 \quad (20)$$

geschrieben werden.

Die Änderung des Volumens mit der Temperatur bei constantem Druck ist nichts anderes als das Gay-Lussac'sche Gesetz:

1) = siehe Lehrbrief "Mathematik für Regelungsingenieure"

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_P = \alpha \cdot v_0 \quad (21)$$

α = kubische Temperaturausdehnungszahl,
 v_0 = spezifisches Volumen bei 0 grd C und 760 Torr.)

Denselben Ansatz machen wir für die Änderung des Volumens mit dem Druck bei konstanter Temperatur:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T = \epsilon \cdot v_0 \quad (22)$$

und nennen den Koeffizienten

ϵ die Kompressionszahl in at^{-1}

Beide Gleichungen in (20) eingesetzt ergibt:

$$\epsilon \cdot v_0 \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_v \cdot \frac{1}{\alpha \cdot v_0} = -1$$

oder

$$\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_v = -\frac{\alpha}{\epsilon} \text{ in } \frac{at}{grd} \quad (23)$$

Die Gleichung (23) lässt sich in derselben Form wie (21) und (22) schreiben:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_v = \sigma \cdot P_0 \quad (24)$$

wobei P_0 der Normaldruck von 1 ata und σ in grd^{-1} der Temperatur-Spannungskoeffizient $= -\frac{\alpha}{\epsilon} \cdot \frac{1}{P_0}$ ist.

Die Druckänderung bei einer Temperaturänderung von t_0 auf t grd ergibt sich durch Integration von (24).

$$\int_{P_0}^P dP = \sigma P_0 \quad \int_{t_0}^t dt$$

$$P - P_0 = \sigma \cdot P_0 (t - t_0)$$

wobei t_0 die Normaltemperatur von 0 grad C ist.

Also

$$\Delta P = \sigma P_0 \cdot t \quad (25)$$

Damit ist die Druckänderung als Funktion der Temperatur dargestellt, allerdings unter der Voraussetzung, daß σ eine Konstante ist. Praktisch zeigt σ eine - wenn auch geringe - Temperaturabhängigkeit, und die wirklichen Vorgänge lassen sich durch die Gleichung (25) nur für ein begrenztes Temperaturintervall angenähert, beschreiben, wenn für dieses betreffende Temperaturintervall ein mittlerer Spannungskoeffizient σ eingesetzt wird.

Als Füllflüssigkeit wird hauptsächlich Quecksilber ($\alpha = 182 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$; $\varepsilon = -3,4 \cdot 10^{-6} \text{ at}^{-1}$) verwendet. Sein Temperatur-Spannungskoeffizient ist sehr groß:

$$(25a) \quad \sigma = -\frac{\alpha}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{P_0} = -\frac{182 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}}{-3,4 \cdot 10^{-6} \text{ at}^{-1} \cdot 1 \text{ at}} = 53,5 \text{ grad}^{-1}$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung (25) bedeutet das einen Druckanstieg von 53,5 at pro Grad Temperaturänderung.

Nun findet aber wegen der Elastizität des Fühlergefäßes und der Kapillare, besonders aber wegen der Volumenvergrößerung des mit einer Verschiebung arbeitenden Druckmessers die Zustandsänderungen keinesfalls wie vorausgesetzt bei constantem Volumen statt.

Beachten wir, daß die in der Gleichung (25) beschriebene Druckänderung ΔP nur im Fühler mit dem Volumen V_0 entsteht. Die in der Kapillare und im Druckmesser befindliche Flüssigkeit wirkt nur druckvermittelnd, gleichsam als Kolben. Die Volumenänderung ΔV des gesamten Meßsystems,

welche durch die Druckänderung ΔP bewirkt wird, darf somit als Volumenänderung des Fühlers aufgefaßt werden.

Nach Gleichung (22) muß bei einer Volumenänderung ΔV des Fühlervolumens V_0 der Druck um

$$\Delta P' = - \frac{\Delta V}{\varepsilon \cdot V_0}$$

absinken.

Der wahre Druckanstieg im Meßsystem P_w ist also wesentlich kleiner, nämlich

$$\Delta P_w = \Delta P - \Delta P' = \sigma \cdot P_0 \cdot t + \frac{V}{\varepsilon \cdot V_0} \quad (\varepsilon \text{ negativ!}) \quad (26)$$

Fassen wir zusammen: Die Ausdehnung des Quecksilbers infolge der Temperatureinwirkung bewirkt eine Druckerhöhung des eingeschlossenen Quecksilbers, die sich unter die Kapillare dem Meßwerk mitteilt, und dort den ablesbaren Meßausschlag ergibt. Da die Druckzunahme linear mit der Temperatur erfolgt, ergibt sich eine lineare Skala.

3.212 Technische Ausführung

Als Federmeßwerke werden größtenteils spiralförmig aufgewickelte Metallrohrfedern und solche mit einem Windungswinkel von 270° verwendet, deren Hub auf einen Zeigeranschlag von 270° übersetzt wird. Die Auswahl der Federn und der Innenfüllung erfolgt so, daß bereits am Skalenanfang ein Druck von 80 kp/cm^2 herrscht, der für den Skalenendwert etwa auf 150 kp/cm^2 ansteigt. Die Übertragungsleitungen zwischen Temperaturfühler und Meßwerk sind Stahlkapillaren von 2 bis 4 mm Außendurchmesser und einem lichten Durchmesser von 0,1 bis 0,35 mm. Zum Schutz gegen äußere mechanische und chemische Einflüsse werden die Stahlkapillaren mit aufgewalzten Kupfermanteln, Bleimänteln und Gummi- oder Kuststoffüberzügen versehen. Sie sind

der empfindlichste Teil des Flüssigkeitsthermometers und müssen bei der Verlegung entsprechend sorgfältig behandelt werden. Die Biegeradien sind nur bis 50 mm herunter zu-lässig. Knickungen setzen das Gerät außer Betrieb.

Für die Ausführung der Temperaturfühler sind folgende Ge-sichtspunkte maßgebend:

Für alle Meßbereiche Δt werden die Meßfedern einheit-lich für eine Druckdifferenz von 80 zu 150 kp/cm² ausge-legt; d.h. ΔP_w (26) ist für alle Meßbereiche gleich groß. Dann ist nach Gleichung (26) das erforderliche Füllvolumen V_o

$$V_o = \frac{V}{\epsilon [\Delta P_w - \sigma \cdot P_o \Delta t]}$$

und unter Beachtung von (25a): $-\epsilon \cdot \sigma \cdot P_o = \alpha$

$$V_o = \frac{\Delta V}{\epsilon \Delta P_w + \alpha \cdot \Delta t} \quad (27)$$

vom Meßbereich Δt abhängig. Für große Temperaturspannen Δt sind kleine Quecksilbermengen, für kleine Temperatur-spannen große Quecksilbermengen erforderlich.

Übungsaufgabe:

Die Röhrenfeder eines mit Quecksilber gefüllten Druck-thermometers ist für einen Druck $\Delta P_w = 80 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$ ausge-legt. Bei Vollausschlag betrage ihre Volumenvergrößerung gegenüber der Stellung am Skalenanfang und die Volumen-vergrößerung von Kapillare und Fühler $\Delta V = 0,3 \text{ cm}^3$. (ΔV ist hauptsächlich der Röhrenfeder zuzuschreiben). Wie groß werden die Füllvolumina der Fühler bei Meßberei-chen von

$$t = 100; 200; 300^\circ \text{C}?$$

Zur Kontrolle:

$$V_{o\ 100} = 16,7 \text{ cm}^3, \quad V_{o\ 200} = 8,3 \text{ cm}^3, \quad V_{o\ 300} = 5,5 \text{ cm}^3$$

Aus den unter 1.4 Punkt 1 bis 4 angeführten Gründen muß die Wärmekapazität des Fühlers möglichst klein und die Fühleroberfläche zwecks schnellem Wärmeübergang möglichst groß gemacht werden. Diese Gesichtspunkte haben zu Standard-Fühlertypen geführt, die im Bild 19 dargestellt sind.

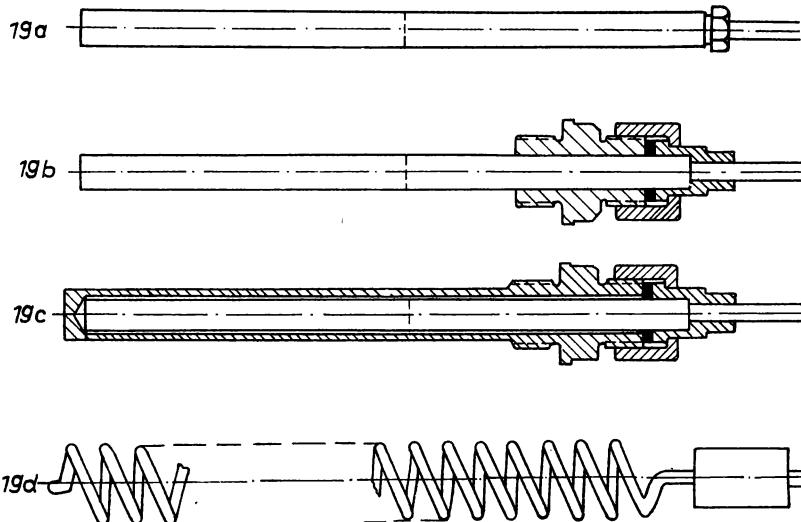


Bild 19

Fühler für Temperaturen bis 300 grd C haben einen Durchmesser von 17 mm für höhere Temperaturen einen Durchmesser von 13 mm. Die notwendigen Eintauchlängen l bewegen sich entsprechend dem Meßbereich zwischen 90 und 120 mm und nur bei kleinen Temperaturspannen (z.B. $\Delta t \sim 50$ grd C)

gehen die notwendigen Eintauchlängen bis auf 200 mm. Um bei hohen Temperaturspannen mit entsprechend kleinen Quecksilbermengen die üblichen Baumaße beibehalten zu können und die wärmeaufnehmende Oberfläche nicht übermäßig verkleinern zu müssen, fügt man Stahlkerne als Verdränger ein. Bei Messungen in Medien mit schlechter Wärmeleitfähigkeit wie Luft und Gase, benötigt man, um einen guten Wärmeübergang zu erzielen, bei festgelegter Füllmenge eine große Oberfläche des Fühlers. Man wählt dann die in 19 d gezeigte Sonderform. Wird ein Fühler im Schutzrohr (19 c) verwendet, so ist der Luftspalt zwischen Fühler und Schutzrohr so klein wie möglich zu halten und um einen brauchbaren Wärmeübergang zu bekommen, mit einer hochsiedenden Flüssigkeit oder mit Metallpulver auszufüllen.

Die mit Quecksilber gefüllten Gefäße fertigt man für Temperaturen bis 400 grd C aus Chromstahl, bis 500 grd C aus Chrommolybdänstahl und bis 600 grd C aus sechzigprozentigem Nickelstahl.

Sind die Thermometer mit organischen Flüssigkeiten gefüllt, so kann für die Gefäße Kupfer, Messing und Bronze Verwendung finden. Außerdem dürfen hier Lötverbindungen angewandt werden, die den Fertigungsprozeß verbilligen.

Für Sonderzwecke werden besonders kleine Fühler benötigt. Um die notwendigen Druckänderungen zu erzeugen, müssen bei den kleinen Füllungen Flüssigkeiten mit hohen Spannungskoeffizienten genommen werden. Hierfür kommen die organischen Flüssigkeiten Petroleum, Xylol und Toluol zur Verwendung. Diese Fühler werden überall dort eingebaut, wo die normalen Bauarten zu groß sind, z.B. in Maschinenlagern und Fahrzeugmotoren. Das Material des Fühlergefäßes ist Stahl.

3.213 Anzeigebereich und Anzeigegenauigkeit

Die Druckthermometer mit Quecksilberfüllung erfassen einen Meßbereich von - 35 bis 600 grd C. Das entspricht dem Fest- bzw. Siedepunkt des Quecksilbers unter den herrschenden Innendrücken. Innerhalb dieser Spanne können Meßgeräte mit jedem gewünschten Meßbereich hergestellt werden. Mit den genannten organischen Füllflüssigkeiten lassen sich Meßbereiche zwischen - 30 und 350 grd C erreichen.

Die Anzeigegenauigkeit liegt für die handelsüblichen Geräte mit Hg-Füllung bei $\pm 1\%$, mit organischer Füllung bei $\pm 2\%$ des Skalenumfanges. Unter Skalenumfang verstehen wir die Temperaturspanne zwischen Skalenanfangs- und -endwert. Darin sind jedoch nicht die Fehler durch Außentemperaturschwankungen und hydrostatisches Druckgefälle enthalten.

Das Volumen der Füllflüssigkeit, welches in der Kapillare und in der Meßfeder enthalten ist, hat an der Druckerhöhung beim Meßvorgang keinen Anteil, weil es eine nur unwesentliche Temperaturänderung erfährt. Es hat lediglich die Aufgabe, den im Fühler erzeugten Druck zu übertragen. Weicht jedoch die Außentemperatur im Betriebsfall von der Außen-temperatur bei der Eichung des Gerätes (meist 20° C) ab, so tragen die Füllvolumina von Kapillare und Meßfeder ebenfalls zur Druckänderung bei und rufen Meßfehler hervor.

Dem Einfluß der Außentemperatur auf das Meßwerk begegnet man, indem die Verbindung zwischen Rohrfeder und Anzeigerwerk als Bimetallbogen ausführt, der bei steigender Außen-temperatur seine Sehnenlänge verkürzt und einen zusätzlichen Zeigerausschlag rückgängig macht.

Der Fühler, der durch Temperaturschwankungen der Kapillare bedingt ist, wird umso größer je größer die Kapillarlänge, je größer der lichte Durchmesser der Kapillare und je größer die Temperaturschwankungen sind. Er liegt ungefähr bei $\pm 0,03$ bis $\pm 0,04\%$ vom Anzeigebereich je Meter Leitungslänge und je Grad Temperaturabweichung von der Eichtemperatur. Ist nun der Einfluß der Außentemperatur auf das

Meßergebnis entweder durch stark schwankende Außentemperatur oder bei zu langer Leitung untragbar, so greift man zu einer Kompensationsmethode. Längs der Kapillare wird eine zweite, getrennte Kapillare gelegt, die führerseitig vor dem Fühler endet, im Anzeigegewerk aber auf eine zweite Spiraalfeder arbeitet (Bild 2o).

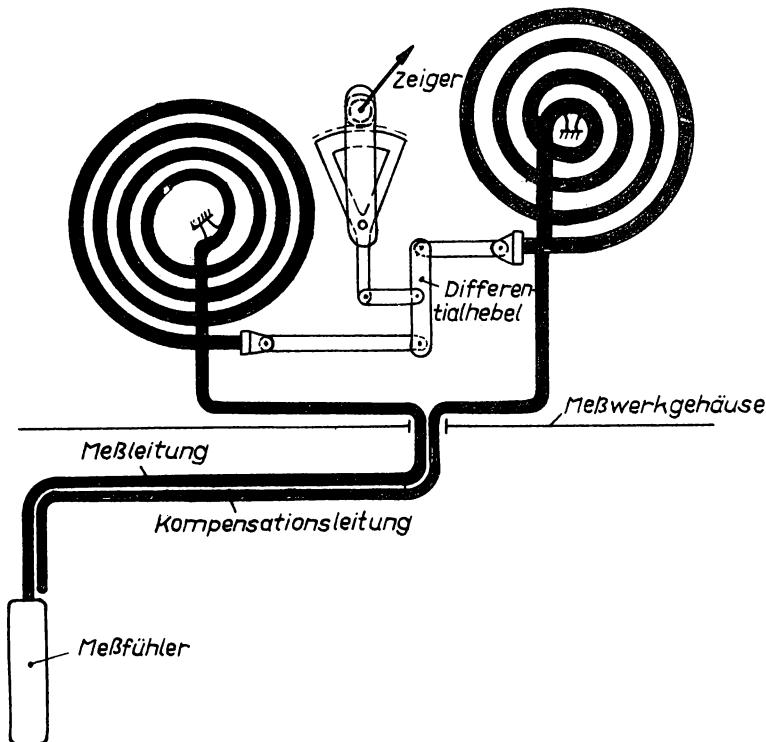


Bild 2o

Durch mechanische Gegenkopplung der Federausschläge wird eine vollständige Kompensation der Temperatureinflüsse auf die Kapillare und damit eine richtige Anzeige erreicht. Auf diese Weise lassen sich Fernübertragungslängen bis zu 50 m erreichen, während bei Kapillarlängen bis zu 7 m keine Kompensationseinrichtungen nötig sind.

Im Bild 21 ist gezeigt, wie Meßfehler durch hydrostatisches Druckgefälle entstehen, nämlich dann, wenn der Fühler um die Vertikale h höher oder tiefer als das Meßgerät liegt. Bei Hg-Füllung ($\gamma = 13,595$) beträgt die Druckzu- bzw. -abnahme je 73,5 cm Höhenunterschied 1 at; das entspricht einem Fehler von ca. $\pm 1,4 \%$. Bei stationären Geräten kann dieser Fehler durch Verstellen des Zeigers behoben werden.

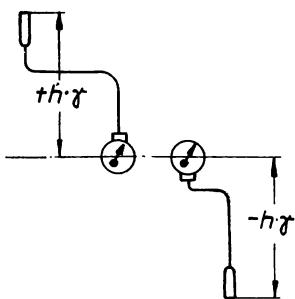


Bild 21

Eine Abhängigkeit der Anzeige vom Luftdruck ist bei den hohen Innendrücken vernachlässigbar klein.

3.214 Die Flüssigkeitsdruckthermometer sind sehr empfindlich und arbeiten bei entsprechender Auswahl des Manometers sehr genau. Sie werden mit großem Erfolg für Messungen angewandt, wo einzelne Temperaturen zuverlässig zu messen sind. Die Flüssigkeitsdruckthermometer treten an die Stelle der Flüssigkeitsausdehnungsthermometer, wenn die Meßstelle unzulänglich ist und eine Ablesung am Meßort nicht gestattet. Mit diesem Gerät ist es jedoch unmöglich, mit mehreren Fühlern auf ein Anzeigegerät zu arbeiten, wie das bei den elektrischen Methoden oft ausgeführt wird. Der große Vorteil der Geräte liegt im einfachen, robusten Aufbau, bei den großen Verstellkräften, die es gestatten, vom Meßwerk einen Linienschreiber betreiben zu lassen und in der Möglichkeit, einer, wenn auch begrenzten, Fernübertragung von Meßwerten.

3.22 Dampfspannungsthermometer

3.221 Allgemeine Grundlagen

Führt man einer Flüssigkeit laufend Wärme zu, so erhöht sich beständig ihre Temperatur unter geringer Volumenzunahme, bis bei einer bestimmten Temperatur, der Siedetemperatur t_s , plötzlich Dampfbildung einsetzt. Die Temperatur wächst nun nicht mehr an, dafür steigt aber laufend das Volumen des Flüssigkeits-Dampf-Gemisches stark an. Wird das Flüssigkeits-Dampf-Gemisch an der Volumenvergrößerung gehindert, indem es in einem Gefäß constanten Volumens eingeschlossen wird, so wird sein Druck ansteigen. Druckerhöhung bedeutet aber Erhöhung der Siedetemperatur t_s . Die Dampfbildung wird unterbrochen und die laufend zugeführte Wärme dazu benutzt, um die Temperatur des Gemisches auf die neue Siedetemperatur zu bringen. Ist diese erreicht, setzen nacheinander Druckerhöhung, Siedepunkterhöhung, Temperaturanstieg usw. ein. Stellen wir uns diese Vorgänge in unendlich kleinen Sprüngen vor, so wird uns klar, daß sich die Siedetemperatur t_s als Funktion des Druckes im Gemisch, des Dampfdruckes P_D darstellen läßt.

$$t_s = f(P_D) \quad (28)$$

Jede Flüssigkeit hat also einen charakteristischen Dampfdruck, der nur von der Temperatur, nicht aber vom Volumen abhängt. Eine Volumenverringerung bedingt, daß sich aus dem Dampfraum soviel Dampf kondensiert, bis der zur Temperatur gehörige Druck wieder hergestellt ist. Bei Volumenvergrößerung verdampft soviel Flüssigkeit nach wie zur Erreichung des Dampfdruckes notwendig ist. Diesen nur von der Temperatur abhängigen Dampfdruck nennt man "Sättigungsdruck" oder "Tension". Beim Sättigungsdruck befinden sich Dampf und Flüssigkeit im Gleichgewicht, d.h. es treten in der Zeiteinheit soviel Moleküle durch die Flüssigkeitsoberfläche in den Dampfraum in

den Flüssigkeitsraum. Um ein Flüssigkeitsmolekül vom Innenraum in den Dampfraum zu bringen, muß Arbeit aufgewendet werden. Moleküle, deren kinetische Energie zur Verrichtung dieser Arbeit ausreicht, können durch die Flüssigkeitsoberfläche in den Dampfraum austreten. Eine Temperaturerhöhung - sie ist die Folge der Zuführung von Wärmeenergie, die die Bewegungsenergie der Moleküle erhöht - befähigt mehr Moleküle die notwendige Austrittsarbeit aufzubringen. Sie muß zur Erhöhung der Dampfspannung führen.

(28) ist die Gleichung der Dampfspannungskurve, die sich leider durch eine einfache, technisch brauchbare Form analytisch nicht ausdrücken lässt. Sie ist für die einzelnen Flüssigkeiten nur in Form von Tafeln, den Dampftabellen darstellbar.

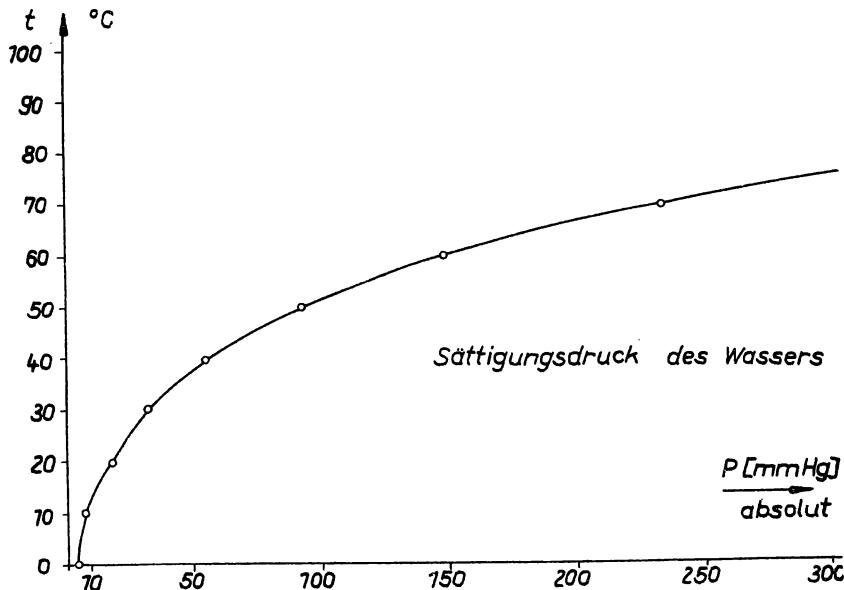


Bild 22

Im Bild 22 ist die Abhängigkeit des Sättigungsdruckes von der Temperatur dargestellt. In grober Näherung stellt die Kurve eine Parabel 2. Ordnung dar. Dieser eindeutige Zusammenhang zwischen Temperatur und Dampfdruck eines Flüssigkeits-Dampf-Gemisches wird zur Temperaturmessung ausgenutzt. indem der Dampfdruck eines Flüssigkeits-Dampf-Gemisches gemessen wird und über die Dampftabelle auf seine Temperatur geschlossen wird, die ja die gleiche wie die des Mediums sein muß, in welches das Gefäß mit dem Gemisch eintaucht.

3.222 Meßprinzip und gerätetechnischer Aufbau der Dampfspannungs-Federthermometer unterscheiden sich nicht von dem der Flüssigkeitsdruckthermometer (Bild 18 und Abschn. 3.21). Es soll hier nur auf besondere Eigenschaften der Tensionsthermometer eingegangen werden.

Vom Meßsystem wird nur der Fühler, also der wärmeaufnehmende Teil, mit einer leichtsiedenden Flüssigkeit gefüllt.

Als Verdampfungsflüssigkeiten sind im Gebrauch

Äther	von + 40 bis + 180° C
Chloräthyl	von + 20 bis + 120° C
Chlormethyl	von - 20 bis + 120° C
Schwefeldyoxyd	von 0 bis + 160° C
Propan	von - 40 bis + 100° C
Benzol	von + 100 bis + 300° C
Xylol	von + 200 bis + 400° C.

sowie Methyl- und Äthyl-Alkohol, Pentan, Toluol und Chloroform. Sie müssen besonders rein eingefüllt werden, da sonst bei den Meßtemperaturen chemische Veränderungen eintreten können, die die Funktion der Geräte stark beeinflussen.

Fühlervolumen und Füllmenge der Verdampfungsflüssigkeit müssen so aufeinander abgestimmt sein, daß am Ende des Meßbereiches noch genügend Verdampfungsflüssigkeit im Fühler ist, bei der Anfangstemperatur dagegen noch ein

Gasraum im Fühler vorhanden sein muß. Die Anfangstemperatur t_a muß dabei größer sein als die Siedetemperatur t_s unter Normaldruck P_b , weil sonst keine zur Anzeige nutzbare Druckdifferenz ΔP vorhanden ist; (Bild 23) denn die Druckmesser arbeiten alle gegen Atmosphärendruck. Bei Nichteinhaltung der ersten Forderung würden die Dämpfe bei restlos verdampfter Füllflüssigkeit P in das Gebiet der ungesättigten Dämpfe übergehen. Sie folgen dann nicht mehr der Dampftabelle sondern ähneln in ihrem Verhalten mehr den Gasen, deren Druck bekanntlich volumenabhängig ist. Wie schon weiter oben erwähnt, ist der Sättigungs-

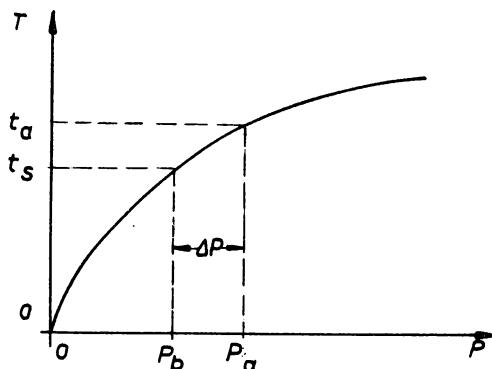


Bild 23

druck unabhängig vom Volumen, d.h. die Anzeige des Gerätes ist unabhängig von den elastischen Dehnungen von Fühler, Kapillare und Meßfeder.

Eine Verfälschung der Meßergebnisse durch Temperatureinflüsse auf die Kapillare ist nicht möglich, da der Druck im Meßsystem allein von der Temperatur der Flüssigkeit abhängt. Diese ist aber nur im Fühler untergebracht. Wegen der im Bild 22 und 23 gezeigten Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur erhalten die Geräte eine sich nach höheren Temperaturen stark erweiternde Skala.

Der relative Fehler nimmt bei abnehmender Temperatur stark zu.

Weiter muß beachtet werden, daß Temperatur vom absoluten Druck abhängt, während das Manometer den Überdruck $P_{\ddot{u}}$ gegen den Atmosphärendruck mißt. Das Gerät wird bei einem bestimmten Atmosphärendruck P_{b_0} geeicht. Weicht der Luftdruck P_b im Betriebsfall von dem der Eichung ab, so zeigt das Gerät falsch an.

Es gilt hier: Der Dampfdruck als absoluter Druck ist gleich der Summe aus Luftdruck und dem vom Manometer angezeigten Überdruck

$$P(t) = P_b + P_{\ddot{u}}(t)$$

Für den Eichfall gilt:

$$P = P_{b_0} + P_{\ddot{u}_0} \quad \text{oder} \quad P_{\ddot{u}_0} = P - P_{b_0}$$

Nehmen wir an, der Luftdruck im Betriebsfall sei kleiner als der bei der Eichung

$$P_b < P_{b_0}$$

dann ist

$$P_{\ddot{u}} = (P - P_b) > (P - P_{b_0}) \quad \text{und} \quad P_{\ddot{u}} > P_{\ddot{u}_0}$$

Der gemessene Überdruck $P_{\ddot{u}}$ ist größer als im Eichfall. Weil die Geräteskala in grd C graduiert ist, wird eine zu große Temperatur angezeigt. Ist der Luftdruck höher als bei der Eichung, dann ist die angezeigte Temperatur zu niedrig. Der Fehler Δt ist dem Unterschied der Luftdrucke

$$\Delta t \sim (P_{b_0} - P_b) \quad \text{proportional.}$$

Die Korrektur von der angezeigten Temperatur t' auf die wirkliche Temperatur t erfolgt wegen der Nichtlinearität der Dampfdruckkurve am besten auf graphischem Wege (Bild 24). Entsprechend der beispielweise zu hoch angezeigten Tem-

ratur t' findet man im Dampfdruckdiagramm den absoluten Druck P' , der um den Betrag $P_{bo} - P_b$ zu groß ist. Wird $P_{bo} - P_b$ von P' abgezogen, so findet man den wahren Dampfdruck, zu dem die wirkliche Temperatur t aus dem Diagramm ermittelt werden kann.

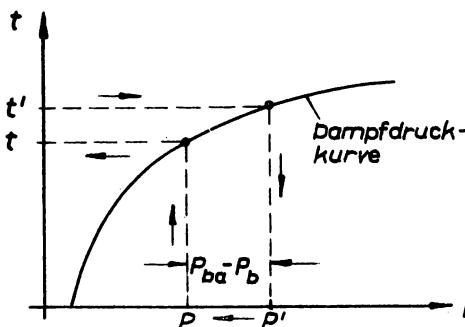


Bild 24

Die Vorteile der Dampf-

spannungsfederthermometer sind:

1. Unempfindlichkeit gegen Schwankungen der Außentemperatur
2. Weit auseinandergezogene Skala und damit große Empfindlichkeit, wenn die Auswahl des Gerätes so erfolgt, daß die Meßtemperatur in der oberen Hälfte der Skala liegt.
3. Große Verstellkräfte.

Nachteile sind:

1. Empfindlichkeit der Kapillare gegen mechanische Beschädigung,
2. Abhängigkeit der Anzeige vom Luftdruck.
3. Geringe Überlastbarkeit, da geringe Temperaturüberschreitungen schon große Druckänderungen bewirken, die die Meßfeder bleibend verformen oder gar zerstören.

3.3 Elektrische Temperaturmeßverfahren

Die bisher beschriebenen mechanischen Meßverfahren finden in ihrer Anwendbarkeit eine Grenze, wenn zwischen Meßort und Anzeigeort große Entfernung zu überbrücken sind. Das trifft für moderne, weit ausgedehnte Anlagen zu, wo die Betriebsvorgänge von einer zentralen Meß- und Steuerwarte überwacht und gesteuert werden. Während bei den mechanischen Methoden die Länge der Übertragungsleitung maximal 30 m betragen kann, lassen die elektrischen Methoden Leitungslängen bis 30 km und mehr zu. Der großen Empfindlichkeit der mechanischen Übertragungsleitungen gegen mechanische Beschädigungen steht eine relativ hohe Unempfindlichkeit der elektrischen Leitungen gegenüber. Außerdem sind elektrische Leitungen schneller und einfacher zu reparieren als die Kapillarleitungen der Druckthermometer. Während die mechanischen Leitungen die Übertragung nur eines Meßwertes pro Leitung gestatten, können auf einer elektrischen Leitung unter Verwendung von Meßstellenumschaltern mehrere Meßwerte zeitlich nacheinander auf ein Meßwerk übertragen werden. Bei Benutzung von Fallbügelpunktschreibern und Punktdruckern ist die Registrierung mehrerer Meßwerte durch einen Schreiber auf einem Schreibstreifen möglich. Bei der Einrichtung zentraler Meßwarten und Bedienungsstände ergeben sich dadurch große Vorteile:

1. Die Anzahl der zu installierenden Übertragungsleitungen kann in erträglichen Grenzen gehalten werden.
2. Die Verlegung der Leitungen geschieht ohne größeren Aufwand, ist billiger und einfacher als die Verlegung von Kapillarleitungen.
3. Die Schaufläche der Meßwarten wird besser ausgenutzt.

Diese Vorteile überwiegen bei weitem die Nachteile der elektrischen Methode:

Größere Empfindlichkeit der Anzeigeeinrichtung gegen mechanische Einflüsse, größerer gerätetechnischer Aufwand bei den Anzeigeeinrichtungen, um eine hohe Meßgenauigkeit zu erzielen und zusätzliche Sicherheitseinrichtungen in explosionsgefährdeten Betrieben.

Der Betriebsmeßtechnik bieten sich zwei Meßmethoden an, die eine Zusammenfassung von Meßwerten besonders gut ermöglichen: Die Temperaturmessung mit Thermoelementen und die Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern.

3.31 Temperaturmessung mit Thermoelementen

3.311 Grundprinzip

Der thermoelektrische Effekt wurde 1821 von Seebeck entdeckt, viel später aber der Meßtechnik zugänglich gemacht. Wenn zwei verschiedene Metalle einander berühren (Bild 25),

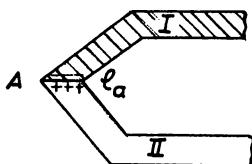
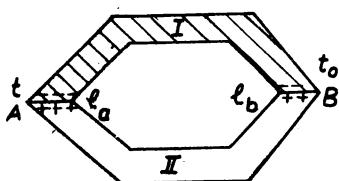


Bild 25

so treten Elektronen von einem Metall zum anderen über und zwar vom Metall mit der kleineren Austrittsarbeit II für die Elektronen zu dem mit der größeren Austrittsarbeit I. Das Metall II ist also gegenüber I positiv geladen. Die so entstehende Spannung e_a in der Berührungsschicht soll "innere Kontaktspannung" genannt werden. Bringt man die beiden offenen Enden von (I) und (II) an der Stelle B zur Berührung, (Bild 26), so entsteht dort ebenfalls eine Kontaktspannung e_b . Beide Kontaktspannungen e_a und e_b sind gleich groß und heben sich wegen ihrer Gegenschaltung auf, wenn die beiden Temperaturen t und t_0 in A und B gleich sind

$$e_a - e_b = 0; \quad t = t_0$$



Sind die Temperaturen t und t_0 unterschiedlich groß, dann entsteht eine elektromotorische Kraft E , die "Thermospannung" genannt wird.

$$E = (e_a - e_b); \quad t \neq t_0$$

Bild 26

Die Größe der Thermospannung

E hängt von der Temperaturdifferenz $t - t_0$ zwischen A und B ab. Der Zusammenhang zwischen E und $t - t_0$ wird angenähert durch die Gleichung

$$E = a(t - t_0) + b(t - t_0)^2 \quad (29)$$

dargestellt. a und b sind Konstante, die experimentell ermittelt werden müssen. Eine solche Anordnung wird nach DIN 16160 "Thermoelement" genannt. Die beiden Leiter I und II heißen "Thermopaar", jeder einzelne wird mit "Thermoschenkel" bezeichnet.

Die EMK wird mit einem an beliebiger Stelle des einen Thermoschenkels eingeschalteten Galvanometer G gemessen (Bild 27), aus deren Größe auf die Temperaturdifferenz

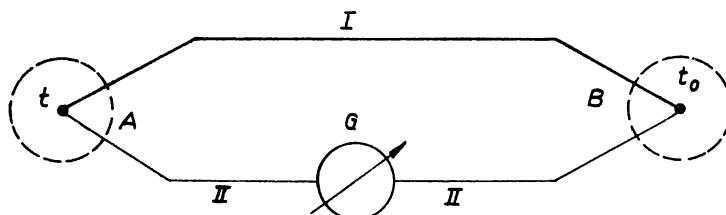


Bild 27

$t - t_0$ geschlossen werden kann. Von der Differenzmessung kommt man sehr schnell zur Absolutmessung der Temperatur, wenn

die Temperatur t_0 der Stelle B auf einem constanten Wert (z.B. 0 grd C) gehalten wird. Die EMK ändert sich dann nur mit der Temperatur t der Stelle A. Die Stelle A wird der zu messenden Temperatur ausgesetzt, während die Stelle B an einem Ort constanter Temperatur verlegt wird. Die Stelle A ist die "Meßstelle" oder das "Arbeitsende" des Thermoelementes, t die Meßtemperatur, B ist mit "Vergleichsstelle", t_0 mit "Vergleichstemperatur" zu bezeichnen.

Wir haben gelernt: Es ist grundsätzlich möglich, die Temperaturmessung auf die Messung einer elektrischen Spannung zurückzuführen.

3.312 Auswahl der Thermoschenkel

Bei der Auswahl des Materials für die Thermoschenkel sind eine Reihe von Forderungen zu beachten, die an die Eigen-schaften des Thermoelementes gestellt werden.

Der Zusammenhang zwischen Thermospannung E und Temperatur t der Meßstelle bei einer Vergleichsstellentemperatur $t_0 = 0$ grd C ist uns durch die Gleichung (28) gegeben

$$E = at + b \cdot t^2 \quad (29)$$

Die Beiwerte a und b sind Konstante, deren Größe vom Material der Thermoschenkel abhängt.

Die Empfindlichkeit eines Thermoelementes, darunter ver-stehen wir die Änderung der Thermospannung je Grad Tem-pe-raturänderung, wäre dann

$$\frac{dE}{dt} = a + 2 bt = \alpha$$

Wir nennen den Temperaturkoeffizienten des Thermopaars und beachten, daß $\alpha = a + 2 bt$ temperaturabhängig ist.

$$\alpha = f(\text{Material}; t)$$

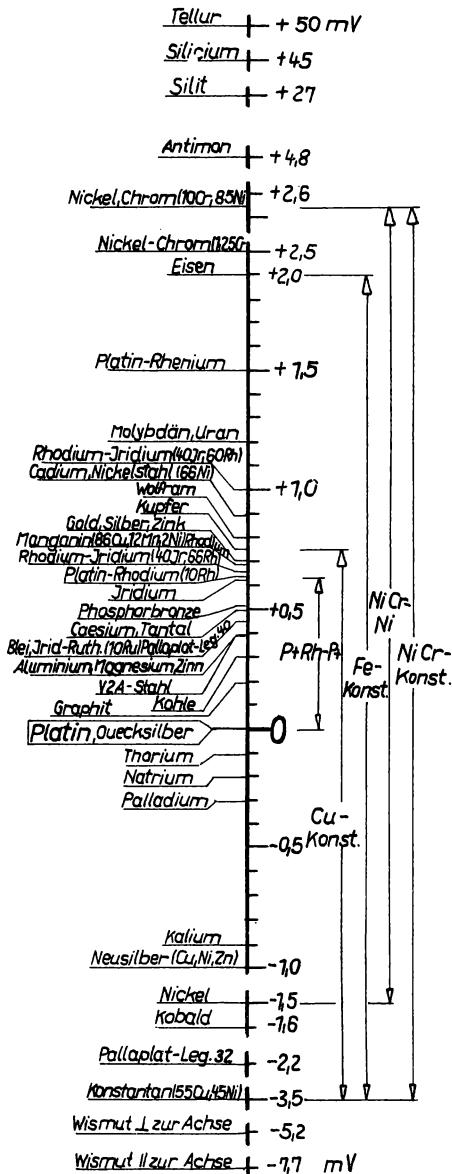


Bild 27α

Thermoelemente, die zur Temperaturmessung eingesetzt werden, sollen eine möglichst große Empfindlichkeit besitzen. Damit wird die im Meßbereich abgegebene Spannungsdifferenz groß, die zur Spannungsmessung benutzten Galvanometer können unempfindlicher ausgelegt und den oft rauen Betriebsbedingungen entsprechend robust gebaut werden. Die im Bild 27agezeigte Skala stellt die thermoelektrische Spannungsreihe der wichtigsten Werkstoffe dar. An ihr sind die Thermospannungen (in Millivolt) angegeben, welche die betreffenden Werkstoffe bei Paarung mit Platin bei einer Temperaturdifferenz von 100° C zwischen Meßstelle und Vergleichsstelle erzeugen. Das Potential von Platin ist hierbei als Bezugsgröße willkürlich zu 0 festgelegt worden. Die Skala ist von - 1,0 bis + 2,0 linear; die äußeren Teile sind verkürzt dargestellt und herangerückt. Eine Paarung mit Pt gilt für Werkstoffe im oberen Teil eine positive, im unteren Teil eine negative Spannung. Haben die Werkstoffe einer Paarung gleiches Vorzeichen, so sind die Spannungswerte zu subtrahieren, haben sie ungleiches Vorzeichen, so sind die absoluten Spannungswerte zu addieren.

Unter Berücksichtigung größtmöglicher Empfindlichkeit sind die Thermoelemente zur Temperaturmessung solche Werkstoffpaarungen zu wählen, die in der Spannungsreihe möglichst weit auseinander liegen. Die wichtigsten Paarungen, die bei der Temperaturmessung Verwendung finden, sind rechts eingetragen.

Bei der Verwendung von Thermopaaren für Meßzwecke genügt die Forderung nach großer Empfindlichkeit allein nicht. Die Empfindlichkeit soll über den ganzen Meßbereich constant sein:

$$\frac{dE}{dt} = \text{const.}$$

d.h. für gleichgroße Temperaturänderungen an beliebigen Stellen des Meßbereiches fordern wir gleichgroße Span-

nungsänderungen. Da bei den zur Messung der Thermospannung verwendeten Millivoltmetern der Ausschlagwinkel linear proportional der anliegenden Spannung ist, können diese Geräte bei Einhaltung unserer Forderung eine linear in Temperaturgraden geteilte Skala erhalten.

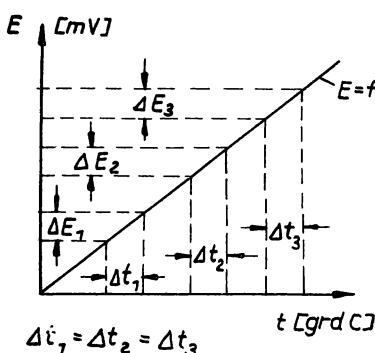


Bild 28

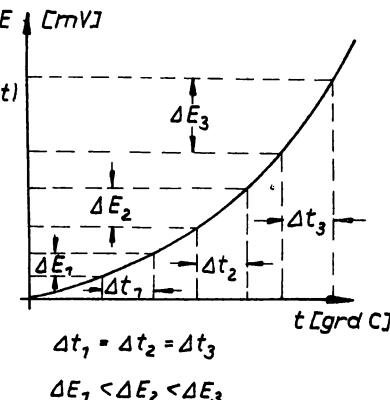


Bild 29

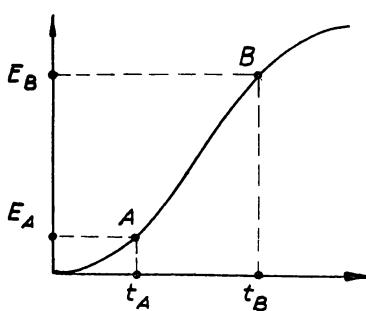


Bild 30

Die im Bild 28 gezeigte Temperatur-Spannungskurve eines Thermoelementes erfüllt unsere Forderungen ideal. Dieser Fall liegt in der Praxis kaum vor. Die meisten Werkstoffpaarungen zeigen das Verhalten von Bild 29 und 30. Die Empfindlichkeit des zu Bild 29 gehörenden Thermoelementes steigt mit wachsender Temperatur. Es ist also für Meßzwecke nicht geeignet während das Element von Bild 30 im Bereich zwischen A und B durchaus verwendet werden kann.

Fassen wir das bisher gesagte kurz zusammen:

Von Thermoelementen, die zur Temperaturmessung eingesetzt werden sollen, fordern wir ein möglichst steiles und möglichst geradliniges Temperatur-Spannungsdiagramm. Es kommen nur Werkstoffspannungen in Frage, deren Temperaturkoeffizient groß und wenig temperaturabhängig ist. Für die Koeffizienten a und b der Gleichung (29) bedeutet das: a soll möglichst groß, b dagegen möglichst klein sein, und zwar so klein, daß das in der Temperatur quadratische Glied von Gleichung (29) vernachlässigt werden kann.

Ein weiterer Gesichtspunkt, der bei der Werkstoffauswahl für Thermoelemente beachtet werden muß, ist die Austauschbarkeit. Im Betrieb kommt es häufig vor, daß ein Thermoelement beschädigt und somit unbrauchbar wird. Sein Ersatz muß aber die gleichen Eigenschaften, dasselbe Temperatur-Spannungsdiagramm wie der Vorgänger besitzen, damit eine Nachrechnung der in Temperaturgraden geteilten Skala des Anzeigegerätes nicht notwendig wird.

Nun hängt die EMK der Thermoelemente außerordentlich stark von der Reinheit der Metalle bzw. von der Zusammensetzung der Legierungen ab. Abweichungen von 0,01 % in der Zusammensetzung bringen bereits merkbare Änderungen. Brauchbar sind also nur Stoffe und Legierungen, die sich metallurgisch mit der entsprechenden Reinheit bzw. Genauigkeit in der Zusammensetzung ohne zu große Kosten herstellen lassen. Im Bild 31 ist die Abhängigkeit der EMK von der Zusammensetzung bei konstanter Temperaturdifferenz zwischen Meß- und Vergleichsstelle gezeigt. Praktisch zeigen fast alle Legierungen dasselbe Verhalten wie die Elemente bestehend aus den Thermoschenkeln Platin (Pt) bzw. Eisen (Fe) und Platin-Rhodium bzw. Eisen-Chrom-Legierung. Die EMK wächst keineswegs linear mit dem Prozentgehalt der Legierungsbestandteile, sondern strebt einer Art Sättigung zu oder hat gar einen Umkehrpunkt. Zweckmäßig wird man den Gehalt der Legierungsbestandteile so wählen, daß man - manchmal

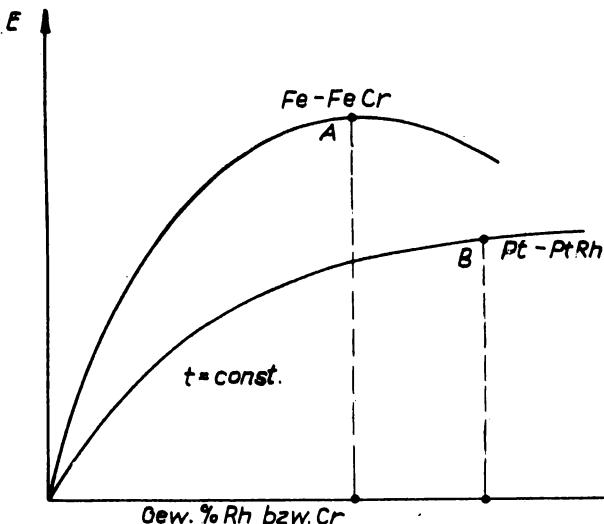


Bild 31

unter Verzicht auf eine größere EMK - in ein Gebiet der Kurve kommt, wo diese eine flache Steigerung besitzt (Punkte A und B). Die Änderung der Thermospannung mit der Zusammensetzung ist dort klein und man kann größere Toleranzen bei der metallurgischen Herstellung von Drähten für Thermoschenkel zulassen. Das senkt bei großen Stückzahlen die Produktionskosten erheblich.

Um kleine Anzeigeverzögerungen zu erhalten, wird das Arbeitsende des Thermoelementes oft mit dem Meßmedium in unmittelbare Berührung gebracht. Bei Dauermessung hoher Temperaturen besteht hierbei die Gefahr der Verzunderung, des Abbrandes der Drähte und der Legierung des Materials der Thermoschenkel mit dem Meßmedium. Dabei kann sich der Temperaturkoeffizient α ändern, was zu schwer korrigierbaren Meßfehlern führen kann. Die Höchsttemperaturen, die mit Thermoelementen gemessen werden können, liegen daher oft

weit unterhalb des Schmelzpunktes. Vom Thermoschenkelmaterial müssen wir daher hohe Schmelzpunkte und Beständigkeit gegen Legierung mit dem Meßmedium verlangen. Auf die letzte Eigenschaft kann verzichtet werden, wenn das Thermoelement zu ungunsten der Anzeigegeschwindigkeit mit einer Schutzhaut überzogen oder durch gasdichte Schutzrohre umhüllt wird.

Im Kapitel 1 hatten wir erkannt, daß ein Temperaturfühler umso weniger das Temperaturfeld des Prüflings stört und umso schneller den Temperaturänderungen des Prüflings folgt, je kleiner seine Wärmekapazität ist. Gerade die Thermoelemente bieten die Möglichkeit Temperaturfühler sehr kleiner Wärmekapazität und damit fast trägheitsloser Anzeige zu konstruieren. Das Material der Thermoschenkel wird zu dünnen Drähten ausgezogen und an der Meßstelle zu einer kleinen Perle meist mittels Lichtbogen verschweißt. Eine weitere Anforderung, die wir an die Werkstoffe stellen müssen, ist: leichte Bearbeitbarkeit.

Fassen wir die Gesichtspunkte, denen wir bei der Auswahl der Werkstoffe für die Thermoschenkel Beachtung schenken müssen, nochmal kurz zusammen:

1. Hohe Meßempfindlichkeit
2. Lineare Charakteristik
3. Austauschbarkeit ohne die Anzeigegeräte nacheichen zu müssen
4. Beständigkeit gegen chemische und physikalische Einflüsse
5. Leichte Bearbeitbarkeit

3.313 Die gebräuchlichsten Thermoelemente und ihre Grundwertreihen

In der Praxis der Betriebsmeßtechnik findet nun eine große Anzahl Materialien Verwendung, die nach den oben genannten Bedingungen ausgesucht wurden. Aus dieser Vielzahl von Thermopaaren sind in Deutschland durch DIN 43710 vier Thermoelemente eingeführt, deren Charakteristik weitgehend mit den im Ausland benutzten übereinstimmt.

Es sind die Thermopaare:

- Kupfer - Konstantan (Cu-Konst)
- Eisen - Konstantan (Fe-Konst)
- Chromnickel-Nickel (NiCr-Ni)
- Platinrhodium-Platin (PtRh-Pt)

Während die ersten drei Elemente zur Gruppe der "unedlen" Thermopaare gehört, zählt das letzte, aus dem Edelmetall Platin bestehende, zur Gruppe der "edlen" Thermopaare.

Die wichtigsten Bestandteile dieser Werkstoffe finden Sie in der folgenden Tabelle:

Thermodraht	Kurz-zeichen	Polari-tät	Zusammensetzung DIN 43710
Kupfer	Cu	+	Elektrolytkupfer DIN 46431; Cu 100 %
Constantan	Konst	-	Cu 55 %; Ni 45 %; (M_n)
Eisen	Fe	+	technisch reines Eisen
Chromnickel	NiCr	+	Ni 85 %; Cr 10 %; M_n 3,3 %
Nickel	Ni	-	Ni 95 %; M_n 4 %; Al 1 %
Platinrhodium	PtRh	+	Pt 90 %; Rh 10 %
Platin	Pt	-	Pt 100 % (physikalisch fein)

Diese Metalle und Legierungen können nun so genau hergestellt werden, daß die Austauschbarkeit gewährleistet ist und die in den Grundwertreihen angegebenen Toleranzen eingehalten,

ja sogar weit unterschritten werden können. Unter "Grundwerten" für elektrische Thermometer versteht man nach DIN 16 160 die Werte, die die Beziehung zwischen Temperatur und elektrischer Meßgröße (bei den Thermoelementen ist das die Spannung) wiedergeben. Die Grundwertreihen für die genormten Thermoelemente enthalten also die zu den Temperaturen gehörenden Spannungen und die zulässigen Abweichungen.

Thermospannung und zulässige Abweichung in mV

Meßtemp. °C	Cu-Konst.		Fe-Konst.		NiCr-Ni		PtRh-Pt	
	Grund- Wert	zul. Abw.	Grund- wert	zul. Abw.	Grundw.	zul. Abw.	Grund- wert	zul. Abw.
-200	-5,70	±0,5	-8,15	±0,5				
-100	-3,40	±0,3	-4,60	±0,4				
0	0	-	0	-	0	-	0	-
100	4,25	±0,3	5,37	±0,4	4,04	±0,3	0,64	±0,65
200	9,20		10,95		8,14		1,44	
300	14,89	±0,4	16,55		12,24		2,32	
400	20,99		22,15		16,38		3,26	
500	27,40	±0,4	27,84		20,64		4,22	
600	34,30	±0,6	33,66		24,94	±0,4	5,23	
700			39,72	±0,8	29,15		6,27	
800			46,23		33,27		7,34	
900			53,15		37,32		8,45	
1000					41,32		9,60	
1100					45,22	±0,6	10,77	
1200					49,02		11,97	
1300							13,17	
1400							14,38	
1500							15,58	
1600							16,67	

Die in der Tabelle enthaltenen Werte beziehen sich auf eine Temperatur von 0 grd C an der Vergleichsstelle. Die stark ausgezogene Stufenlinie begrenzt auf Grund von Betriebserfahrungen den Meßbereich für Dauerbenutzung.

Die unedlen Thermopaare, wie Eisen-Konstantan, Kupfer-Konstantan, Kupfer-Konstantan und Chromnickel-Nickel geben verhältnismäßig hohe Thermospannungen. Es treten jedoch bei Dauerbenutzung von Thermoelementen der Konstantangruppe bei Temperaturen über 600 grd C und bei Chromnickel-Nickel über 900 grd C Alterungserscheinungen auf, die wesentliche Meßfehler hervorrufen. Die Einwirkung aggressiver Gase verringert die Lebensdauer der Thermoelemente. Hiervon wird besonders die Konstantangruppe betroffen, die wenig korrosionsfest ist und gegebenenfalls in gasdichten Schutzrohren eingesetzt werden muß. Das Chromnickel-Nickel-Element ist gegen oxydierende Gase sehr beständig. Von schwefelhaltigen Gasen wird der Ni-Schenkel allerdings schon ab 400 grd C angegriffen. Das PtRh-Pt-Element erzeugt etwa nur ein Fünftel der Thermospannung, die ein unedles Paar abgibt. Dafür ist seine Konstanz und Genauigkeit wesentlich größer als die der unedlen Elemente. Alterungsfehler treten erst bei Temperaturen über 1300 grd C auf. Es ist aber empfindlich gegen Metalldämpfe, Schwefel, Arsen und Silizium. Spuren dieser Stoffe setzen die Lebensdauer herab und ändern die EMK empfindlich. Die in der Grundwertreihe zugelassenen Toleranzen erscheinen recht groß. Sie betragen im Mittel für die unedlen Elemente etwa $\pm 0,4$ mV entsprechend $\pm 8^\circ$ C und für PtRh-Pt etwa $\pm 0,04$ mV entsprechend $\pm 5^\circ$ C. Für einfache Kontrollmessungen hoher Temperaturen reicht das aus. Von den Herstellerfirmen werden auf Wunsch auch Thermopaare mit engeren Toleranzen gegen entsprechenden Aufpreis geliefert. Die Normen nehmen Rücksicht auf die industriellen Fertigungsmöglichkeiten mit tragbaren wirtschaftlichem Aufwand und setzen die Toleranzen so hoch, daß sie unbedingt unterschritten werden. Für präzise Temperaturmessungen ist es ratsam, Thermoelemente zu verwenden, die individuell geeicht worden sind, d.h. deren Thermospannungskurve durch Vergleich mit einem Normallement oder durch Anschluß an die Fixpunkte der Temperaturskala (Kap. 2, Tab. 1) ermittelt wurde.

3.314 Drahtstärken und Isolierung der Thermoschenkel

Das Drahtmaterial der einzelnen Thermoschenkel ist in DIN 43712 in seinen Abmessungen genormt. Bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen findet eine Wärmeableitung von der Meßstelle zur Vergleichsstelle statt, die umso größer wird, je dicker der Draht der Schenkel ist. Aus diesen Gründen erscheint es ratsam, den Drähten einen möglichst kleinen Querschnitt zu geben. Die praktische Erfahrung zeigt aber, daß die Lebensdauer der Drähte schnell mit dem Querschnitt abnimmt. Der Drahdurchmesser wird bei unedlen Elementen größer sein als bei edlen und wird auch mit der Größe der Verwendungstemperatur wachsen. Der kleinste Normdurchmesser für Cu-Konst. Elemente ist 0,5 mm, für Fe-Konst 1,0 mm, für NiCr-Ni 1,38 mm. Für PtRh-Pt sind aus Gründen der Materialsparnis die Durchmesser 0,35 mm und 0,5 mm gewählt worden.

Die beiden Thermoschenkel können bei Verwendungstemperaturen bis 150 grd C durch Weichlöten, bis 700° durch Hartlöten, über 700° durch autogenes oder elektrisches Schweißen miteinander verbunden werden. Das Löts- und Schweißmaterial hat keinen Einfluß auf die EMK (Siehe 3.3).

Es erscheint selbstverständlich, daß die beiden Thermoschenkel sowie die Leitungen bis zu den Klemmen des Anzeigegerätes gegeneinander gut elektrisch isoliert sein müssen. Es muß aber erwähnt werden, daß diese Isolation gleichzeitig ein Schutz gegen das Verdampfen und Niederschlagen des einen Materials auf das andere sein soll. Das trifft besonders auf Elemente der Platingruppe zu.

Man benutzt als Isolation bei Temperaturen

- bis zu 50 grd C Gummi oder Plast-Werkstoffe,
- 120 " C Umspinnung mit Textilfasern oder Papier,
- 200 " C Lackierung und zusätzliche Umhüllung mit temperaturbeständigen Plasten,
- 300 " C Glasfaserumspinnung,
- 1400 " C Keramikrörhrchen,
- über 1400 " C Rörhrchen aus gesintertem Aluminium-Oxyd.

Die keramischen Isolationsröhrenchen sind in DIN 43724 genormt. Sie bestehen für die unedlen Elemente aus kurzen, aneinander geschobenen Stücken, ähnlich den Isolationsröhrenchen für die Zuleitungsdrähte zum Heizwiderstand bei elektrischen Kochern und Bügeleisen (Bild 32 a, b), für die Platinelemente aus äußerlich glatten, aus einem Stück entsprechender Länge bestehenden Zylindern, die zwei Längsbohrungen besitzen, in die die Drähte eingezogen werden (Bild 32 c, d).

Asbest ist als Isolationsmaterial ungeeignet. Bei niederen Temperaturen nimmt es Feuchtigkeit auf, während bei höheren Temperaturen seine eigene Leitfähigkeit stark ansteigt, so daß eine einwandfreie Isolation nicht gewährleistet ist. Außerdem ist Asbest meist schwefelhaltig, was den Thermodrähten kaum zuträglich sein dürfte.

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 2,50

Aq 616/ 175 /62

Best.-Nr. 1004-04/62

