



Temperaturmessungen bei Abnahmeversuchen und in der Betriebsüberwachung (Temperaturmeßregeln)

TGL 0-1953

Gruppe 375

Arbeitsmittel

Zur Anwendung empfohlen

Inhalt

Table with 2 columns: Page number and Title. Includes sections 1-9 covering various temperature measurement methods and standards.

Bestätigt am 11.11.1960, Amt für Standardisierung, Berlin

Fortsetzung Seite 2 bis 43

VE Wohnungsbaukombinat

„Wilhelm Pieck“

Karl-Marx-Stadt

KB Projektierung

501 Karl-Marx-Stadt

Karl-Marx-Allee 8

(5029)

Verlag: Staatsverlag der DDR, 108 B - Bezug: Staatsverlag der DDR, Bereich Standardverlag, 701 - g, Postfach 1044

(600) Lizenz-Nr. 751 - 0.120 77

1. Grundsätzliches zur Temperaturmessung

1.1 Anwendung der Regeln

1.11 Die Temperaturregeln geben Richtlinien für genaue technische Temperaturmessungen. Sie stützen sich auf die im Schrifttum vorliegenden theoretischen und experimentellen Arbeiten, in welchen weitere Auskunft zu finden ist (Schrifttumverzeichnis Seite 38). Für die Bezeichnungen sind die neuen standardisierten Begriffe für Thermometer benutzt, wie sie in den DIN und TGL (siehe Schrifttum) niedergelegt sind. Eine Übersicht über die Temperaturbereiche der gebräuchlichsten zur Verwendung kommenden Temperaturmeßgeräte geben Bild 1 und Tafel 1.

geräte vor und nach dem Versuch fordern (siehe Ziffer 5 und 6.5). Wenn nichts anderes vereinbart, ist diese Prüfung von einem unabhängigen Sachverständigen vorzunehmen.

Eine strenge Trennung zwischen Messungen bei Abnahmeversuchen und Messungen im Betrieb ist nicht möglich. Für Messungen bei Abnahmeversuchen wird im allgemeinen eine größere Genauigkeit gefordert werden als für Messungen im Betrieb. Man wird jedoch keine umfangreichen baulichen Veränderungen vornehmen, nur um die Genauigkeit einer einmaligen Abnahmemessung zu erhöhen sowie auch zeitraubende Verfahren möglichst nicht anwenden. Bei Betriebsmessungen wird es mehr auf

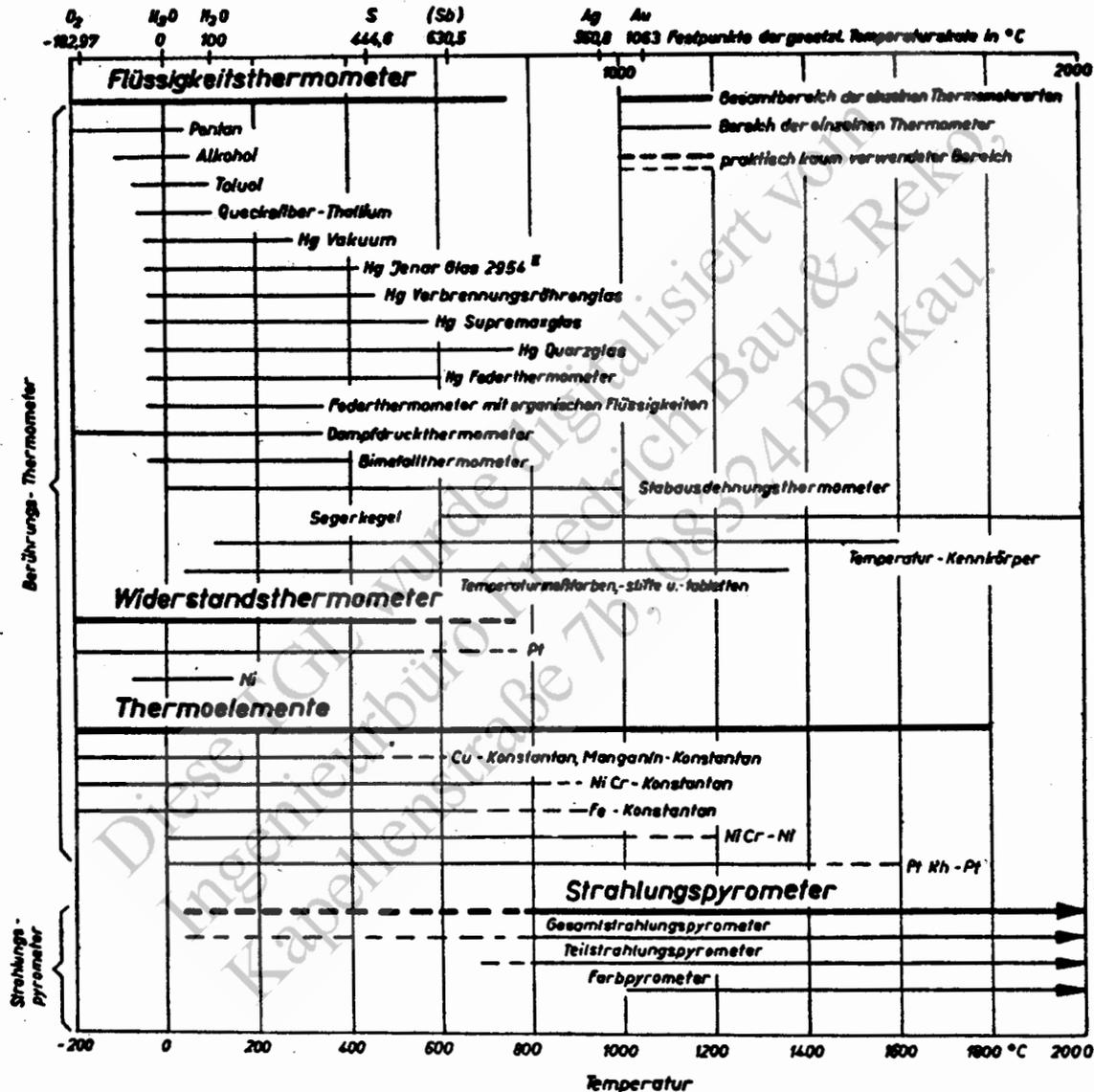


Bild 1
Verwendungsbereich der gebräuchlichsten Temperaturmeßgeräte

1.12 Bei Abnahmeversuchen sind amtlich geeichte oder mit amtlich geeichten Thermometern verglichene Temperaturmeßgeräte zu verwenden. Die Meßgeräte sind entsprechend der für die jeweilige Messung vorgeschriebenen Fehlergrenze auszuwählen. Jede Partei kann die Nachprüfung der verwendeten Temperaturmeß-

Dauerhaftigkeit und soliden Einbau der Meßeinrichtung ankommen. Auch gibt es Meßverfahren (siehe Ziffer 2.3, 2.4 und 7), die für Abnahmeversuche im allgemeinen nicht anwendbar sind, für betriebliche Messungen aber, etwa um Vergleichstemperaturen zu erhalten, sehr geeignet sein können. Im Text vorliegender Regeln sind Verfahren, welche für Abnahmeversuche nicht oder nur

Tafel 1: Übersicht über die Temperaturmeßgeräte

| Meßgerät, Meßverfahren | Muß die Meßstelle zugänglich sein? | Stromquelle notwendig? |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Flüssigkeits-Glasthermometer | ja | nein |
| Flüssigkeits-Federthermometer | nein | nein |
| Dampfdruck-Federthermometer | nein | nein |
| Metall-Ausdehnungsthermometer | nein | nein |
| Thermoelemente | nein | nur bei Kompensations-schaltung |
| Widerstandsthermometer | nein | ja |
| Leuchtdichte- und Farbpyrometer | muß sichtbar sein | ja |

| Meßgerät, Meßverfahren | Muß die Meßstelle zugänglich sein? | Stromquelle notwendig? |
|---|------------------------------------|------------------------|
| Gesamtstrahlungs-Pyrometer | mit Thermoelementen | muß sichtbar sein |
| | mit Photozellen | muß sichtbar sein |
| | mit Photoelementen | muß sichtbar sein |
| Temperaturbildmessung (Photothermometrie) | muß sichtbar sein | nein |
| Temperaturmeßfarben | ja | nein |
| Seegerkegel | muß sichtbar sein | nein |
| metall. Schmelzkörper | muß sichtbar sein | nein |

bei besonderen Abmachungen anwendbar sind, in Klein-druck wiedergegeben. Ebenso sind Absätze, die nur ergänzende Erläuterungen bringen, klein gedruckt.

1.2 Die Temperaturskala

1.21 Die Temperatur wird in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) nach der „gesetzlichen Temperaturskala“ [25] bis [27 b]†) gemessen. Diese Skala ist so genau, wie es die Meßverfahren zur Zeit ihrer Festlegung erlaubten, an die von der Art und Eigenschaft der Meßmittel unabhängige, thermodynamische Temperaturskala angeschlossen. Die thermodynamische Temperaturskala stimmt mit den Angaben eines Gasthermometers im Grenzfall verschwindend kleinen Druckes (ideales Gas) überein.

Die gesetzliche Temperaturskala beruht auf einer Anzahl Gleichgewichtstemperaturen, denen mit Hilfe des Gasthermometers bestimmte Zahlenwerte zugeteilt sind, und auf Interpolation und Extrapolation mittels verschiedener, genau definierter Meßverfahren.

Tafel 2: Gleichgewichtstemperaturen als Festpunkte beim Normdruck von $101\,325\text{ N/m}^2 = 760\text{ Torr}$ (in $^{\circ}\text{C}$)

| | | |
|---|-------|---------------|
| Siedepunkt des Sauerstoffs | ..... | — 182,97*) 1) |
| desgleichen beim Druck p | | |
| für $660\text{ Torr} < p < 860\text{ Torr}$: | | |
| $t_p = 182,97 + 0,01254 (b - 760)$ | | |
| $- 0,0000064 (b - 760)^2$ | | |
| $+ 0,000000005 (b - 760)^3$ | | |
| Sublimationspunkt der Kohlendioxid | ..... | — 78,5 |
| Erstarrungspunkt des Quecksilbers | ..... | — 38,87 |
| Schmelzpunkt des Eis | ..... | 0,000 |
| Umwandlungspunkt des Natrium-Sulfats | ..... | + 32,38 |
| Siedepunkt des Wassers | ..... | + 100*) 1) |
| desgleichen beim Druck p | | |
| für $660\text{ Torr} < p < 860\text{ Torr}$: | | |
| $t_p = 100 + 0,036858 (b - 760)$ | | |
| $- 0,00002015 (b - 760)^2$ | | |
| $+ 0,0000000162 (b - 760)^3$ | | |
| Siedepunkt des Naphthalins | ..... | + 218,0 |
| Erstarrungspunkt des Zinks | ..... | + 419,505 |
| Siedepunkt des Schwefels | ..... | + 444,6*) 1) |
| desgleichen beim Druck p | | |
| für $660\text{ Torr} < p < 860\text{ Torr}$: | | |
| $t_p = 444,6 + 0,09080 (b - 760)$ | | |
| $- 0,0000476 (b - 760)^2$ | | |
| $+ 0,000000044 (b - 760)^3$ | | |
| Erstarrungspunkt des Antimons | ..... | + 630,5 |
| Erstarrungspunkt des Silbers | ..... | + 960,8*) 2) |
| Erstarrungspunkt des Goldes | ..... | + 1063 |

1.22 Soweit im Text nicht anders angegeben, bedeutet T die in Grad Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) gemessene Kelvin-Temperatur, die mit der Celsius-Temperatur $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ durch die folgende Beziehung verknüpft ist:

$$T = t + 273,15.$$

Angenähert rechnet man oft mit $T = t + 273$.

1.3 Das Thermometer als Fremdkörper im Temperaturfeld

1.31 Bei Temperaturmessungen können durch eine nicht sachgemäße Wahl des Meßgerätes und durch seinen ungeeigneten Einbau große Meßfehler hervorgerufen werden. Bei der üblichen Art der Temperaturbestimmungen mit Hilfe von Berührungsthermometern (z. B. mittels Flüssigkeits-Glasthermometer, Thermoelemente oder Widerstandsthermometer) bringt man zur Messung der unbekanntenen Temperatur eines Körpers diesen mit einem Vergleichskörper (dem „Temperaturfühler“ des Thermometers) in Berührung. Die temperaturabhängigen Zustandsänderungen dieses Vergleichskörpers müssen vorher so genau bestimmt sein, daß man umgekehrt aus seinem Zustand auf seine Temperatur schließen kann. Bezeichnet man die Temperaturverteilung in dem zu untersuchenden Körper als sein „Temperaturfeld“, so stellt ein zur Temperaturmessung in ihn eingebrachtes Thermometer einen „Fremdkörper im Temperaturfeld“ dar. Beim Einbau eines solchen Thermometers können aus zwei verschiedenen Gründen Meßfehler entstehen [4], [5], [12], [20], [21]:

1. Wenn das Meßgerät der Meßstelle Wärme zudehrt von ihr abführt, so wird dadurch das Temperaturfeld gestört; es kann daher der Fall eintreten, daß das Meßgerät an der betreffenden Stelle gar nicht die ursprüngliche und wirklich verlangte, sondern die durch sein Einbringen veränderte Temperatur anzeigt.

†) Zahlen in [] sind Hinweise auf das Schrifttumverzeichnis Ziffer 8.

*) Gesetzliche Festpunkte (vgl. Schrifttumverzeichnis [26] bis [27]).

1) Zahlenangaben über die Druckabhängigkeit der Siedepunkte von Sauerstoff, Wasser und Schwefel siehe [26] und [27 a].

2) Beschluß der Conférence Generale des Poids et Mesures, Paris 1948.

2. Ferner kann sich bei der Temperaturmessung in einem strömenden Stoff (Flüssigkeit oder Gas) infolge des teils durch Leitung, teils durch Strahlung bedingten Wärmeaustausches des Meßgerätes mit der Rohrwand an der Meßstelle ein merklicher Temperaturunterschied zwischen dem Meßgerät und dem Stoff ausbilden. Das Meßgerät nimmt dann gar nicht die Temperatur des Stoffes an, und der bestehende Temperaturunterschied zwischen beiden stellt den begangenen Meßfehler dar.

1.32 Für den sachgemäßen Einbau der Berührungsthermometer (siehe Ziffer 4) ergeben sich also die beiden Vorschriften:

Erstens muß die Abfuhr oder Zufuhr von Wärme durch das Meßgerät so weit wie möglich verhindert werden;

zweitens muß der Wärmeaustausch zwischen dem zu untersuchenden Körper und dem Temperaturfühler begünstigt werden.

Die Gesetze der Wärmeübertragung sind daher bei Temperaturmessungen sorgfältig zu beachten.

1.33 Schon bei der Vorbereitung von Temperaturmessungen ist zu überlegen, welche Bedeutung den einzelnen Messungen zukommt, und es ist wenigstens abzuschätzen, welchen Einfluß ein Fehler der Temperaturmessung auf das Endergebnis der betreffenden Untersuchung haben wird. Hiemach haben sich dann die Anforderungen an die Genauigkeit und Anzeigeverzögerung der Meßgeräte und deren Einbau zu richten.

1.4 Anzeigeverzögerung und Halbwertzeit

1.41 Ein Temperaturmeßgerät darf erst abgelesen werden, wenn sich seine Anzeige dem richtigen Wert, welcher der zu messenden Temperatur entspricht, bis auf einen Unterschied genähert hat, der, verglichen mit der angestrebten Meßgenauigkeit, vernachlässigbar klein ist. Die bis zur Anzeige der richtigen Temperatur benötigte Zeit ist ein Erfahrungswert, der sich aus Versuchen ermitteln läßt.

Diese Anzeigeverzögerung (Einstellzeit) ist für die einzelnen Meßanordnungen verschieden groß und hängt bei solchen, die aus mehreren Teilen bestehen, von verschiedenen Größen ab, z. B. von dem temperaturempfindlichen Teil des Meßgerätes, also dem sogenannten Temperaturfühler selbst, von dem Anzeigegerät und von der Art des Einbaues. Sie soll möglichst klein sein.

Die Anzeigeverzögerung eines Meßgerätes oder einer Meßeinrichtung muß besonders beachtet werden, wenn die zu messende Temperatur veränderlich oder sogar raschem Wechsel unterworfen ist. Sie muß dann so gering sein, daß die Änderung der Anzeige und die Änderung der Temperatur möglichst gleich schnell erfolgen.

1.42 Eine charakteristische Größe für die Anzeigeverzögerung ist die Halbwertzeit H . Dies ist die Zeit, welche vergeht, bis das Thermometer den halben Wert einer plötzlich erfolgten Temperaturänderung anzeigt.

Bringt man ein Thermometer nämlich plötzlich in den Stoff von der zu messenden Temperatur t , so ist die jeweilige Differenz Δt der Anzeige des Thermometers

gegen die zu messende Temperatur bei Gültigkeit des Newtonschen Abkühlungsgesetzes gegeben durch:

$$\Delta t = \Delta t_0 e^{-\tau/c}$$

Hierin bedeuten:

τ die seit der erfolgten Temperaturänderung vergangene Zeit in Sekunden,

Δt_0 die Temperaturdifferenz zur Anfangszeit $\tau = 0$,

e die Basis des natürlichen Logarithmus,

c die Zeitkonstante des Thermometers.

Zwischen der Halbwertzeit H und der Zeitkonstanten c besteht bei exponentiell verlaufender Temperaturänderung die Beziehung:

$$H = c \ln 2 = 0,693 c.$$

Die Anzeige beträgt also nach Ablauf der Halbwertzeit H die Hälfte der Differenz zwischen Anfangstemperaturanzeige des Thermometers und wirklicher Temperatur; sie beträgt 90% nach Verlauf von $3,3 H$, 95% nach $4,3 H$, 98% nach $5,6 H$, 99% nach $6,7 H$, 99,5% nach $7,7 H$, 99,8% nach $9 H$.

Bei Kenntnis der Halbwertzeit kann man bei beliebigen Temperaturänderungen aus der angezeigten Temperatur die tatsächlich vorhandene Temperatur bestimmen, wenn der Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit bekannt ist. Umgekehrt kann man auf Grund der Temperaturänderungen und der Halbwertzeit das Thermometer so auswählen, daß der Meßfehler sehr klein wird [7].

1.43 Die Halbwertzeit hängt von der Art des Temperaturfühlers und seines Einbaues im Schutzrohr, von der Dicke, dem Durchmesser und dem Material des Schutzrohres, ferner von der Strömungsgeschwindigkeit und der Dichte des strömenden Stoffes ab. Bei den gebräuchlichen Thermometern beträgt die Halbwertzeit in Wasser und Dampf sowie in Metallschmelzen und Salzbadern 2 bis 60 Sekunden bei Verwendung von metallenen Schutzrohren. Bei keramischen Schutzrohren liegen die entsprechenden Halbwertzeiten zwischen 30 Sekunden und 3 Minuten.

1.44 In Luft und Gasen geringer Strömungsgeschwindigkeit ergeben sich je nach Bauart wegen des schlechten Wärmeüberganges Halbwertzeiten bis zu 20 Minuten. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur werden die Halbwertzeiten wesentlich kleiner.

1.45 Bei Thermometern, bei denen der temperaturempfindliche Teil (z. B. die Meßstelle eines Thermoelementes) aus gut leitendem Material besteht und in unmittelbarer Berührung mit dem Stoff steht, dessen Temperatur zu messen ist, ist die Anzeigeverzögerung umgekehrt proportional der Wärmeübergangszahl zwischen Temperaturfühler und untersuchtem Stoff und proportional der spezifischen Wärme und Dichte des Temperaturfühlers.

1.46 Für Thermometer, bei denen der temperaturempfindliche Teil eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzt oder bei denen eine wenn auch nur geringe schlechtleitende Schicht (Luft, Glas, Quarz oder keramische Körper) zwischen diesem Teil und der zu messenden Flüssigkeit vorhanden ist, gilt diese Proportionalität nicht mehr. Maßgebend für die Anzeigeverzögerung des Thermometers ist dann die Wärmeübergangszahl, die dem Thermometer entsprechend seinem Aufbau aus verschiedenen Stoffen zuzu-

ordnende mittlere Wärmedurchgangszahl und seine spezifische Wärmekapazität und Dichte. In beiden Fällen spielen außerdem die Abmessungen und die Oberflächengestaltung des Thermometers eine Rolle [7].

1.47 Für beliebige Thermometer läßt sich die Halbwertzeit in dem zu untersuchenden Mittel bestimmen, wenn die Halbwertzeit des Thermometers in zwei Bezugstoffen, z. B. in Luft und in Wasser sowie die Wärmeübergangszahlen in Luft, Wasser und in dem zu untersuchenden Mittel bekannt sind [7], [23].

1.5 Fehler und Fehlergrenze

1.51 Der Fehler ergibt sich aus der Differenz des gemessenen „Istwertes“ gegen den wahren „Sollwert“ [14]: Fehler = Istwert minus Sollwert = falsch minus richtig. Der Fehler ist demnach positiv, wenn der gemessene Wert zu groß ist. Fehler, die bei Wiederholungen der Messung nach Größe und Vorzeichen in unbestimmter Weise schwanken, heißen „zufällige Fehler“. Durch sie wird die „Streuung“ hervorgerufen, die durch den Mittelwert der Abweichungen der gefundenen Einzelwerte von ihrem Durchschnitt ausgedrückt wird.

Die Fehlergrenze eines Meßgerätes ist dadurch gegeben, daß die Fehler aller mit ihm festgestellten Meßwerte unter bestimmten Bedingungen innerhalb dieser Grenze liegen. Sie kann z. B. durch den dreifachen Wert der Streuung angegeben werden. Die „systematischen Fehler“, d. h. die feststellbaren und durch Korrektur zu beseitigenden oder durch erfaßbare Umwelteinflüsse hervorgerufenen Fehler, sind bei der Auswertung der Messung zu berichtigen. Falls man hierauf verzichtet, sind sie wie zufällige Fehler zu behandeln. Werden systematische Fehler nicht berichtigt, so ist der Meßwert mit einer Fehlergrenze behaftet, die auch die größten möglichen systematischen Fehler einschließt und die bei der Auswertung des Meßergebnisses in folgender Weise aus den einzeln ermittelten Fehlergrenzen $f_1, f_2, f_3 \dots$ zu berechnen ist:

Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz [10] ist der Gesamtfehler eines Produktes oder Quotienten aus mehreren Faktoren gleich der Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate der Fehler der einzelnen Faktoren. Die gesamte Fehlergrenze F einer Meßeinrichtung bestimmt man in gleicher Weise aus den einzeln ermittelten Fehlergrenzen $f_1, f_2, f_3 \dots$ (Einzelfehlergrenzen). Es ist also

$$F = \pm \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + \dots}$$

1.52 Bei der Bestimmung der Gesamtfehlergrenze, mit der das Ergebnis einer Temperaturmessung zu gelten hat, sind folgende Einzelfehlergrenzen zu berücksichtigen:

1. Die Fehlergrenze infolge der im Temperaturfühler liegenden Fehlermöglichkeiten (also z. B. die Fehlergrenze, die sich aus den Werten ergibt, um die die wahren Werte von den durch die Eichkurve festgelegten Meßwerten abweichen können).
2. Die Fehlergrenze infolge etwa vorhandener Einflüsse der Schalt- und Übertragungsorgane (also z. B. infolge der unberücksichtigten Temperaturschwankungen

der Zuleitung bei Flüssigkeitsfederthermometern oder bei elektrischen Meßgeräten).

3. Die Fehlergrenze infolge der Ungenauigkeit des Anzeigerätes.

1.53 Bei den Flüssigkeits-Glasthermometern bilden Temperaturfühler, Übertragungsorgane und Anzeigeteil ein untrennbares Ganzes. Für diese Thermometer sind daher in der Tafel 4 die Gesamtfehlergrenzen angegeben, da die Einzelfehlergrenzen schwer zu erfassen sind. Für Flüssigkeits-Federthermometer und für die elektrischen Berührungsthermometer sind in Ziffer 2.23, 3.18 und 3.25 die Einzelfehlergrenzen der einzelnen Organe der Meßgeräte gesondert angegeben.

1.54 Die Einzelfehlergrenzen können je nach Zweckmäßigkeit ausgedrückt werden:

1. in Einheiten der gemessenen Größe,
2. in Prozenten vom Sollwert,
3. in Prozenten vom Meßbereich.

Zur Bestimmung der Gesamtfehlergrenze aus den Einzelfehlergrenzen müssen diese in gleichartige Ausdrücke umgerechnet werden. Zweckmäßig wird die Gesamtfehlergrenze in Einheiten der gemessenen Größe angegeben.

Die Gesamtfehlergrenze, die sich aus den in den einzelnen Abschnitten angegebenen Einzelfehlergrenzen ergibt, gilt unter der Voraussetzung vollkommen einwandfreien Einbaues des Temperaturfühlers.

2 Mechanische Berührungsthermometer

2.1 Flüssigkeits-Glasthermometer

2.11 Allgemeines

Mit Flüssigkeiten gefüllte Glasthermometer sind die einfachsten und gebräuchlichsten Meßgeräte für Temperaturen von etwa -200 bis $+580$ °C [75], [76]. Für höhere Temperaturen (bis $+750$ °C) werden Thermometer aus Quarz verwendet. Die folgenden Ausführungen gelten sinngemäß auch für diese.

2.111 Im allgemeinen wird zwischen Laboratoriums- und Betriebsthermometern unterschieden. Zu den Laboratoriumsthermometern (siehe Ziffer 8.9) gehören die chemischen Thermometer, Spezialthermometer wie Thermometer für Ölmessungen und Destillationsbestimmungen, Beckmann-Thermometer und dergleichen mehr. Unter Betriebsthermometern (Ziffer 8.9) werden im allgemeinen Stock- und Winkelthermometer mit und ohne Schutzrohr verstanden.

2.112 Flüssigkeits-Glasthermometer können als Einschlußthermometer oder Stabthermometer (bis 750 °C) ausgeführt sein. Bei den Einschlußthermometern ist ein Kapillarrohr gemeinsam mit einem Skalenträger in einem Hüllrohr befestigt. Stabthermometer bestehen aus einem starkwandigen Kapillarrohr mit aufgezätzter Teilung.

2.113 Bei Verwendung von Flüssigkeits-Glasthermometern muß die Meßstelle gut zugänglich sein. Bei der Ablesung ist auf die Vermeidung der Parallaxe zu achten, d. h. das Auge des Beobachters und die Flüssigkeitskuppe

des Thermometers sind in eine zur Achse des Flüssigkeitsfadens senkrechte Ebene zu bringen.

Tafel 3 gibt den Verwendungsbereich sowie den Ausdehnungsbeiwert γ für die Berechnung des Fadenfehlers (siehe Ziffer 2.13) einiger Flüssigkeits-Glasthermometer an.

Tafel 3: Flüssigkeits-Glasthermometer

| Flüssigkeit | Verwendungsbereich °C | Mittlerer Beiwert $\gamma^{(4)}$ für Fadenfehler |
|--|--------------------------|---|
| Quecksilber ³⁾ ohne Gasfüllung | - 38 bis +280 | $\frac{1}{6100}$ |
| Quecksilber mit Gasfüllung | - 38 bis +750 | $\frac{1}{6100}$ |
| Technisches Pentan. | -200 bis + 20 | $\frac{1}{1000}$ |
| Alkohol | -110 bis + 50 | $\frac{1}{1000}$ |
| Toluol | - 70 bis +100 | $\frac{1}{1000}$ |

2.12 Bauarten

2.121 Quecksilber-Glasthermometer.

2.121.1 Quecksilber ist oberhalb seines bei $-38,9^{\circ}\text{C}$ gelegenen Schmelzpunktes eine geeignete thermometrische Flüssigkeit für Glasthermometer. Bei Thermometern für Temperaturen bis 280°C wird der Raum über dem Quecksilberfaden zur Vermeidung von Oxydation luftleer gemacht.

2.121.2 Bei höheren Temperaturen besteht die Möglichkeit, daß Quecksilber verdampft und im oberen Teile der Kapillare kondensiert oder daß sich der Quecksilberfaden in einzelne Teile trennt. Um dies zu vermeiden, wird der Raum über dem Quecksilberfaden bei Thermometern für Temperaturen über 280°C nicht evakuiert, sondern mit einem das Quecksilber chemisch nicht angreifenden Gase, z. B. mit trockenem Stickstoff oder Argon unter Druck gefüllt. Bei Betriebsthermometern kann eine Druckfüllung auch bei niedrigeren Skalenendwerten vorteilhaft sein, weil sie ein Trennen des Quecksilberfadens verhindert. In jedem Falle muß man sich davon überzeugen, daß der Quecksilberfaden des Glasthermometers sich nicht getrennt hat und daß keine Quecksilberteilchen über der Kuppe kondensierten.

2.122 Thermometer mit organischen Flüssigkeiten.

2.122.1 Für die Messung tiefer Temperaturen (bis -200°C) werden Thermometer mit organischen Flüssigkeiten verwendet. Die Verwendungsbereiche für Thermometer mit den drei wichtigsten organischen Flüssigkeiten (Alkohol, Toluol und technisches Pentan) sind mit in Tafel 3 angegeben.

2.122.2 Bei den meisten Thermometern mit organischen Flüssigkeiten sinkt der Nullpunkt mit der Zeit ab. Sie sind daher in kurzen Zeitabständen auf die Richtigkeit der Nullpunktlage zu überprüfen. Ihre Anzeigeverzögerung ist größer als die von Quecksilberthermometern.

³⁾ Mit Quecksilber-Thallium-Thermometern, gefüllt mit einer Legierung von $8,5\%$ Tl und $91,5\%$ Hg, lassen sich Temperaturen bis -58°C messen [82].

⁴⁾ Beiwert abhängig von der Glassorte und von der Temperatur.

2.122.3 Thermometer mit organischen Flüssigkeiten dürfen nur allmählich vom unteren Ende des Gefäßes her abgekühlt werden, um ein Abreißen des Fadens zu verhindern und ein Abfließen der an der Wand haftenden Flüssigkeit zu erreichen.

2.13 Der herausragende Faden

2.131 Thermometer sollten so benutzt werden, daß sich der ganze Flüssigkeitsfaden in dem Raume befindet, dessen Temperatur gemessen werden soll. Ist dies nicht möglich, so ist bei der Ermittlung der Temperatur die Länge des herausragenden Fadens und dessen mittlere Temperatur zu berücksichtigen, falls das Thermometer nicht unter denselben Bedingungen mit herausragendem Faden geeicht ist.

2.132 Da „Betriebsthermometer“ meist mit herausragendem Faden benutzt werden, so werden diese, namentlich die mit Schutzrohren versehenen Einschlußthermometer, fast allgemein auch mit herausragendem Faden, jedoch ohne Schutzrohr, geeicht. Sollen derartige Thermometer der Eichordnung genügen, so müssen sie auf der Rückseite des Skalenträgers eine Aufschrift tragen, welche die Eintauchtiefe und die Temperatur des herausragenden Fadens bei der Prüfung angibt.

2.133 Ist das Thermometer ohne Herausragen des Fadens geeicht, besitzt es dagegen bei der Anwendung einen herausragenden Faden von n grad, so berechnet sich die Temperatur t (siehe Bild 24) aus der abgelesenen Temperatur t_a zu

$$t = t_a + n \gamma (t_a - t_f).$$

Hierin bedeuten:

t_f die mittlere Temperatur des herausragenden Fadens, γ den scheinbaren Ausdehnungsbeiwert der Thermometerflüssigkeit im Glase (siehe Tafel 3).

2.134 Die Länge des herausragenden Fadens ist von der Stelle ab zu messen, wo der Flüssigkeitsfaden des Thermometers aus dem Bereich der zu messenden Temperatur austritt.

2.135 Angenähert mißt man die mittlere Fadentemperatur, indem man ein gewöhnliches Thermometer in mittlerer Höhe des herausragenden Fadens neben diesem aufhängt. Für die genauere Messung der Fadentemperatur sind besondere Fadenthermometer in Gebrauch. Das Mahlkesche Thermometer [80], [81], eignet sich besonders für die Verwendung in Prüfbädern.

Da die mittlere Fadentemperatur meist nicht einwandfrei bestimmbar ist, soll der herausragende Faden möglichst kurz sein.

2.14 Messung bei Überdrücken

Glasthermometer werden unter Umständen mit unten offenem Schutzrohr versehen, so daß das zu messende Mittel das Flüssigkeitsgefäß unmittelbar umspült. Betriebsmäßig wird dieser Einbau nur bei geringen Überdrücken des zu messenden Stoffes verwendet. Er besitzt den Vorzug, daß die Halbwertzeit (Ziffer 1.4) und der durch Wärmeableitung hervorgerufene Meßfehler (Ziffer 4.43) klein werden. Bei Überdrücken von mehr als 1 at sind geschlossene Schutzrohre zu verwenden.

2.15 Messung kleiner Temperaturunterschiede

Zur Feststellung von äußerst kleinen Temperaturunterschieden können die Einstell-(Beckmann-)Thermometer

Tafel 4: Zulässige Fehlergrenzen der Flüssigkeits-Glaskthermometer bei der amtlichen Eichung

a) mit organischer (benetzender),
thermometrischer Flüssigkeit:b) mit Quecksilber bzw. Quecksilber-Thallium-Legierung
(nicht benetzender, thermometrischer Flüssigkeit):

| Temperaturbereich in °C | Fehlergrenze in ± grd bei Einteilung in grd | | | | Temperaturbereich in °C | Fehlergrenze in ± grd bei Einteilung in grd | | | | | | | | |
|----------------------------|--|---|---|-----------------|----------------------------|--|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----------------|
| | 0,5 | 1 | 2 | 5 oder 10 | | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 oder 10 |
| von -190 bis -60 | — | 3 | 4 | 6 | von -58 bis -5 | — | — | — | 0,3 | 0,4 | 0,7 | 1 | 2 | 3 |
| über -60 bis -5 | 1 | 2 | 4 | 6 | über -5 bis +60 | 0,02 | 0,04 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,5 | 0,7 | 1 | 2,5 |
| über -5 bis +60 | 1 | 1 | 2 | 5 | über +60 bis +110 | — | 0,04 | 0,15 | 0,25 | 0,3 | 0,5 | 1 | 1,5 | 3 |
| über +60 bis +110 | 1 | 2 | 3 | 6 | über +110 bis +210 | — | — | — | — | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 4 |
| über +110 bis +210 | — | 3 | 4 | 8 | über +210 bis +310 | — | — | — | — | — | 1,5 | 2 | 3 | 5 |
| | | | | | über +310 bis +410 | — | — | — | — | — | — | 2,5 | 4 | 7 |
| | | | | | über +410 bis +625 | — | — | — | — | — | — | 3 | 5 | 10 |
| | | | | | über +625 | — | — | — | — | — | — | — | 6 | 10 |

benutzt werden. Sie haben bei einer Länge der Kapillare von etwa 25 cm bei wechselnd einstellbarer Ausgangstemperatur einen Anzeigebereich von nur einigen Graden, der in hundertstel Grade geteilt ist und noch tausendstel Grade zu schätzen gestattet. Da bei den Einstell-Thermometern die Quecksilbermenge bei den einzelnen Einstellungen verschieden ist, ändert sich der Skalenwert für jede Einstellung. Die Ablesungen sind daher jeweils mit den im Eichschein angegebenen Gradwerten zu multiplizieren.

2.16 Fehlergrenzen der Flüssigkeits-Glaskthermometer
In Tafel 4 sind die Eichfehlergrenzen der Flüssigkeits-Glaskthermometer angeführt. Diese Fehlergrenzen geben jene Anzeigefehler an, die ein Flüssigkeitsthermometer aufweisen darf, wenn es zur amtlichen Eichung zugelassen werden soll.

Nicht amtlich geeichte, handelsübliche Betriebsthermometer können jedoch auch größere Fehler aufweisen.

2.2 Flüssigkeits-Federthermometer

2.21 Beschreibung

2.211 Flüssigkeits-Federthermometer bestehen aus dem Temperaturfühler (mit Flüssigkeitsinhalt), einer als Kapillarrohr ausgebildeten Fernleitung und dem elastischen Meßglied im Anzeige- bzw. Schreibeil (Bild 2). Die Ausdehnung der Flüssigkeit wird durch Formänderungen einer Rohrfeder (Bourdonfeder) mit flachgedrücktem Querschnitt angezeigt.

2.212 Als Flüssigkeit dienen Quecksilber unter einem Druck von 100 bis 150 at oder organische Flüssigkeiten (Toluol) unter einem Druck von 5 bis 50 at.

Quecksilber-Federthermometer haben eine nahezu gleichmäßige Skalenteilung; sie lassen sich für Temperaturbereiche zwischen -35°C und $+600^{\circ}\text{C}$ herstellen.

2.213 Soll die Temperatur von chemisch angreifenden Stoffen gemessen werden, so kann man das Tauchrohr des Flüssigkeits-Federthermometers aus Werkstoffen aufbauen, die gegen den zu messenden Stoff beständig sind; auf die Verwendung eines besonderen Schutzrohres (vgl. Ziffer 4.42) kann dann verzichtet werden. Das Tauchrohr kann so ausgeführt werden, daß Messungen auch bei höheren Drücken ohne Schutzrohr möglich sind (vgl. Ziffer 2.235).

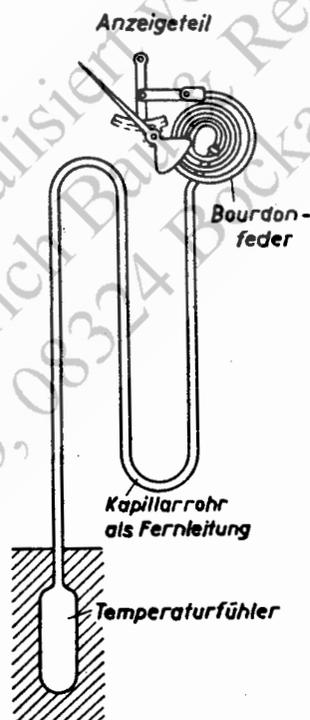


Bild 2
Wirkungsweise des
Flüssigkeits-
Federthermometers

2.214 Bei Flüssigkeits-Federthermometern bilden der Temperaturfühler mit Tauchrohr, der starre Hals oder die bewegliche Fernleitung und der Anzeigeteil ein untrennbares Ganzes. Hierdurch wird die Verwendung von Flüssigkeits-Federthermometern an „fliegenden“ Meßstellen erschwert. In dieser Beziehung sind Glaskthermometer für örtliche Ablesung und elektrische Temperaturmeßgeräte für Fernübertragung der Meßwerte von Vorteil (vgl. Tafel 1).

2.215 Wird auf besonders geringe Anzeigeverzögerung Wert gelegt, so wird das Verhältnis von Oberfläche zum Durchmesser des Temperaturfühlers vergrößert, so daß ein schnellerer Temperaturengleich eintritt.

2.216 Zur Messung der mittleren Temperatur eines ausgedehnten Raumes wird der Temperaturfühler als Rohr von kleinem Durchmesser und größerer Länge ausgebildet.

2.22 Einfluß der Außentemperatur
Flüssigkeits-Federthermometer ergeben in ihrem ein-

fachsten Aufbau wie Flüssigkeits-Glasthermometer einen Fehler, wenn die außerhalb des zu messenden Temperaturfeldes befindliche Flüssigkeitsmenge eine andere Temperatur hat als bei der Prüfung (vgl. Ziffer 2.233). Der hierdurch entstehende Anzeigefehler wird aber bei manchen Ausführungen ganz oder teilweise ausgeglichen. Man unterscheidet dementsprechend:

- a) Flüssigkeits-Federthermometer mit vollkommenem Ausgleich des Temperatureinflusses auf Anzeigeteil und Fernleitung. Neben der vom Temperaturfühler ausgehenden Fernleitung ist eine zweite gleichartige (blinde) Leitung ohne Temperaturfühler verlegt. Der Anzeigeteil besitzt für jede der beiden Leitungen eine Bourdonfeder, der Unterschied der Auslenkung der Federn wird angezeigt. Die beiden Fernleitungen können äußerlich auch zu einer einzigen Leitung zusammengefaßt sein.
- b) Flüssigkeits-Federthermometer mit Ausgleich des Temperatureinflusses auf den Anzeigeteil durch ein temperaturabhängiges Glied, z. B. aus Bimetall (siehe Ziffer 2.42) im Anzeigeteil (gebräuchlich für kürzere Leitungslängen).
- c) Flüssigkeits-Federthermometer ohne Ausgleich (einfache Ausführung).

2.23 Fehler und Fehlergrenzen

2.231 Alterung

2.231.1 Flüssigkeits-Federthermometer zeigen in der ersten Zeit nach ihrer Herstellung ein Nachlassen der Anzeige. Sie dürfen daher nur in gealtertem Zustand benutzt werden. Von namhaften Firmen bezogene Quecksilber-Federthermometer sind bereits gealtert und auf den zeitlichen Bestand ihrer Anzeige geprüft. Dennoch ist eine Nachprüfung nach einigen Betriebswochen angezeigt.

2.231.2 Flüssigkeits- und insbesondere Quecksilber-Federthermometer werden stets mit einer Zeigereinstellvorrichtung versehen, die eine nachträgliche Berichtigung der Anzeige (z. B. wegen des Höhen- oder des Druckeinflusses, vgl. Ziffer 2.234 und 2.235) gestattet und deshalb nach der Eichung plombiert werden sollte. Sie sollten nach einer ersten Betriebszeit von einigen Wochen mit einem anderen, amtlich geeichten Thermometer verglichen werden. Eine etwaige nachträgliche Veränderung, die bei sorgfältiger Alterung im allgemeinen nicht auftritt, läßt sich dann mit der Zeigereinstellvorrichtung berücksichtigen.

2.232 Fehlergrenze des Anzeigeteils

2.232.1 Die Fehlergrenze des Anzeigeteils beträgt im allgemeinen $\pm 0,5$ bis $1,5\%$ des Anzeigebereichs. Ein Wert von $\pm 1\%$ gilt dabei für gute Anzeige- und Schreibeile bei üblichen Anzeigebereichen.

Die hier angegebene Gesamtfehlergrenze faßt die mechanische Fehlergrenze des Anzeigeteils und diejenige infolge von Ungenauigkeiten bei der Eichung zusammen. — Die Zahlenwerte gelten für übliche Anzeigebereiche (z. B. 0 bis 100°C , 50 bis 300°C , 100 bis 500°C oder ähnliche Bereiche).

2.232.2 Bei Flüssigkeits-Federthermometern kann der Anzeigebereich beschränkt werden (Nullpunktunterdrückung), z. B. auf 200 bis 300°C . Bei Beschränkung des Anzeigebereichs erleidet die mechanische Fehlergrenze des Anzeigeteils (bezogen auf den Anzeigebereich) keine Ände-

rung. Bei stark unterdrücktem Anzeigebereich ist die Fehlergrenze des Anzeigeteils (bezogen auf den Anzeigebereich) höher anzunehmen, als oben angeführt. Sie richtet sich in diesem Falle im wesentlichen nach den Hilfsmitteln und der Sorgfalt bei der Prüfung und ist vom Hersteller zu erfragen.

2.233 Einfluß von Temperaturschwankungen an der Fernleitung und am Anzeigeteil

1. Bei vollkommenem Ausgleich nach Ziffer 2.22 a) tritt eine Vergrößerung der unter Ziffer 2.232 angegebenen Fehlergrenze nicht ein, solange die Temperatur um nicht mehr als ± 30 grad von der bei der Eichung (Prüfung) abweicht.
2. Bei Quecksilber-Federthermometern nach Ziffer 2.22 b) findet man je 1 m Länge und je ± 1 grad Temperaturänderung der Fernleitung und des Anzeigeteils Fehlanzeigen von $\pm 0,005\%$ bis $\pm 0,01\%$ des Anzeigebereiches. Überschläglich rechnet man mit $\pm 0,008\%$. Bei wichtigen Messungen verwende man Thermometer der Bauart Ziffer 2.22 a).
3. Bei Quecksilber-Federthermometern nach Ziffer 2.22 c) muß mit einer Fehlanzeige von $\pm 0,015\%$ bis $\pm 0,035\%$ des Anzeigebereiches (überschläglich $\pm 0,02\%$) je 1 m Länge und je ± 1 grad Temperaturänderung der Fernleitung und des Anzeigeteils gerechnet werden. Der Quecksilberinhalt der Bourdonfeder ist mit 5 m Fernleitung in Rechnung zu setzen.

2.234 Einfluß des Höhenunterschiedes zwischen Temperaturfühler und Anzeigeteil
Beim Eichen der Flüssigkeits-Federthermometer befinden sich Temperaturfühler und Anzeigeteil im allgemeinen in gleicher Höhe. Weicht die Höhenlage des Temperaturfühlers gegenüber der des Anzeigeteils um $\pm h$ Meter ab, so stellt sich bei Quecksilber-Federthermometern ein Anzeigefehler, in Winkleinheiten gemessen, von rund $\pm 0,06 h^\circ$, also von $\pm 1^\circ$ bzw. $0,3\%$ des Anzeigebereichs je etwa ± 17 m ein. Dies gilt hinreichend genau für alle Quecksilber-Federthermometer unabhängig von den Besonderheiten der Bauart.

2.235 Einfluß des Druckes bei Messungen in Räumen mit Überdruck

Der Einfluß des Barometerstandes auf die Anzeige von Flüssigkeits-Federthermometern ist zu vernachlässigen. Wird der Temperaturfühler eines Quecksilber-Federthermometers ohne Schutzrohr in einen druckerfüllten Raum eingebaut (Überdruck p at), so ergibt sich ein Anzeigefehler, in Winkleinheiten gemessen, von rund $0,025 p^\circ$, also von etwa 1° bzw. $0,3\%$ des Anzeigebereichs je 40 at Überdruck (Plusfehler).

2.3 Dampfdruck-Federthermometer

Dampfdruck-Federthermometer sind ähnlich aufgebaut wie Flüssigkeits-Federthermometer (Ziffer 2.21), doch ist der Temperaturfühler nur zu einem Teil mit einer geeigneten Flüssigkeit, zum anderen Teil mit ihrem Dampf gefüllt. Der Druck im Temperaturfühler ist der Temperatur nach der Dampfspannungskurve zugeordnet. Der Anzeigeteil ist ein Druckmesser.

Dampfdruck-Federthermometer werden mit Rücksicht auf die Beständigkeit der Füllflüssigkeiten im allgemeinen bis höchstens 350°C verwendet. Als Füllflüssigkeiten werden unter anderem benutzt: Aethyläther, Hexan, Toluol, Xylol.

Bei der Auswahl von Dampfdruck-Federthermometern muß berücksichtigt werden, daß sie eine ungleichmäßige Teilung besitzen,

die am Skalenanfang nur ungenaue Ablesung zuläßt. Sie sind gegen Obertemperaturen besonders empfindlich; Sicherungen gegen Obertemperaturen werden nur in Sonderfällen benutzt [13].

Die Fehlergrenze der Dampfdruck-Federthermometer wird zweckmäßig nach der sich aus der Bauart ergebenden und der von Einflußgrößen bedingten getrennt angegeben. Die erstere ist von derselben Größenordnung wie die der Flüssigkeits-Federthermometer (vgl. Ziffer 2.23). Die Einflußgrößen sind: Änderung des Luftdruckes sowie Höhendifferenz zwischen Temperaturfühler und Meßteil.

Temperaturänderungen von Fernleitungen und Meßteil haben keinen Einfluß auf die Fehlergrenzen.

2.4 Metallausdehnungsthermometer

2.4.1 Stabausdehnungsthermometer

Gelegentlich wird auch die Ausdehnung von Metallen zur Messung von Temperaturen benutzt. Der Temperaturfühler besteht aus einem Rohr von dem Metall mit der größeren Wärmeausdehnung; im Inneren befindet sich ein Kern von geringerer Ausdehnung. Die relative Wärmeausdehnung wird auf ein Zeigerwerk übertragen.

Die Fehlergrenze infolge der Ungenauigkeit der mechanischen Übertragung von Stabausdehnungsthermometern ist im Mittel auf etwa $\pm 2\%$ vom Anzeigebereich zu schätzen. Ein weiterer Fehler der Stabausdehnungsthermometer ist hauptsächlich auch dadurch bedingt, daß die mittlere Temperatur des Temperaturfühlers zur Anzeige kommt und diese je nach den Wärmeübergangs- und Wärmeableitungsbedingungen sich oft erheblich von der wahren Temperatur des Stoffes unterscheidet (vgl. Ziffer 4.43).

Stabausdehnungsthermometer werden häufig bei Temperaturreglern verwendet. Hier ist die große Verstellkraft (allerdings bei kleinem Weg) wertvoll; die Anpassung an ein genaueres messendes Thermometer ist am Ort des Einbaues oft möglich. Gelegentlich wird auch die Ausdehnung eines Rohrstranges unmittelbar als Temperaturimpuls für Regelzwecke benutzt.

2.4.2 Bimetallthermometer

Eine weitere Anwendung hat die unterschiedliche Ausdehnung von Metallen bei Bimetallthermometern gefunden, die aus zwei zusammengewalzten Metallstreifen verschiedener Wärmeausdehnung bestehen.

Bei Temperaturänderungen ändert sich das Krümmungsmaß von Bimetallstreifen. Sie werden daher (in meist spiralförmig oder schraubenförmig gewickelter Form) als Meßglieder für mechanische Thermometer benutzt, außerdem für elektrische Selbstschalter und Temperaturberichtigungen (vgl. Ziffer 2.22 b) und 3.14).

Würden die Bimetallstreifen nach ihrer mechanischen Bearbeitung längere Zeit bei Temperaturen gehalten, welche die Gebrauchstemperatur wesentlich übersteigen, so kann die Fehlergrenze zu $\pm 0,5$ bis $\pm 1,5\%$ des Anzeigebereiches angenommen werden. Zu beachten ist aber, daß Bimetallwendel, die etwa in Schutzrohre eingebaut werden, wegen des mangelhaften Wärmedurchgangs leicht erhebliche Meßfehler verursachen (vgl. auch Ziffer 4.43). Doch sind Bimetall-Raumthermometer (ohne Schutzrohr) frei von diesen Fehlern [11].

Dampfdruckfederthermometer und Metallausdehnungsthermometer sollen bei Abnahmeversuchen nur in beiderseitigem Einverständnis auf Grund besonderer Abmachungen verwendet werden.

3 Elektrische Berührungsthermometer

3.1 Thermoelemente⁵⁾

3.1.1 Beschreibung

Wenn man zwei aus verschiedenen Metallen hergestellte Drähte durch Löt- oder Schweißverbindungen der Enden zu einem Stromkreis verbindet, so erhält man ein Thermopaar. In ihm entsteht eine elektromotorische Kraft (EMK), „Thermospannung“ genannt, wenn man die zwei Verbindungsstellen der Metalle verschiedenen Temperaturen aussetzt. Diese EMK ist abhängig vom Temperaturunterschied der beiden Verbindungsstellen; sie kann also zur Temperatur-

⁵⁾ Schrifttum über Thermoelemente siehe [2], [3], [7], [8].

messung benutzt werden, wenn die eine der Temperaturen bekannt ist.

Dies geschieht in der Weise, daß man die eine Verbindungsstelle an die Meßstelle bringt, die andere als Vergleichsstelle auf einer bekannten, möglichst gleichbleibenden Temperatur hält (siehe Ziffer 3.16). Die EMK wird mit einem Gerät gemessen, welches an einer nicht im Temperaturgefälle liegenden, sonst aber beliebigen Stelle des einen Thermodrahtes eingeschaltet ist. Aus der gemessenen Spannung, die gegebenenfalls nach Ziffer 3.17 zu berichtigen ist, kann man auf die Temperatur der Meßstelle schließen.

3.1.2 Verwendungsbereich

3.121 Thermoelemente, deren Verwendungsbereich aus Bild 1 ersichtlich ist, können für die gleichen Temperaturen verwendet werden wie Flüssigkeits- und Widerstandsthermometer, sie sind jedoch für höhere Temperaturen und für kleine, punktförmige Meßstellen besonders vorteilhaft und werden daher hier verwendet. Mit den Widerstandsthermometern haben sie den Vorteil der elektrischen Fernübertragung gemeinsam, sie brauchen jedoch keine besondere Stromquelle (siehe Tafel 1).

3.122 Für die gebräuchlichsten Thermopaare Kupfer/Konstantan, Eisen/Konstantan, Nickelchrom/Nickel, Platinrhodium/Platin sind die wichtigsten Eigenschaften sowie die zulässigen Abweichungen von den jeweiligen Spannungen in TGL 0-43710⁶⁾ angegeben. Außerdem sind dort die normalen Temperaturbereiche für Dauerbenutzung in reiner Luft angegeben. Wenn man sich mit kurzer Benutzungsdauer abfindet oder besondere Schutzmaßnahmen trifft, kann man die Elemente auch noch bei höheren Temperaturen benutzen.

3.123 Für genaue Messungen müssen die verwendeten Drähte besonders geeicht werden, wenn die zulässigen Abweichungen gemäß TGL 0-43710 zu groß sind. Es genügt im allgemeinen, von jeder Drahtrolle eine Probe zu untersuchen, sofern die Drahtlieferung genügend homogen ist, was zu prüfen ist.

3.124 Außer den standardisierten werden auch andere Thermopaare benutzt, z. B. Neusilber Konstantan und Manganin-Konstantan, die den Vorzug geringer Wärmeleitungsfehler haben. Die Thermospannungen der letzteren weichen nur unbedeutend von denen der Kupfer/Konstantan-Thermopaare ab. Vielfach wird auch Nickel-Chrom-Konstantan verwendet, weil es von den gebräuchlichen Thermodrähten die höchste EMK abgibt. Für sehr hohe Temperaturen (bis 1800 °C) gibt es Spezialthermopaare.

3.125 Vor der Einwirkung schädlicher Gase müssen die Thermodrähte geschützt werden (siehe Ziffer 4.4). Z. B. sind allen Elementarten schwefelhaltige Gase schädlich. Reduzierende Gase müssen von allen Thermoelementarten, außer von Eisen-Konstantan-Thermopaaren, ferngehalten werden.

Auch das Platinrhodium-Platin-Thermopaar muß bei hoher Temperatur sehr sorgfältig geschützt werden. Reduzierende Gase wirken bei Gegenwart von Siliciumoxyd, z. B. in den keramischen Isolierrohren, zerstörend. Phosphor- und Metaldämpfe sind ebenfalls sehr schädlich, des-

⁶⁾ Die Titel der angezogenen DIN und TGL sind in Ziffer 8.9 aufgeführt.

gleichen Oxydation bei Cu/Konst- und Fe/Konst-Thermopaaren, bei letzteren jedoch erst über 600 °C.

3.126 Bezüglich der Austauschbarkeit der Thermodrähte wird auf TGL 0-43710 verwiesen.

3.13 Thermospannung

Der Verlauf der Thermospannung, die durch den Temperaturunterschied zwischen der Meß- und Vergleichsstelle des Thermopaars erzeugt wird, wird experimentell bestimmt und ist von der Art der verwendeten Baustoffe, also auch von der Zusammensetzung der verwendeten Legierungen abhängig (Bild 3). Die Temperatur der Vergleichsstelle, für die das Meßgerät geeicht ist (Bezugstemperatur), beträgt meistens 0 °C oder 20 °C. Bei Messungen mit stromverbrauchenden Instrumenten sind die Spannungsverluste nach Ziffer 3.17 zu berücksichtigen.

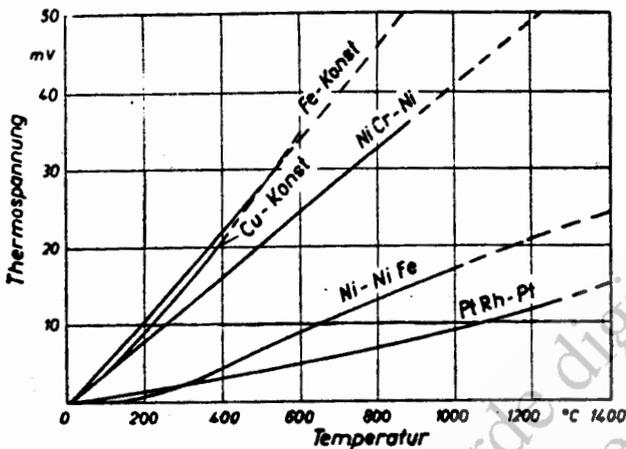


Bild 3
Grundwertreihen (Thermospannungskurven)
handelsüblicher Thermopaare

Die Kurven ergeben nur Anhaltswerte, da der Zusammenhang zwischen Temperatur und Thermospannung von der jeweiligen Legierung abhängig ist.

Im allgemeinen haben die Thermopaare bei Temperaturen über 0 °C eine angenähert lineare Charakteristik, d. h. die Thermospannung steigt etwa proportional der Temperaturdifferenz zwischen Meß- und Vergleichsstelle an. Ideal ist das Thermopaar, bei dem in einem gewissen Temperaturbereich (z. B. 0 bis 200 °C) die Thermospannung gleich Null und damit die Überwachung der Vergleichsstelle überflüssig ist [132 a]. Die Grundwertreihe verläuft dann im Thermospannungsbild zwischen 0 und 200 °C nahezu auf der Abszissenachse und steigt erst oberhalb 200 °C an. Ein Thermopaar, das dem nahe kommt, ist in Bild 3 z. B. Ni/NiFe.

Da sich die Spannung der Thermopaare in der ersten Zeit nach der Herstellung, besonders nach Erwärmen, bisweilen etwas verändert, müssen die Thermopaare gealtert werden. Es ist zweckmäßig, Thermodraht zu beziehen, der bereits gealtert und auf gleichmäßiges thermoelektrisches Verhalten geprüft ist (TGL 0-43712).

3.14 Bestimmung der Temperatur

3.141 Ist die Temperatur der Vergleichsstelle bei der Messung dieselbe wie bei der Eichung, so kann die gesuchte Temperatur mit der gemessenen, gegebenenfalls nach Ziffer 3.17 berichtigten, Thermospannung aus der Grundwertreihe entnommen werden.

3.142 Weicht die Temperatur der Vergleichsstelle (Vergleichstemperatur) bei der Messung von der bei der Eichung (Bezugstemperatur) ab und verläuft die Grundwertreihe geradlinig (z. B. beim NiCr/Ni-Thermo-

paar), so ist der Temperatur, die der gemessenen (gegebenenfalls nach Ziffer 3.17 berichtigten) Thermospannung nach der Grundwertreihe entspricht, der Temperaturunterschied hinzuzuzählen, um den die gemessene Vergleichstemperatur von der Bezugstemperatur abweicht. Es ist also:

$$t = t_a + (t_v - t_b)$$

Hierin ist:

t Temperatur der Meßstelle,

t_a am Anzeigergerät abgelesene bzw. der Grundwertreihe entnommene Temperatur,

t_v Vergleichstemperatur bei der Messung,

t_b Bezugstemperatur bei der Eichung (Prüfung).

3.143 Weicht die Vergleichstemperatur bei der Messung von der Bezugstemperatur ab und verläuft die Grundwertreihe nicht geradlinig (vor allem bei Platinrhodium/Platin- und Eisen/Konstantan-Thermopaaren), so läßt sich zur Bestimmung der Temperaturen die gemessene Spannung nach der folgenden Formel berichtigen (Bild 4):

$$E_o = E + \Delta E = E + k \cdot (t_v - t_b)$$

Darin bedeutet k die Spannungsänderung je Grad zwischen Vergleichs- und Bezugstemperatur (TGL 0-43710).

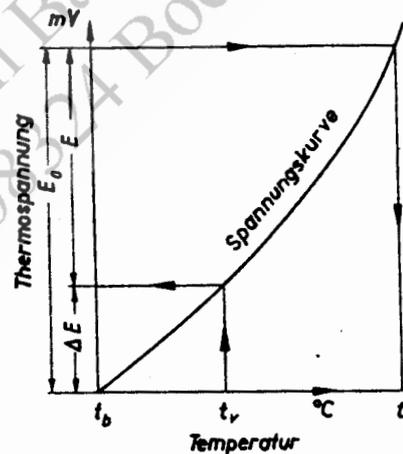


Bild 4

Temperaturbestimmung aus der Grundwertreihe, wenn die Vergleichstemperatur t_v bei der Messung von der Bezugstemperatur t_b bei der Eichung (Prüfung) abweicht.

3.144 Ist das Anzeigergerät mit einer Temperaturskala versehen, so kann die gesuchte Temperatur ohne Rücksicht auf die Bezugstemperatur direkt abgelesen werden, wenn man den Zeiger des Gerätes im stromlosen Zustand auf die Temperatur der Vergleichsstelle bei der Messung einstellt. Einige Firmen liefern Meßgeräte, bei denen dies durch einen eingebauten Bimetallstreifen selbsttätig erfolgt. Bei diesen Geräten muß man die Vergleichsstelle an das Gerät verlegen, indem man die Thermodrähte bzw. die Ausgleichsleitung (Ziffer 3.16) bis an die Instrumentenklemmen führt.

3.145 Kann eine Einstellung des mit einer Temperaturskala versehenen Anzeigergerätes auf die jeweilige Vergleichstemperatur nicht vorgenommen werden, so kann die tatsächlich vorhandene Temperatur auch dadurch ermittelt werden, daß man die Temperaturdifferenz zwischen der Vergleichs- und Bezugstemperatur $t_v - t_b$ mit einem Faktor c gemäß Bild 5 multipliziert und den so

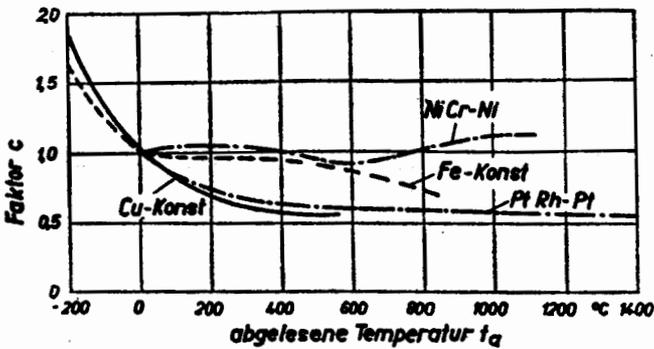


Bild 5

Umrechnungsfaktoren c für die Berücksichtigung der Vergleichstemperatur von verschiedenen Thermopaaren nach TGL 0-43710

erhaltenen Wert zur angezeigten Temperatur addiert. Es ist dann

$$t = t_a + c \cdot (t_v - t_b)$$

3.15 Drahtdicke und Isolierung

3.151 Die Drahtdicken der Thermopaare sind mit Rücksicht auf die Wärmeableitung (siehe Ziffer 4.43) möglichst klein, jedoch wegen der Haltbarkeit nur dann unter 0,5 mm Durchmesser zu wählen, wenn Wert auf geringe Trägheit des Thermopaars gelegt wird oder die Wärmeableitung besonders klein gehalten werden muß. Die Drähte werden in den in TGL 0-43712 standardisierten Dicken hergestellt. Bei den Platinrhodium/Platin-Thermopaaren ist im Hinblick auf den Werkstoffaufwand auch eine Drahtdicke von 0,35 mm standardisiert.

Die beiden Thermodrähte können für Gebrauchstemperaturen bis 150 °C weich, bis 700 °C hart verlötet werden; für Temperaturen darüber sind sie zu verschweißen. Das Löt- bzw. Schweißmaterial beeinflusst die Thermospannung nicht. Meßfehler können jedoch entstehen, wenn die Thermodrähte außerhalb der Lötstelle damit verunreinigt sind, und außerdem entlang diesem Stück Temperaturunterschiede auftreten.

Thermoelemente sollen bei längeren oder Dauermessungen stets mit gleicher Einbaulänge verwendet werden. Verschiedene Einbaulängen können durch Umkristallisation im Thermodraht erhebliche Fehlmessungen ergeben.

3.152 Für gute elektrische Isolierung der beiden Drähte des Thermopaars, der Ausgleichsleitungen und der Zuleitungen bis zum Anzeigergerät sowie Schutz gegen Verdampfen und Niederschlagen (Sublimieren) des einen Materials auf das andere (z. B. bei Platinrhodium/Platinpaaren) ist zu sorgen. Man benutzt

- bis 50 °C Gummiisolierung oder entsprechende, vorwiegend thermoplastische Werkstoffe,
- bis 120 °C Umspinnung mit Papier oder Textilfasern (Kunstseide, Baumwolle, Zellwolle oder entsprechende andere Stoffe),
- bis 200 °C Lackierung mit zusätzlicher Ummantelung aus anderen temperaturbeständigen Stoffen,
- bis 300 °C Glasfaserspinnung,
- bis 1400 °C Röhren aus keramischer Masse, z. B. Porzellan (in reduzierenden Gasen nicht für Platin und Platinrhodium geeignet), Magnesia u. ähnl.,
- über 1400 °C Röhren aus gesintertem Aluminium-Oxyd.

Die keramischen Isolierrohre und -stäbe sind in TGL (in Vorbereitung) standardisiert.

Asbest allein ist zur Isolierung der Thermodrähte wegen der Gefahr der Feuchtigkeitsaufnahme in den kälteren Temperaturzonen wenig geeignet. Infolge von Feuchtigkeit können leicht beträchtliche Meßfehler durch elektrischen Nebenschluß, besonders aber durch zusätzliche elektrolytische EMK verursacht werden. Eine solche elektrolytische EMK ergibt sich auch bei höheren Temperaturen durch die zunehmende Leitfähigkeit des Asbests. Deshalb empfiehlt es sich in solchen Fällen, keramische Isolierrohren zu verwenden. Ausgleichsleitungen, die mit Asbest isoliert sind, sollen zusätzlichen Feuchtigkeitsschutz erhalten. Bei der Auswahl der Zuleitungen und ihrer Isolierung sind die Beanspruchungen zu beachten, die sich infolge äußerer Einwirkung von Wärme, Feuchtigkeit und chemisch aggressiven Stoffen sowie durch mechanische Beanspruchungen ergeben.

3.16 Die Vergleichsstelle

3.161 Für weniger genaue Messungen, insbesondere für hohe Temperaturen, kann man die freien Enden der Thermopaare ohne Zwischenschaltung einer besonderen Vergleichsstelle unmittelbar mit den Klemmen des Anzeigergeräts verbinden (Bild 6); diese ersetzen die Ver-

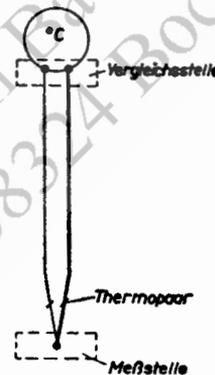


Bild 6
Thermoelement
direkt geschaltet

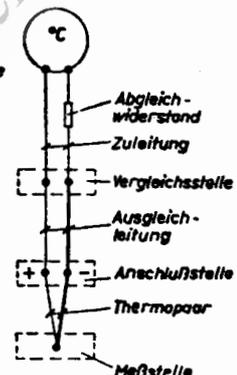


Bild 7
Thermoelement
mit Ausgleichsleitung

gleichsstelle. Die beiden Klemmen müssen die gleiche Temperatur haben (vgl. Ziffer 3.14), die konstant zu halten und zu messen ist. Einseitige Erwärmung und Abkühlung ist z. B. durch Wärmeschutz zu vermeiden.

Muß die Vergleichsstelle von der Meßstelle weiter entfernt sein, als es die Länge der Thermodrähte gestattet, dann verlängert man die Thermoschenkel mit „Ausgleichsleitungen“ bis zu der Vergleichsstelle, von der aus eine Zuleitung zum Anzeigergerät verlegt werden kann (Bild 7). Diese können aus den gleichen Werkstoffen wie die Thermodrähte oder aus Sonderlegierungen mit gleichen thermoelektrischen Eigenschaften bestehen. Sie werden für alle gebräuchlichen Thermopaare mit wärme- und feuchtigkeitsbeständiger Isolation und mit Schutz gegen mechanische Beschädigungen geliefert. Die Sonderlegierungen haben den Vorteil kleineren Widerstandes und auch geringeren Preises; sie besitzen bis 200 °C die gleiche Thermospannung wie die entsprechenden Thermopaare.

3.162 Für genauere Messungen wird die Vergleichsstelle meist so ausgeführt, daß man die Enden der Thermodrähte oder Ausgleichsleitungen in einem unten verschlossenen, dünnen, am besten mit Öl gefüllten Röh-

chen in eine Thermosflasche legt. Es ist darauf zu achten, daß die Drähte in dem Röhrchen gegeneinander isoliert sind und daß an die Vergleichsstelle und die Zuführungsdrähte keine Feuchtigkeit gelangt.

3.163 Man hält die Vergleichstemperatur möglichst konstant. Im allgemeinen wählt man den Eispunkt des Wassers, indem ein Gemisch von reinem Eis und destilliertem Wasser in die Thermosflasche (Ziffer 3.162) eingefüllt wird. Auf rechtzeitiges Nachfüllen von Eis ist zu achten. Steht kein Eis zur Verfügung, so läßt man die Thermosflasche leer oder besser, füllt sie mit Wasser oder Öl und mißt die Temperatur durch ein Flüssigkeitsthermometer, das neben der Vergleichsstelle eingeführt wird.

Bei Betriebsmessungen, insbesondere wenn mit mehreren Thermoelementen gemessen wird, kann man die Vergleichstellen gemeinsam auf eine Temperatur höher als Raumtemperatur elektrisch aufheizen und diese Temperatur mit einem Temperaturregler konstant halten. Hierfür werden geeignete Thermostaten mit einer großen, wärmeträgen, nach außen gut isolierten Masse, in deren Mitte sich die Vergleichstellen befinden, hergestellt. Die Temperatur der Vergleichstellen muß gemessen und nach Ziff. 3.14 bei der Auswertung berücksichtigt werden. Der Einfluß der Temperaturschwankungen der Vergleichsstelle kann auch durch Anwendung einer Ausgleichschaltung mit einer Hilfsspannung (Bild 8) selbsttätig ausgeschaltet werden. Die Ausgleichschaltung

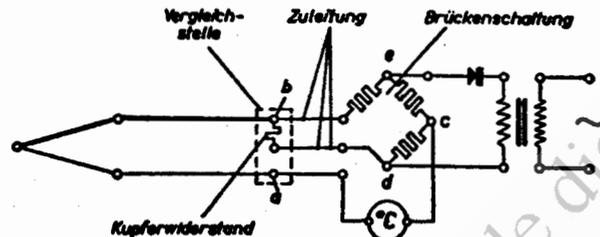


Bild 8
Ausgleichschaltung

wird von einschlägigen Betrieben für die gebräuchlichen Thermo-elemente hergestellt und mit passenden Gleichrichtern für Netzanschluß in den Handel gebracht.

3.17 Einfluß des Leitungswiderstandes beim Ausschlagverfahren

3.171 Beim Ausschlagverfahren werden im Gegensatz zu dem Kompensationsverfahren (siehe Ziffer 3.191) die Ausschläge eines Instrumentes unmittelbar zur Messung benutzt. Bei diesem Verfahren ist die Anzeige abhängig von der Größe des Leitungswiderstandes (Summe des Widerstandes von Thermopaar, Ausgleichsleitung und Zuleitung). Nach DIN 43 709 Ausg. 8.57 soll seine Größe 20 Ohm betragen. Durch einen Abgleichwiderstand muß auf diesen Leitungswiderstand abgeglichen werden. Bei größeren Leitungswiderständen muß das Instrument entsprechend geeicht oder der Leitungseinfluß rechnerisch berücksichtigt werden.

3.172 Bei dünnadrätigen Thermopaaren, insbesondere bei Platinrhodium/Platin muß auch die Veränderlichkeit des Widerstandes dieser Thermopaare mit der Temperatur beachtet werden. Die tatsächliche Thermospannung ist dann

$$E = E_0 \frac{R_{el} + R_x + R_z + R_l}{R_{L \text{ soll}} + R_l}$$

Hierbei ist

- E die tatsächliche Thermospannung (EMK) in mV
- E_0 die abgelesene Spannung in mV
- R_{el} der Widerstand des Thermopaars bei der Messung in Ohm
- R_x der Widerstand der Ausgleichsleitung bei der Messung in Ohm
- R_z der Widerstand der Zuleitung bei der Messung in Ohm
- R_l der Widerstand des Anzeigeinstrumentes in Ohm

R_L soll der bei der Justierung berücksichtigte Leitungswiderstand in Ω (meist auf der Skale angegeben). R_x und R_z lassen sich berechnen aus

$$R = \rho \frac{l}{F}$$

Dabei ist

- ρ der spezifische Widerstand des Leitungsmaterials in $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
- l die Leitungslänge in m
- F der Querschnitt der Leitung in mm^2 .

3.173 Die spezifischen Widerstände bei 20°C und ihre Temperaturbeiwerte für Werkstoffe der standardisierten Thermopaare sind in TGL 0-43710, die Meterwiderstände sowie die Temperaturbeiwerte der Ausgleichsleitungen in TGL 0-43713 angegeben. Aus dem auf Grund dieser Daten zusammengestellten Bild 9 lassen sich für Thermopaare und Ausgleichsleitungen, soweit bei diesen beide Leiter den gleichen Querschnitt haben, ihre Meterwiderstände bei verschiedenen Temperaturen bestimmen. Es sei darauf hingewiesen, daß der Widerstand sich insbesondere bei Pt Rh/Pt-Thermopaaren erheblich ändert, wenn das Thermoelement in seiner Länge wechselnden Temperaturen ausgesetzt oder seine Einbaulänge verändert wird.

3.18 Fehlergrenzen

3.181 Um die Genauigkeit der Messung festzustellen, sind die von den einzelnen Teilen der Meßeinrichtung herrührenden Fehler einzeln zu ermitteln (Abweichung der Thermospannung vom Sollwert bei Thermopaar und Ausgleichsleitung, Fehler des Anzeigegegeräts). Dabei sind die Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Berichtigungen nach Ziffer 3.14 und 3.17 infolge zufälliger Meß-

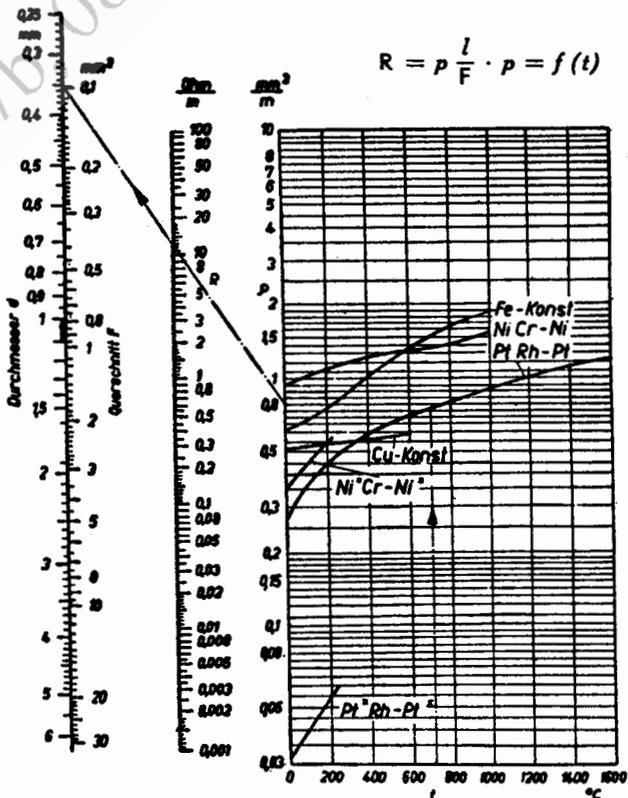


Bild 9

Nomogramm zur Bestimmung des Ohmschen Widerstandes von Thermopaaren und Ausgleichsleitungen. Länge jeder Leitung 1 m (* bedeutet Sonderwerkstoff für Ausgleichsleitungen nach TGL 0-43713)

fehler, Abweichungen von der Grundwertreihe und Rechenvereinfachungen zu beachten. Die Gesamtfehlergrenze ist nach Ziffer 1.5 zu bestimmen; sie gilt unter der Voraussetzung fehlerlosen Einbaues aller Teile der Meßeinrichtung (siehe Ziffer 4).

3.182 Bei Abnahmeversuchen ist für die Messung der Thermospannung zweckmäßig ein Präzisions-Drehspul-Meßgerät zu verwenden, dessen Widerstand zur Widerstandssumme des Thermopaars, der Ausgleichs- und der Zuleitungsdrähte mindestens im Verhältnis 200:1 steht, damit der Einfluß des Widerstandes dieser Leitungen klein ist. Das verwendete Anzeigegerät soll einen der jeweils zu messenden Thermospannung entsprechenden Anzeigebereich haben, und die Fehlergrenze soll höchstens $\pm 0,8\%$ vom Anzeigebereich (siehe Ziffer 3.253) betragen. Die Angaben der Anzeigegeräte gelten im allgemeinen bei einer Temperatur des Gerätes von 20°C . Bei anderen Temperaturen sind Berichtigungen zu machen. (Über die Kennzeichnung der Klasse und über die Angabe der Größe des Temperaturfehlers siehe DIN 43 709 Ausg. 8.57). Die Anzeigegeräte sind vor den Einwirkungen elektrischer und magnetischer Felder zu schützen, also z. B. nicht auf Eisenplatten aufzusetzen.

Bei Betriebsmessungen dürfen auch Anzeigegeräte mit kleinerem Widerstand für die Thermospannung benutzt werden. Diese Geräte sind mechanisch widerstandsfähiger als Präzisionsmeßgeräte. Sie werden nach der Grundwertreihe der benutzten Thermopaare zweckmäßigerweise unter Berücksichtigung der Widerstandssumme von Thermopaar, Ausgleichs- und Zuleitung geeicht, so daß die Berichtigung der Ablesung nach Ziffer 3.17 fortfällt. Die auf dem Gerät anzubringenden Aufschriften mit Angaben über Temperaturfehler, Widerstand des Meßinstrumentes usw. sind DIN 43 709 Ausg. 8.57 zu entnehmen.

3.19 Besondere Schaltungen

3.191 Kompensationsschaltungen

3.191.1 Für genaue Messungen und bei sehr hohem Widerstand des Thermopaars oder der Ausgleichs- und Zuleitung ist die Thermospannung mit Hilfe von Kompensationsverfahren (Bild 10) zu messen [121], [123]. Die Anwendung von Kompensationsverfahren ist auch dann zu empfehlen, wenn bei Anschluß mehrerer Elemente an dasselbe Anzeigegerät (Ziffer 3.192) die Widerstände der einzelnen Elemente und Leitungen sehr verschieden oder durch stark schwankende Umgebungstemperaturen veränderlich sind. Mit diesem Verfahren wird die Thermospannung stromlos gemessen, so daß die Berichtigung nach Ziffer 3.17 entfällt. Die Kompensationsmeßgeräte werden zum Teil auch mit selbsttätiger Abgleichung der Gegenspannung geliefert [107], [112], [113]. Ferner können sie auch unmittelbar in $^\circ\text{C}$ geeicht und mit selbsttätiger Berücksichtigung der Temperatur der Vergleichsstelle ausgerüstet werden. Die Temperaturen der Meßstelle können dann unmittelbar abgelesen werden.

3.191.2 Bei der Kompensationsschaltung nach *Poggendorf* (a) und der Brückenschaltung (b) wird das Nullgalvanometer G_0 auf Stromlosigkeit dadurch eingestellt, daß man das Potentiometer P verstellt, während bei der Schaltung nach *Lindeck-Rothe* (c) die Einstellung des Nullgalvanometers auf Stromlosigkeit durch Ändern des Stromes J mittels eines Regelwiderstandes R erfolgt. Die Stellung des Potentiometerabgriffes P bzw. die Anzeige des Strommessers A sind dann ein Maß für die Thermospannung bzw. die Temperatur.

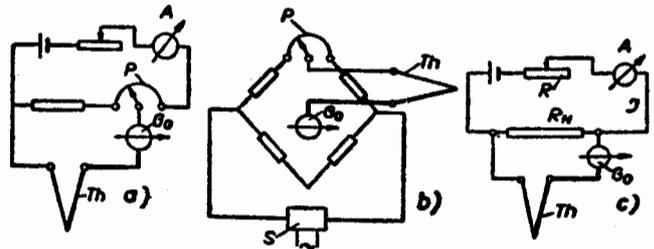


Bild 10

Kompensationsschaltung für Thermoelemente

a) Anordnung nach *Poggendorf*

b) Brückenschaltung

c) *Lindeck-Rothe*-Schaltung

P Potentiometer mit Ableseskala

Th Thermopaar

S Spannungskonstanthalter mit Gleichrichter.

A Amperemeter

G_0 Nullgalvanometer

R_N Kompensationswiderstand

R Regelwiderstand

3.191.3 Noch genauere Messungen gestatten diejenigen Kompensationsapparate, insbesondere der nach *Diesselhorst*, bei denen als Vergleichsspannung die Spannung eines Normalelementes benutzt wird.

3.191.4 Die Kompensationsverfahren werden auch in selbsttätig abgleichenden Meßgeräten zur unmittelbaren Aufzeichnung der Meßwerte angewandt. Derartige Geräte sind unter Bezeichnungen wie „Kompensographen“, „Lichtelektrische Verstärker“, „Photozellen-Kompensatoren“ usw. bekannt [108] und [112].

3.191.5 Man kann auch Gleichstrom-Meßverstärker für die Aufzeichnung der Temperaturen in verschiedenen Schaltungsarten verwenden, z. B. gegengekoppelte Verstärker, bei denen die Thermospannung in Wechselspannung umgesetzt und nach Verstärkung (mittels Wechselspannungsverstärker) wieder gleichgerichtet wird.

3.192 Schaltung mehrerer Thermoelemente auf ein Anzeigegerät

Bei der Messung mit mehreren Thermoelementen an verschiedenen Meßstellen können die Elemente auch auf dasselbe Anzeigegerät geschaltet werden (z. B. bei der Aufzeichnung der Temperaturen mehrerer Meßstellen durch ein schreibendes Gerät). Hierbei sind zweipolige Umschalter zu verwenden. An den Kontaktstellen des Umschalters dürfen weder wesentliche Übergangswiderstände noch Thermospannungen auftreten. Die Widerstände der verschiedenen Thermopaare einschließlich deren Ausgleich- und Zuleitungen sind (z. B. durch Vorwiderstände) auf den gleichen Wert zu bringen; festgelegt sind $20\ \Omega$ (nach DIN 43 709 Ausg. 8.57).

3.193 Thermokette und Differenzschaltung

3.193.1 Ist der Temperaturunterschied zwischen Meßstelle und Vergleichsstelle bei der Messung nur gering, so kann man einen großen Ausschlag am Anzeigegerät durch Hintereinanderschaltung von mehreren Thermoelementen (Thermokette) erreichen (Bild 11). Zur Bestimmung des Temperaturunterschiedes aus der Grundwertreihe ist die Thermospannung durch die Anzahl der Thermoelemente zu teilen. Für gute, gegenseitige elek-

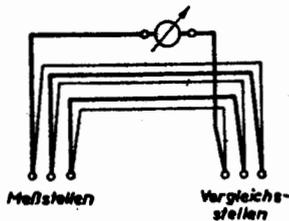


Bild 11
Thermokette

trische Isolierung der Meß- und Vergleichsstellen ist zu sorgen.

3.193.2 Bei der genauen Bestimmung kleiner Temperaturdifferenzen benutzt man zweckmäßig ein Thermoelement oder eine Thermokette in Differenzschaltung (siehe auch Ziffer 3.26). Man bringt hierbei an die zwei Meßstellen ohne Einschaltung einer Vergleichsstelle je eine Verbindungsstelle eines Thermopaars und kann die zu messende Temperaturdifferenz unter Beachtung der Temperaturhöhe unmittelbar der Grundwertreihe des Thermopaars entnehmen. Besonders gut für derartige Messungen eignen sich die Thermopaare mit großer Thermospannung je grad. Für große Temperaturdifferenzen und schwankende Temperaturhöhe ist das NiCr/Ni-Thermopaar nach TGL 0-43710 wegen der fast geradlinigen Kennlinie (Bild 3) geeignet. Ebenso wie bei der Hintereinanderschaltung von Thermopaaren (Thermokette) müssen die beiden Verbindungsstellen gegen Nebenschluß gut isoliert sein.

3.20 Besondere Bauarten

3.201 Die Form der Thermodrähte läßt sich besonderen Anwendungsfällen anpassen. Für die Oberflächen-Temperaturmessung benutzt man z. B. mitunter dünne, bandförmige Drähte (siehe Ziffer 4.317). Auch rohrförmige Ausführung des einen Schenkels ist gebräuchlich; der andere Schenkel wird dann isoliert in das Rohr eingebettet (siehe Ziffer 4.425). Voraussetzung für die Herstellung derartiger Sonderbauarten ist entsprechend gute Verformbarkeit der Werkstoffe. Dasselbe gilt auch für die Herstellung außergewöhnlich dünn-drähtiger Thermopaare (siehe Ziffer 4.466).

3.202 Eine besondere Form der Thermoelemente stellt das sogenannte Stech- oder Spitzenthermoelement [131] dar, das zur raschen Temperaturmessung beim Warmbehandeln und Verformen besonders von Leichtmetallen dient. Die beiden Thermodrähte, meist aus Nickel und Nickelchrom, sind nicht in der üblichen Weise miteinander verschweißt, sondern werden getrennt voneinander in gewissem Abstand in die Oberfläche eines, z. B. in einem Ofen befindlichen, Metallblocks leicht eingedrückt (eingestochen). Der zwischen den Drahtenden befindliche Teil des Blocks übernimmt die elektrische Leitung des Thermostromes, ersetzt also die Schweißstelle. Dabei wird die unter Umständen auf dem Block befindliche Oxydschicht durchgestoßen, so daß diese die Messung der Blocktemperatur weder fälschen noch verzögern kann. Als Meßverzögerung wirkt im wesentlichen die Trägheit des Anzeigergerätes. Derartige Thermoelemente lassen sich nicht zur Temperaturmessung an Kupfer, Messing oder Bronze verwenden, da hierbei an den Kupferoxyd- bzw. Kupferoxydulhäuten Thermospannungen auftreten können, die das Meßergebnis stark fälschen.

3.203 Für Temperaturmessungen in flüssigem Leichtmetall ist eine ähnliche Ausführung

bekannt. Als Thermopaar wird Eisen/Konstantan benutzt; die Drähte sind ebenfalls an der Meßstelle nicht verbunden. Die Verbindung wird von dem flüssigen Leichtmetall nach dem Eintauchen übernommen. Die Thermodrähte sind nur am unteren Ende blank, an den anderen Stellen dagegen zum Schutz gegen das flüssige Leichtmetall mit einem dünnen, oft zu erneuernden Schutzanstrich aus Kokillen-anstrichmasse versehen.

3.2 Widerstandsthermometer

3.21 Beschreibung

3.211 Der elektrische Widerstand der Metalle ändert sich mit der Temperatur und nimmt bei den gebräuchlichen Metallen mit steigender Temperatur zu. Diese Tatsache benutzt man bei den Widerstandsthermometern zur Temperaturmessung. Man mißt den Widerstand eines an die Meßstelle gebrachten Metalldrahtes (Meßwiderstand) und schließt aus der Größe dieses Widerstandes auf die Temperatur der Meßstelle. Die Meßgenauigkeit der Widerstandsthermometer übertrifft, besonders bei höheren Temperaturen, diejenige der Flüssigkeitsthermometer (Ziffer 2.16). Als Baustoff für die Widerstandsthermometer werden u. a. die Stoffe der Tafel 5 benutzt.

3.212 Den Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand kann man bei linearer Beziehung zwischen beiden durch den Temperaturbeiwert α ausdrücken; α gibt die mittlere relative Zunahme des Widerstandes an bei einer Erwärmung um 1 grad, bezogen auf den Widerstand bei 0°C, wenn der Draht von 0°C auf 100°C erwärmt wird. Es ist also:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0}$$

Die prozentuale Widerstandsänderung je 1 grad ist also gleich 100 α .

Da die Beziehung zwischen Temperatur und Meßwiderstand nicht bei allen Werkstoffen linear ist, wird die Temperatur praktisch aus dem versuchsmäßig ermittelten Zusammenhang mit dem Widerstand bestimmt (Grundwertreihe). Für Meßwiderstände aus Platin und Nickel sind die Grundwertreihen in TGL 0-43760 festgelegt.

Tafel 5: Verwendungsbereich und Temperaturbeiwerte von Widerstandsthermometern

| Material | Verwendungsbereich °C | 100 α |
|----------|---|--------------|
| Platin | von -220 bis +550 Sonderausf. bis +750 | 0,385 |
| Nickel | von -60 bis +150 überlastbar bis +180 | 0,617 |

3.213 Die Anzeigergeräte werden meist in °C geeicht, so daß eine unmittelbare Ablesung möglich ist. Nur bei behelfsmäßigen Anordnungen wird die Temperatur aus der Grundwertreihe des Meßwiderstandes bestimmt.

3.214 Der Meßwiderstand darf während des Betriebes keiner Abnutzung unterliegen und nicht verunreinigt werden, da geringste Formänderungen und Beimengungen anderer Stoffe den Widerstand stark verändern können.

Ein dünner Draht aus dem verwendeten Metall wird z. B. auf ein Glimmerkreuz, frei in Luft hängend, aufgewickelt. Diese Form ist besonders bei wissenschaftlichen Untersuchungen gebräuchlich. Bei den üblichen technischen Thermometern wird der Draht auf einen Glimmerstreifen, einen Dom aus Isoliermaterial (Quarz, Glas, keramische Massen) oder auf ein isoliertes Metallrohr aufgewickelt und nach außen hin isoliert. Dieser Meßwiderstand kann in ein Einsatzrohr eingeschoben oder eingeschmolzen und mit einem Thermometeranschluß (Anschlußsockel mit Anschlußklemmen) versehen werden. Er bildet so den Meßeinsatz, der weiterhin durch ein Schutzrohr gegen mechanische Beanspruchung und chemische Einflüsse geschützt werden kann.

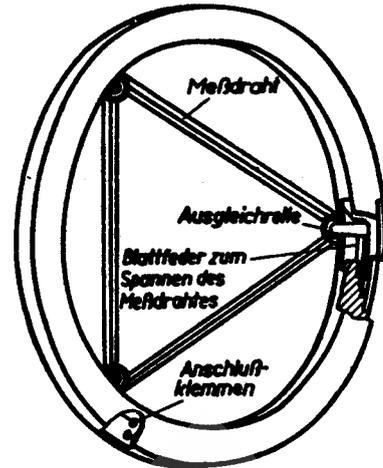


Bild 12

Widerstandsthermometer in einer Gasrohrleitung

3.215 Widerstandsthermometer erfordern im Gegensatz zu den Flüssigkeits-Glasthermometern und auch den Thermoelementen (mit Ausnahme von Thermoelementen in Kompensationsschaltung oder in Ausgleichschaltung mit Hilfsspannung) den Anschluß an eine Stromquelle (Netz mit Gleichrichter, Akkumulatoren oder Trockenelemente). Die Meßspannung soll 6 Volt, in Ausnahmefällen 24 Volt betragen (DIN 43709 Ausg. 8.57).

3.22 Verwendung

3.221 Widerstandsthermometer werden zur Messung der Temperaturen von -220°C bis $+550^{\circ}\text{C}$, in Sonderfällen bis 750°C [85] benutzt. Sie werden vor allem dann verwendet, wenn die Einbaustelle für unmittelbare Ablesung nicht zugänglich ist, also wenn eine Fernübertragung der Temperaturmessung erfolgen muß, und wenn die Temperatur sehr genau gemessen werden soll. Insbesondere kann man durch geeignete Schaltung der Widerstandsthermometer erreichen, daß der Meßbereich des Anzeigergerätes nur einen kleinen Temperaturbereich umfaßt. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, nur begrenzte, wirklich interessierende Temperaturbereiche mit großer Genauigkeit zur Anzeige zu bringen.

3.222 Widerstandsthermometer ermöglichen es ferner ebenso wie die Thermoelemente, die Temperatur mehrerer voneinander entfernter Meßstellen von einer einzigen Stelle aus zu beobachten und gemeinsam, unter Umständen auch zusammen mit anderen Meßwerten aufzuzeichnen.

3.223 Ebenso wie mit Flüssigkeits-Glasthermometern kann man mit Widerstandsthermometern nicht an punktförmigen Stellen messen. Man kann aber mit ihnen die mittlere Temperatur eines Temperaturfeldes messen, indem man den Draht über das Temperaturfeld ausspannt. Dabei ist besonders darauf zu achten, daß elastische oder bleibende Formänderungen nicht auftreten, die z. B. durch die Strömung in einer Flüssigkeit hervorgerufen werden könnten. Die gemessene Temperatur ist allerdings nicht die mittlere Temperatur des Flüssigkeits- oder Gasstromes, wenn die Geschwindigkeit über den Querschnitt nicht konstant ist. (Man beachte Ziffer 4.44).

Eine praktische Ausführung für den Einbau des Meßdrahtes (Temperaturfühlers) eines Widerstandsthermometers, in einer Gasrohrleitung zeigt Bild 12. Die Feder dient zum Spannen des Meßdrahtes, damit dieser nicht bei Temperaturerhöhung infolge Wärmeausdehnung durchhängt. Bei der gezeigten Ausführung sind die Drähte zwar nicht gleichmäßig über das Temperaturfeld (den Querschnitt des Rohres) gespannt, jedoch entspricht die Messung mit der dargestellten Anordnung praktisch gut einer Messung des Mittelwertes der Temperatur (Mittelwertmessung siehe auch Ziffer 4.44)

3.23 Schaltungen

Von den zahlreichen Schaltungen zur Widerstandsmessung sind in den Bildern 13 bis 16 einige dargestellt. Man unterscheidet Kompensationsschaltungen und Ausschlag-schaltungen.

3.231 Kompensationsschaltungen. Bei diesen Schaltungen (Bild 13) wird meist in einer Brücken-anordnung der durch das Galvanometer G_0 fließende Strom durch einen veränderbaren Widerstand W zu Null gemacht. Die Widerstandsänderung kann in Temperaturgraden ausgewertet werden. Spannungsschwankungen der Stromquelle beeinflussen bei Kompensationsschaltungen die Messung nicht.

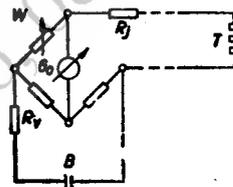


Bild 13

Kompensationsschaltung

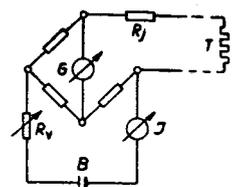


Bild 14

Drehpulschaltung;
Ausschlagverfahren
mit zwei Leitungen

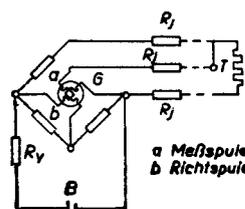


Bild 15

Brückenschaltung
mit Kreuzspulgerät;
Ausschlagverfahren
mit drei Leitungen

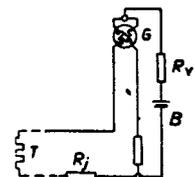


Bild 16

Kreuzpulschaltung
(Brugerschaltung);
Ausschlagverfahren
mit zwei Leitungen

Bild 13 bis 16

Schaltbilder für Widerstandsthermometer

| | |
|-------|----------------------------------|
| T | Meßwiderstand (Temperaturfühler) |
| G | Anzeigergerät |
| G_0 | Nullgalvanometer |
| R_i | Abgleichwiderstand |
| R_v | Vorwiderstand |
| W | veränderbarer Widerstand |
| J | Strommeßgerät |

Bei sehr genauen Messungen im Laboratorium wird am besten ein Kompensationsapparat verwendet. Dabei wird der Meßwiderstand mit einem Normalwiderstand verglichen.

3.232 Ausschlagschaltungen

Bei Ausschlagschaltungen (Bild 14 bis 16) ist der Ausschlag des Anzeigergerätes unmittelbar ein Maß für die Temperatur.

Die Messungen nach dem Ausschlagverfahren werden bei Verwendung von Drehspulgeräten (Bild 14) von Spannungsschwankungen beeinflusst. Vor der Messung muß deshalb der die Brücke speisende Strom mittels eines veränderbaren Vorwiderstandes R_v eingestellt werden, sofern nicht eine Einrichtung zum Konstanthalten des Meßstromes verwendet wird.

Von Spannungsschwankungen unabhängig werden die Messungen bei Anwendung der heute fast ausschließlich angewandten Quotientenschaltungen, z. B. Brückenkreuzpulschaltungen (Bild 15) oder Differential-Kreuzpulschaltungen (Bild 16). Bei diesen Schaltungen sollen die Spannungsschwankungen bestimmte Grenzen (meist $\pm 20\%$) nicht überschreiten.

3.233 Alle diese Schaltungen lassen sich als Zweileiterschaltungen (Bild 13, 14 und 16) und als Dreileiter-Schaltung (Bild 15) ausführen. Danach werden 2 oder 3 Drahtzuleitungen vom Thermometer zum Anzeigerort verlegt. (Über die Eigenschaften siehe Ziffer 3.253).

3.24 Vorbedingungen für genaues Messen

3.241 Bei der Gesamtlage müssen folgende Bedingungen erfüllt sein, um die in Ziffer 3.25 angegebenen Fehlergrenzen einzuhalten:

1. Die Isolierung der Anlage gegen Erde (Meßwiderstand, Anzeiger und Zuleitungen zum Anzeiger) muß einwandfrei sein. Bei längeren Zuleitungen muß auch die Isolierung der Einzelleitungen gegeneinander geprüft werden. Die zu fordernden Isolierwerte richten sich nach der verwendeten Betriebsspannung und der Meßspannung. Der Isolierwert der Zuleitungen soll im allgemeinen größer als 20 Megohm sein. Die Isolierbedingungen, die für Starkstromleitungen gelten, genügen für Widerstandsthermometerzuleitungen nicht.
2. Bei spannungsabhängigen Schaltungen muß eine Einstellung bzw. Prüfung der Brückenspannung oder des Brückenstromes vorgenommen sein, bei spannungsunabhängigen Schaltungen muß die Spannungsschwankung innerhalb der zulässigen Grenzen liegen (meist $\pm 20\%$).
3. Um den die Temperaturmessung fälschenden Erwärmungsfehler des Thermometers durch den Strom möglichst zu vermeiden, soll dieser bei 100-Ohm-Thermometern handelsüblicher Bauart im allgemeinen 12 mA nicht übersteigen. Dieser Erwärmungsfehler, der quadratisch mit dem Strom ansteigt, ist abhängig von der Bauart des Thermometers und den Wärmeübergangsbedingungen am Meßwiderstand. Der Erwärmungsfehler [94] verursacht bei einer Stromstärke von 10 mA einen Fehler von etwa 0,05 bis

1,4 grad; er muß bei genauen Temperaturmessungen beachtet werden.

4. Die Zuleitungen von der Anschlußstelle des Thermometers bis zum Meßgerät müssen auf 10 Ohm abgeglichen werden. Beträgt jedoch der Innenleitungs-widerstand für das Thermometer 3 Ohm, so wird auf 7 Ohm abgeglichen (DIN 43 709 Ausg. 8.57).

5. Damit Temperaturänderungen der das Thermometer mit dem Anzeiger verbindenden Zuleitungen praktisch keinen Einfluß auf den Ausschlag des Anzeigergerätes ausüben, soll der Widerstand des Thermometers groß sein gegenüber demjenigen der Zuleitung (Ziffer 3.253).

3.242 Bei sorgfältiger Ausführung der Meßeinrichtung und fehlerlosem Einbau des Meßgerätes kann man die in Ziffer 3.25 angegebenen Fehlergrenzen erwarten.

3.25 Fehlergrenzen

3.251 Bei der Bestimmung der Genauigkeit der jeweiligen Meßanordnung sind folgende Fehlergrenzen einzeln festzustellen und nach Ziffer 1.5 zu berücksichtigen: Fehlergrenze des Meßwiderstandes selbst, Fehlergrenze infolge Temperaturschwankungen der Zuleitungen vom Thermometer zum Anzeigergerät, Fehlergrenze des Anzeigergerätes und Vergrößerung der Fehlergrenze durch Spannungsschwankungen der Stromquelle. Dabei wird die für das Thermometer gültige Beziehung zwischen der Temperatur und dem Widerstand des Thermometers zugrunde gelegt. Die aus den einzelnen angegebenen Fehlergrenzen nach Ziffer 1.5 gebildete Gesamtfehlergrenze gilt dann unter der Voraussetzung des fehlerlosen Einbaues des Meßgerätes.

3.252 Fehlergrenze des Meßwiderstandes (ohne Berücksichtigung der Wärmeableitung durch ein Schutzrohr) für Platin- und Nickelwiderstände nach TGL 0-43 760. Die dort angegebenen Werte gelten für handelsübliche Thermometer mit einem Widerstand von 100 Ohm bei 0°C. Bei kleineren Meßwiderständen vergrößern sich die Fehler etwas.

Ein zusätzlicher Fehler ergibt sich durch die Länge und den Temperaturbeiwert der Innenleitung vom Meßwiderstand bis zur Anschlußstelle des Thermometers. Mit zunehmender Länge des Widerstandsthermometers und mit der Höhe der Temperatur, der die Innenleitung ausgesetzt ist, wird nämlich die Fehlergrenze größer. Bei genauen Messungen muß deshalb die Größe des Innenleitungs-widerstandes beachtet werden. Die Thermometer können auch mit einem vorbestimmten Innenleitungs-widerstand von 3 Ohm ausgerüstet werden (siehe TGL 0-43 762). Dann soll der Innenleitungs-widerstand aus Material mit geringerem Temperaturwiderstandsbeiwert (z. B. Konstantan) bestehen, damit die zusätzlichen Fehler fortfallen.

Man kann auch die Temperatur-Widerstandskurven von jedem Thermometer gesondert aufnehmen und diese Werte von einer amtlichen Prüfungsstelle bestätigen lassen. Dann können die Fehler verkleinert werden, weil ungewisse Einflüsse des Temperaturbeiwertes herausfallen. Die Genauigkeit ist dann nur noch abhängig von der Art des Widerstandsmaterials.

3.253 Fehlergrenze infolge Temperaturschwankungen der Zuleitungen

Je nach Länge und je nach den zulässigen Fehlern durch Temperaturschwankungen der Zuleitungen vom Thermometer zum Anzeigeort werden die Zweileiterschaltungen (Bild 13, 14 und 16) oder die Dreileiterschaltung (Bild 15) angewendet. Der zulässige Leitungswiderstand richtet sich nach der Art der Schaltung und dem Meßbereich.

Die höchstzulässige Entfernung zwischen Thermometer und Anzeiger (Zuleitungslänge) beträgt z. B. bei der Zweileiterschaltung mit 10 Ohm Widerstand der Zuleitung aus Kupferdraht von 1,5 mm² Querschnitt 430 m. Bei der Dreileiterschaltung fälschen Temperaturänderungen der Zuleitung die Anzeige weniger, daher lassen sich mit dieser unter Umständen Zuleitungen entsprechend Widerständen bis zu 300 Ohm verwenden. Legt man die Schaltung selbst an den Meßort und benutzt zwei Leitungen der Brückendiagonale als Zuleitung, so ist unter Umständen ein Zuleitungswiderstand bis zu 500 Ohm zulässig.

Die Fehlergrenzen infolge Temperaturschwankungen der Zuleitungen ergeben sich etwa aus folgenden Angaben:

1. Zweileiterschaltung (Bild 13, 14 und 16). Beide Zuleitungen zum Thermometer liegen im gleichen Meßzweig der Schaltanordnung.

Die Fehlergrenze infolge einer Temperaturschwankung beträgt in grd etwa

$$f = \frac{R_{Cu} \Delta t}{100}$$

Hierin bedeuten:

R_{Cu} Widerstand der Kupferzuleitungen in Ohm,
 Δt Differenz von Maximal- und Minimal-Temperatur der Zuleitung in grd.

2. Dreileiterschaltung (Bild 15). Zwei Zuleitungen liegen in verschiedenen Meßzweigen der Schaltanordnung; ihre Widerstandsänderungen durch Temperaturschwankungen heben sich auf. Eine dritte Leitung führt von dem Verbindungspunkt beider Meßzweige zum Anzeiger oder zur Stromquelle.

Die Fehlergrenze infolge Temperaturschwankungen der Zuleitung beträgt $\pm 0,02$ bis $\pm 0,25\%$ des angezeigten Ausschlages bei 10 Ohm Kupferzuleitung und ± 10 grd Temperaturänderung je nach Meßbereich, Meßspannung und Empfindlichkeit des Anzeigergerätes bei Ausschlagschaltungen. Für genaue Messungen ist der Fehler beim Hersteller zu erfragen. Bei Kompensationsschaltungen ist in der Dreileiterschaltung der Fehler stets Null, sofern die Schaltung so bemessen ist, daß beim Nullabgleich der veränderbare Widerstand gleich dem Thermometerwiderstand ist.

3.254 Fehlergrenze von Anzeigergeräten

| Art des Gerätes (Die Fehlergrenze soll die angegebenen Werte nicht überschreiten) | Fehlergrenze \pm % vom Umfang des Anzeigebereiches |
|--|---|
| 1. Betriebsgeräte (Drehspul- und Quotientengeräte) | 1,0 bis 1,5 |
| 2. Präzisionsgeräte (Drehspul- und Quotientengeräte) | 0,2 bis 1,0 |
| 3. Schreiber (Drehspul- und Quotientengeräte) | 1,5 ⁷⁾ |
| 4. Betriebs-Kompensationsgeräte | 0,2 bis 0,5 |
| 5. Präzisions-Kompensationsgeräte | 0,1 und weniger |

Nach VDE 0410 ist jedes Gerät hinsichtlich seiner Genauigkeit in Klassen einzuordnen. Gesondert davon ist sein Temperaturfehler nach DIN 43 709 Ausg. 8.57 anzugeben.

Bei großen Temperaturmeßbereichen ist der Meßfehler infolge Widerstandsänderung des Anzeigergerätes durch Temperaturschwankungen [90] im allgemeinen vernachlässigbar klein. Bei kleinen Meßbereichen kann der Fehler durch Einführen temperaturempfindlicher Widerstände in einen geeigneten Meßzweig beseitigt werden, indem z. B. bei Verwendung eines Kreuzspulgerätes in Brückenschaltung (Bild 15) der Richtspulenkreis den gleichen Temperaturbeiwert wie der Meßspulenkreis erhält. Derartige Maßnahmen sind im allgemeinen von den Lieferfirmen bereits durchgeführt.

3.255 Vergrößerung der Fehlergrenze durch Spannungsschwankungen der Stromquelle

1. Drehspulgeräte.

Sollspannung ist zu benutzen. Für je $\pm 10\%$ Abweichung der Spannung von der Sollspannung ändert sich der Ausschlag um $\pm 10\%$.

2. Quotientengeräte.

Für je $\pm 10\%$ Spannungsänderung ändert sich der Ausschlag je nach Meßbereich um $\pm 0,1$ bis $\pm 1\%$.

3. Kompensationsgeräte.

Kein Spannungseinfluß.

3.26 Temperaturdifferenz- und Temperaturtendenz-Messung

Ist die Temperaturdifferenz zweier Meßstellen zu bestimmen, so können entweder die Temperaturen der beiden Stellen einzeln oder es kann zweckmäßiger ihre Differenz mit Widerstandsthermometern in Differenzschaltung unmittelbar gemessen werden. Dabei ist zu beachten, daß die Temperatur-Widerstandsbeziehung der verwendeten Thermometer geradlinig sein muß. Das ist bei Verwendung von Kupferdrähten genau, bei Verwendung von Platin-drähten nur annähernd der Fall. Eine sehr gute geradlinige Charakteristik erhält man durch die Verwendung von Nickelthermometern, wenn diese einen Parallelwiderstand geeigneter Größe erhalten [95]. (Über die entsprechenden Messungen mit einem oder mehreren Thermoelementen siehe Ziffer 3.193.)

Die Differenzschaltung von zwei Widerstandsthermometern (oder zwei Thermopaaren) kann auch angewendet werden, wenn die Richtung oder Geschwindigkeit von Temperaturänderungen, also die sogenannte Temperaturtendenz bestimmt werden soll. Man führt die Armatur des einen Thermometers so aus, daß es eine größere Anzeigeverzögerung hat als das andere. Ändert sich die Temperatur des Stoffes, in welchen beide Thermometer eintauchen, dann tritt der Temperaturausgleich im wärmeträgeren Instrument langsamer ein als in dem anderen, so daß der Differenzanzeiger einen Ausschlag ergibt. Seine Größe gibt die Größe der Temperaturänderung je Zeiteinheit, seine Richtung die Richtung der Temperaturänderung (Zu- oder Abnahme) an. Die Temperaturtendenz-Messung ist besonders für die Temperaturregelung wichtig.

4 Einbau der Berührungsthermometer und Messung der Temperaturen

4.1 Vorbemerkung

4.11 Jedes Temperaturmeßgerät zeigt nur die Temperatur seines temperaturempfindlichen Teiles, des „Temperaturfühlers“, an, die im allgemeinen von der zu messenden Temperatur abweicht. Da jeder Temperaturfühler einen Fremdkörper in dem auszumessenden Temperaturfeld bedeutet (siehe Ziffer 1.3), müssen bereits vor Beginn der Temperaturmessung unter Beachtung der Gesetze der Wärmeübertragung⁸⁾ die Gründe für das Entstehen von Meßfehlern überlegt werden. Wie dies im einzelnen zu geschehen hat, ist im folgenden behandelt.

⁷⁾ Fehlergrenze für die Aufzeichnung auf dem Papier.

⁸⁾ Schrifttum über Wärmeübertragung siehe Schrifttumverzeichnis [28] bis [29].

4.12 Für maßgebende Temperaturmessungen ist es wünschenswert, daß zur etwa nötigen Kontrolle zwei dicht nebeneinander liegende Meßstellen zur Verfügung stehen.

4.13 Allgemein gilt als Voraussetzung für richtige Messungen:

Guter Wärmeaustausch zwischen zu messendem Stoff und Temperaturfühler,

kein Wärmeaustausch des Temperaturfühlers mit anderen Körpern durch Leitung oder Strahlung,

keine Störung des Temperaturfeldes durch die Meßeinrichtung (Wärmeableitung von der Meßstelle),

Erhaltung des Prüfzustandes des Meßgerätes durch Schutz vor zerstörenden Einflüssen,

genügend kurze Einstellzeit (Halbwertzeit).

4.2 Temperaturmessung in festen Körpern

4.21 Bei der Temperaturmessung in festen Körpern stören die zur Einführung des Thermometers benötigten Bohrlöcher das Temperaturfeld um so mehr, je größer die Bohrung im Verhältnis zu den Abmessungen des festen Körpers ist und je mehr sich, gemäß dem nachfolgend Gesagten, die Wärmeleitfähigkeit des Thermometers von derjenigen des festen Körpers unterscheidet.

Bei verhältnismäßig großen Körpern guter Wärmeleitfähigkeit (z. B. Stahlmatritzen) kann eine größere Bohrung wohl ohne nennenswerte Störung des Temperaturfeldes durch einen stramm passenden Temperaturfühler eines Flüssigkeits-Federthermometers oder eines Thermopaars oder Widerstandsthermometers mit metallern Schutzrohr ausgefüllt werden; die Messung kann dann einwandfrei sein.

Bei kleineren Abmessungen des festen Körpers, vor allem eines solchen von geringer Wärmeleitzahl, ist das nackte (jedoch ausreichend elektrisch isolierte) Thermopaar vorzuziehen.

4.22 Ein ungeeignet eingebrachtes Thermopaar stört die Temperaturverteilung in einem gut leitenden Metall verhältnismäßig wenig, in einem schlecht wärmeleitenden Stoff dagegen beträchtlich. Die Thermodrähte müssen daher so geführt werden, daß der Meßstelle selbst möglichst keine Wärme entzogen wird.

Bild 17 stellt schematisch einen aus einem Wärme-Schutzstoff gebildeten Zylinder dar (etwa die Wärme-Isolierung eines Dampfrohrs), der von seiner Achse aus geheizt und an der Oberfläche gekühlt wird. Würden die Drähte des Thermopaars radial, also in der Richtung des stärksten Temperaturgefälles verlegt werden (Bild 17 links), so

würde die in ihnen fortströmende Wärme gerade derjenigen Stelle des festen Körpers entzogen, deren Temperatur bestimmt werden soll. Daher wird bei dieser Anordnung die Temperatur zu tief gemessen.

Das Thermopaar ist so zu legen (Bild 17 rechts), daß es wenigstens etwa 10 cm in einer Fläche verläuft, welche die gleiche Temperatur wie die Meßstelle hat, also auf einer durch die Meßstelle gelegten, der äußeren Zylinderfläche gleichachsigen Zylinderfläche. Auch bei dieser Verlegung strömt Wärme durch die Drähte ab, jedoch von solchen Stellen des Körpers, die, wie die Pfeile des Bildes zeigen, von der Meßstelle weiter entfernt sind. Infolgedessen macht sich die Wärmeableitung bis zu der Umgebung der Meßstelle nicht geltend und senkt hier die Temperatur kaum. Die Temperatur wird also richtig gemessen (siehe auch Bild 18).

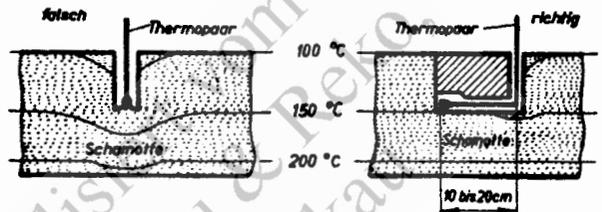


Bild 18

Störung im Temperaturfeld durch Zu- und Ableitung von Wärme durch die Thermopaardrähte

4.3 Temperaturmessung an der Oberfläche fester, an ein Gas grenzender Körper

4.31 Temperaturmessung an ruhenden Oberflächen.

4.311 Die Messung von Oberflächentemperaturen ist deshalb schwierig, weil das Temperaturgefälle von der Oberfläche in Richtung nach dem umgebenden Medium (z. B. einem Gase) hier sehr groß ist. Das Thermometer muß daher die Oberfläche innig berühren; es darf von der Temperatur des Gases nicht beeinflusst werden sowie das Temperaturfeld in der Oberfläche nicht ändern. Das Thermometer müßte daher eigentlich keine räumliche, sondern eine flächenmäßige Ausdehnung haben. Aus diesem Grunde sind Flüssigkeits-Glasthermometer zur Messung von Oberflächentemperaturen weniger geeignet, dagegen kann man Thermopaaren leicht eine Form geben, die den genannten Bedingungen genügt.

4.312 Die Anordnung eines Thermopaars nach Bild 19 links ist falsch, denn in unmittelbarer Nähe der Meßstelle

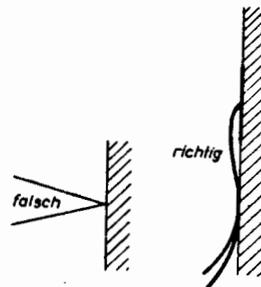


Bild 19

Führung der Thermopaar-drähte bei der Messung der Oberflächentemperatur

würden die Drähte in das an der Oberfläche anliegende Gebiet des großen Temperaturgefälles eingebettet sein, daher viel Wärme fortleiten und diese in vollem Betrage gerade der Berührungsfläche entziehen, deren Temperatur gemessen werden soll.

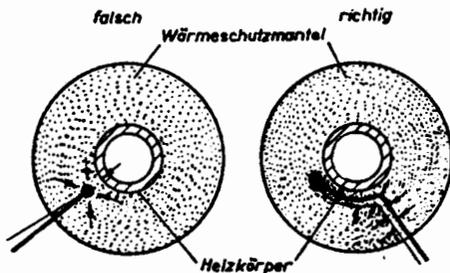


Bild 17

Führung der Thermopaardrähte bei der Temperaturmessung im Innern eines festen Körpers

4.313 Die Wärmeableitung stört weniger, wenn man die Berührungsfläche der Thermodrähte dadurch vergrößert, daß man sie an eine dünne, gut leitende Metallplatte (z. B. aus Kupfer) von etwa 3 cm Durchmesser anlötet (Bild 20). Die abgeleitete Wärmemenge wird jetzt einem

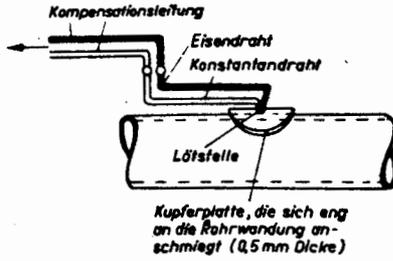


Bild 20

Thermopaar für Messung der Oberflächentemperatur von Rohrleitungen

wesentlich größeren Teil der Oberfläche entzogen und daher die durch den Wärmestrom bedingte Temperaturabsenkung der Meßstelle verkleinert. Verhindert wird eine Temperaturabsenkung dadurch, daß man die Drähte nicht senkrecht zur Oberfläche fortleitet, sondern sie etwa 10 cm parallel zu ihr laufen läßt, um ihnen auf dieser Strecke die Temperatur der Meßstelle zu geben (Bild 19 rechts und 20). Mit einem spitzen Stäbchen aus schlecht wärmeleitendem Material wird die Kupferplatte an die betreffende Oberfläche angedrückt. Die Strahlungszahl der Metallplatte muß, z. B. durch geeigneten Anstrich, ebenso groß gemacht werden wie die der sonstigen Oberfläche. Oft genügt Oxydation des Metallplättchens [170].

4.314 Bei hohen Temperaturen an Metallwänden ist Asbest oder Glimmer zur elektrischen Isolierung der Drähte zu verwenden. Die Thermodrähte werden mit einer dünnen Deckplatte aus dem Stoff des zu messenden Körpers in eine Nut gepreßt (Bild 21).

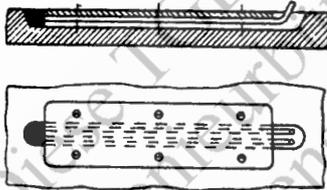


Bild 21

Messung der Oberflächentemperatur bei Metallflächen

4.315 Bei der Messung der Oberflächentemperatur von Mauerwerk oder ähnlich schlecht wärmeleitendem Material werden zweckmäßig zwei Kerben von etwa 10 cm Länge und 1 bis 2 mm Tiefe geschlagen und die Drähte des Thermopaares so hineingelegt, daß sie dicht unter der Oberfläche bleiben. Die Kerben werden dann mit Mörtel verstrichen, so daß die Oberfläche wieder glatt ist. Man kann das Thermopaar auch in eine flache Vertiefung legen und mit einer dünnen Asbestplatte abdecken.

Auch die obige Anordnung (Anpressung der Elementendrähte mit einem oxydierten Metallplättchen nach Bild 21) ist für die Temperaturmessung von Maueroberflächen anwendbar.

Man kann zur Bestimmung hoher Mauerflächentemperaturen auch die Temperaturen in drei verschiedenen Tiefen innerhalb des Mauerwerkes messen und die Oberflächentemperatur daraus extrapolieren.

4.316 Zur Messung schnell wechselnder Oberflächentemperaturen eignen sich sehr gut dünne, auf eine isolierende Schicht aufgetragene Metallfilme (z. B. Gold), deren Widerstand gemessen wird [60].

Es können auch sehr dünne, durch Oxydation gut gegeneinander isolierte Drähte verwendet werden, bei denen eine dünne, galvanisch erzeugte Metallschicht, die einen Teil der Oberfläche bildet, die Verbindung zwischen beiden Thermodrähten herstellt [63] und [64].

4.317 Bei der Messung von Oberflächentemperaturen von Rohren großen Durchmessers werden Meßstelle und Thermodrähte auf der Oberfläche in der Achsrichtung mit dünnen Drähten festgebunden (Bild 22 a). Bei Rohren kleinen Durchmessers können die Thermo-

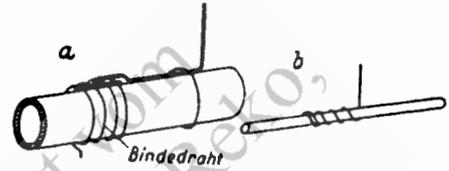


Bild 22

Messung der Oberflächentemperatur von Rohren

- a großer Rohrdurchmesser
- b kleiner Rohrdurchmesser

drähte selbst zum Festbinden der Meßstelle des Thermopaares benutzt werden (Isolierung beachten, siehe Ziffer 3.15); die Thermodrähte werden dann noch einmal oder mehrmals um das Rohr gewickelt (Bild 22 b).

4.32 Temperaturmessung an umlaufenden Oberflächen
Bei der Temperaturmessung an umlaufenden Oberflächen mit Thermoelementen sind verschiedene Verfahren gebräuchlich.

4.321 Bei einem Verfahren wird die Thermospannung des am umlaufenden Körper fest angebrachten Thermopaares durch Schleifkontakte zu der ruhenden Vergleichsstelle und dem Anzeigergerät fortgeleitet. Bis zu Gleitgeschwindigkeiten von etwa 150 m/min haben sich Kupfer/Konstantan-Thermopaare mit Kontakten aus umlaufenden Konstantanscheiben mit ruhenden Konstantanklötzchen und aus umlaufenden Kupferscheiben mit Kupferklötzchen und Kupfergewebebürsten bewährt [105], [118].

4.322 Bei einem zweiten Verfahren gleitet die Meßstelle des Thermopaares mit geringem Anpreßdruck auf der Oberfläche des umlaufenden Körpers. Durch passende Anordnung ist dafür zu sorgen, daß die Reibungswärme ohne Einfluß auf die Temperaturmessung bleibt [133].

4.323 Auch Widerstandsthermometer sind für die Messung an umlaufenden Oberflächen nach dem ersten Verfahren verwendbar, wenn sie zweckmäßig eingebaut werden.

4.324 Oberflächentemperaturen können auch mit Strahlungs-pyrometern (Ziffer 6), durch Photothermometrie (Ziffer 7.1) und mit Temperaturmeßfarben (Ziffer 7.2) gemessen werden.

4.4 Temperaturmessung in Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen

4.41 Allgemeines

Das hier Gesagte gilt allgemein für die Messung in Flüssigkeiten und in Gasen und Dämpfen. Was bei der

Messung in Flüssigkeiten einerseits und in Gasen und Dämpfen andererseits besonders zu beachten ist, ist in den Abschnitten Ziffer 4.45 bzw. 4.46 gesondert angegeben und durch Hinweise auf die allgemeinen Ausführungen in Ziffer 4.41 bis 4.44 ergänzt.

In ruhende und strömende Flüssigkeiten oder Gase, die unter Atmosphärendruck stehen, kann ein Temperaturfühler unmittelbar eingetaucht werden, wenn er durch das Mittel nicht angegriffen wird.

Meistens ist es jedoch notwendig, den Temperaturfühler durch ein besonderes Schutzrohr gegen chemische und mechanische Einflüsse sowie bei Messungen in Verbrennungsräumen gegen Stichflammen zu schützen.

4.42 Schutzrohre

4.421 An Schutzrohre werden folgende Anforderungen gestellt:

Sie sollen

1. gasdicht sein,
2. selbst keine dem Temperaturfühler schädlichen Gase entwickeln,
3. gegen schroffen Temperaturwechsel unempfindlich sein,
4. auch bei höheren Temperaturen von Luft und von dem zu messenden Stoff chemisch nicht angegriffen werden (zuerstfest sein)
5. auch bei höheren Temperaturen ihre Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchungen (Biege-, Schlag, Stoß, Schwingungen) nicht verlieren, sondern „warmfest“ bleiben,
6. widerstandsfähig sein gegen Unterdruck und Überdruck.

Die Schutzrohre müssen auch chemischen Beanspruchungen standhalten. Es ist deshalb zweckmäßig, den geeigneten Werkstoff entsprechend dem Verwendungszweck auszusuchen. Meist wird der Werkstoff mit dem der Behälter oder Rohrleitungen übereinstimmen. Bei angreifenden Stoffen wird der Werkstoff am besten durch Betriebsversuche ermittelt; schon geringe Verunreinigungen können die Brauchbarkeit unter Umständen beeinflussen.

4.422 Über Schutzrohre für Thermoelemente sind in TGL 0-43 720 (Metallene Schutzrohre) und DIN 43 724 Ausg. 12.52 (Keramische Schutzrohre) die wichtigsten Angaben sowie Abmessungen (Längen, Außendurchmesser und Wanddicken) enthalten. Eine Zusammenstellung der in diese Schutzrohre passenden Thermoelemente für Nenndruckstufe 1 und die zugehörigen Thermopaare geben TGL 0-43 733 und TGL 0-43 732.

Bei den Werkstoffen für metallene Schutzrohre sind entsprechend den verschiedenen Werkstoffeigenschaften Richtlinien für die Wahl der Werkstoffe für die verschiedenen Verwendungszwecke (Temperaturmessungen von Gasen, Salzschnmelzen, Metallschnmelzen) und Temperaturbereiche (bis 1200 °C) in TGL 0-43 720 angegeben⁹⁾.

Für hohe Temperaturen (über 1200 °C) und für Messungen in Eisen- und Stahlschnmelzen gibt es kein Schutzrohrmaterial, das allen genannten Anforderungen

⁹⁾ Eine eingehende Zusammenstellung der Eigenschaften und der Verwendungsart von Stählen für Schutzrohre von Thermoelementen und Widerstandsthermometern finden sich ferner im Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 472-30 und 400-49. Verlag Stahl-Eisen, Düsseldorf. Außerdem siehe auch Dechema-Werkstoffblatt. Verlag Dechema, Frankfurt/Main.

genügt. Manche an sich brauchbaren Werkstoffe entwickeln bei hohen Temperaturen Gase oder Dämpfe, von denen das Thermoelement geschützt werden muß. Es ist dann notwendig, zwei Schutzrohre (Innen- und Außenrohr) in gleichachsiger Anordnung zu verwenden, deren Eigenschaften sich ergänzen.

4.423 Metallene Schutzrohre

Bei der Auswahl der Schutzrohre ist darauf zu achten, daß die Baustoffe allein und in Verbindung mit anderen Werkstoffen gegen den zu messenden Stoff beständig sind. Es muß z. B. unter allen Umständen verhütet werden, daß sich galvanische Elemente aus Thermometer-Schutzrohr, dem zu messenden Stoff und Rohrleitung bilden, die eine sehr rasch voranschreitende Korrosion zur Folge haben würden. Man muß hierzu die Erfahrungen der betreffenden Betriebe hinsichtlich Bewehrung der verschiedenen Werkstoffe für Behälter, Leitungen, Ventile und dergleichen heranziehen.

4.423.1 Metallene Schutzrohre für Rauchgasthermometer sowie für Widerstandsthermometer und Thermoelemente, die in Rohrleitungen und Behälter eingeschraubt werden, sind hinsichtlich der Abmessungen und Werkstoffe in TGL 0-43 763 festgelegt. Es finden sich dort auch Angaben über ihre Verwendung und Richtwerte über die Belastung für Wasser und Luft bzw. Dampf bei senkrechter Beaufschlagung in Abhängigkeit von Temperatur, Druck und Strömung. (Die zugehörigen Meßeinsätze für Thermoelemente und Widerstandsthermometer sind in TGL 0-43 735 und 0-43 762 festgelegt. In dem Übersichtblatt TGL 0-43 770 sind die Ausführungsformen gemäß TGL 0-43 764 bis 0-43 766 und TGL 0-43 769 zusammengestellt.)

4.424 Keramische Schutzrohre

Bei Temperaturen über 1200 °C verwendet man für Dauermessungen nur keramische Schutzrohre. Die mechanische Festigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit solcher Rohre ist viel geringer als die von Metallrohren. Demzufolge muß ihr Ein- und Ausbau vorsichtig und unter langsamer Erwärmung bzw. Abkühlung erfolgen. Über Schutzrohre für Thermoelemente hinsichtlich zulässiger Dauertemperaturen, Temperaturwechselbeständigkeit und Gasdichtheit siehe DIN 43 724 Ausg. 12.52 und DIN 40 685 Ausg. 1.57 (Keramische Isolatoren für die Elektrotechnik).

Außerdem kann auch Quarz a' Außenrohr verwendet werden, jedoch im allgemeinen nur bis 1000 °C (für kurzzeitige Messungen auch für noch höhere Temperaturen, z. B. für Stahlschnmelzen bis etwa 1750 °C) [16], [138]. Bei langem Erhitzen verliert der Quarz sehr an mechanischer Festigkeit (wird sehr stoßempfindlich) und auch an Gasdichtheit. Ferner wird Siliziumkarbid, Silnit und Karborundum für Schutzrohre benutzt. Diese Materialien sind chemisch sehr widerstandsfähig, werden aber von chlorhaltigen Gasen und basischen Schlacken stark angegriffen.

Bei Verwendung von mehreren keramischen Schutzrohren (Innen- und Außenrohr) ist durch die Wahl geeigneter Baustoffe zu verhindern, daß sie bei höheren Temperaturen miteinander reagieren und zusammenschmelzen.

4.425 Die Schutzrohre für Glasthermometer oder für Thermometereinsätze werden meist fest in die Rohrleitungen eingebaut, so daß die Thermometer bzw. Thermometereinsätze ohne Betriebsunterbrechungen bei Störungen ausgebaut werden können. Auch lassen sich auf diese Weise leicht gelegentliche Kontrollmessungen durchführen.

Eine Übersicht über genormte Widerstandsthermometer und Thermoelemente mit Schutzrohren, deren Meßeinsätze nach TGL 0-43 735 (Thermoelemente) und TGL 0-43 762 (Widerstandsthermometer) ausgebildet sind, gibt TGL 0-43 770.

Wenn ein Thermoelement die Benutzung eines Schutzrohres nicht erfordert, kann man seinen einen Schenkel als unten geschlossenes Rohr ausbilden, den anderen in der Achse desselben isoliert einführen und am unteren Ende verlöten (Rohrelemente siehe Ziffer 3.20).

4.43 Fehler durch Wärmeableitung

Da die Thermometer selbst und auch die Schutzrohre Fehler durch Wärmeableitung bedingen, müssen sie so

ausgewählt und angeordnet werden, daß dieser Fehler möglichst klein wird.

Um den Fehler durch Wärmeableitung auszuschalten, kann man auch gleichzeitig zwei Temperaturfühler in verschiedenen Tiefen einbauen und aus deren Anzeige die gesuchte Temperatur berechnen [132].

4.431 Für fest in Rohrleitungen eingesetzte zylindrische Schutzrohre läßt sich der Meßfehler f infolge Wärmeableitung und -strahlung nach den Gesetzen der Wärmeübertragung exakt durch graphische Integration der dafür gültigen nichtlinearen Integralgleichung berechnen [71].

Angenähert (siehe [41], [49], [54], [65], [66] und [72] ergibt sich dieser Fehler zu

$$f = t - t_0 = t - t_R (f_1 - f_1 \cdot f_2 + f_2)$$

Darin ist

$$f_1 = \frac{1}{\cos l \sqrt{\frac{a_t + a_{St}}{\lambda} \frac{\pi d}{F}}}$$

und

$$f_2 = \frac{a_{St}}{a_{St} + a_t}$$

Hierin bedeuten (siehe Bild 23):

t die Temperatur des zu messenden Mittels in °C,

t_0 die abgelesene Temperatur am Boden des Schutzrohres in °C,

t_R die Rohrwandtemperatur in °C,

l die Einbaulänge des Schutzrohres in m,

a die Wärmeübergangszahl von dem zu messenden Mittel auf das Schutzrohr in kcal/m²h grad., und zwar a_t durch Leitung, a_{St} durch Strahlung,

d den äußeren Durchmesser des Schutzrohres in m,

γ die Wärmeleitfähigkeit des Schutzrohrmaterials in kcal/m h grad.,

F den Wandungsquerschnitt des Schutzrohres in m².

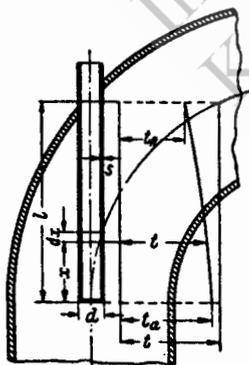


Bild 23
Wärmeableitung
eines einfachen
Schutzrohres

4.432 Aus der angegebenen Gleichung lassen sich unmittelbar die Maßnahmen erkennen, die beim Entwurf der Anordnung zu ergreifen sind, um den Meßfehler f möglichst klein zu machen ([59] und [66]; siehe auch die Bilder 24 und 25). Erwähnt sei, daß die Funktion cosh mit wachsendem Argument zunimmt.

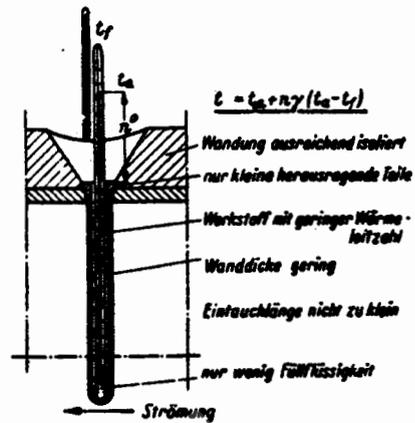


Bild 24
Richtiger Einbau eines Schutzrohres



Bild 25
Richtiges Einbringen
des Thermometers
in das Schutzrohr

4.432.1 Die Rohrwandtemperatur t_R muß der Temperatur t des strömenden Stoffes tunlichst angeglichen werden; dies wird dadurch erreicht, daß man die Rohrwand in der Umgebung der Meßstelle mit einem Wärmeschutzstoff umgibt.

Für sehr genaue Messungen kann man um den Wärmeschutzstoff noch eine elektrische Außenheizung legen, die so zu belasten ist, daß ein auf die Rohrwand unter den Wärmeschutzstoff gelegtes Thermoelement die gleiche Temperatur wie das zu messende Mittel annimmt.

4.432.2 Die Einbaulänge l soll, wie sich aus der graphischen Berechnung ergibt, eine bestimmte, durch die Abmessungen und die sonstigen physikalischen Kenngrößen des Schutzrohres und des Gases bestimmte Länge haben und diese keinesfalls unterschreiten. Durch Verlängern über diese Grenzlänge hinaus läßt sich der Fehler nicht weiter herabsetzen. Das Schutzrohr kann senkrecht oder schräg zur Strömungsrichtung oder in einen Krümmer eingebaut werden; es soll jedoch möglichst entgegen der Strömungsrichtung stehen (Bild 26 und 27), so daß der

Bild 26
Schräger Einbau
eines Schutzrohres

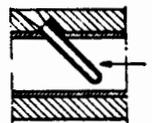


Bild 27
Einbau eines Schutzrohres
in Rohrmittigkeit

strömende Stoff längs des Schutzrohres vorbeiströmt und dabei zuerst auf den temperaturempfindlichen Teil trifft. Es kann ferner in einen mit Wärmeschutz umkleideten Dom eingebaut werden (Bild 28), der mit dem durch-

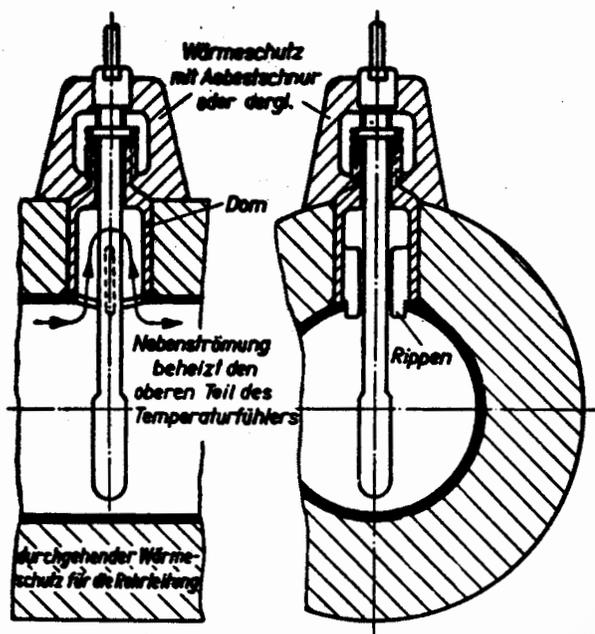


Bild 28

Einbau eines Schutzrohres in eine Rohrleitung mit aufgesetztem Dom

strömten Raum derart in Verbindung steht, daß das Schutzrohr von einem Teilstrom des strömenden Stoffes beaufschlagt wird.

Bei der Bemessung der Einbaulänge und der Wanddicke des Schutzrohres sind die durch die Strömung verursachten mechanischen Beanspruchungen zu berücksichtigen, insbesondere bei hohen Drücken und Temperaturen sowie großen Geschwindigkeiten des strömenden Stoffes und auch bei pulsierender Strömung. Bei solchen Beanspruchungen ist man genötigt, kürzere Schutzrohre zu verwenden und deren Querschnitt nach der Wurzel hin zu verstärken. Der Meßfehler durch Wärmeableitung bleibt wegen der großen Wärmeübergangszahlen unter solchen Meßbedingungen meist hinreichend klein. Ferner muß man bei Höchstdrücken auf hinreichend druckfesten Einbau der Schutzrohre achten und verwendet deshalb Schutzrohre und Einbauten (z. B. Einschweißschutzrohre) gemäß TGL 0-43 763 (Metallene Schutzrohre für Widerstandsthermometer und Thermoelemente).

Die nach außen ragenden Teile sollen so kurz wie möglich und besonders schlecht wärmeleitend sein. (Bei Widerstandsthermometern und Thermoelementen dürfen jedoch die Anschlüsse nicht wärmer werden, als mit Rücksicht auf die Isolierung der Zuleitung zulässig ist.)

4.432.3 Der Wandquerschnitt des Schutzrohres soll für Thermometer so klein sein, wie es mit Rücksicht auf die mechanische Festigkeit zulässig ist. Ebenso soll auch der Durchmesser des Schutzrohres – entgegen der angegebenen Näherungsgleichung (Ziffer 4.431) – möglichst klein gehalten werden.

4.432.4 Die Wärmeübergangszahl a vom Stoff auf das Schutzrohr soll groß sein. Dies wird erreicht durch Vergrößerung der Strömungsgeschwindigkeit, mit welcher

der Wert von a zunimmt. Hierauf beruht die Anwendung der Durchflußthermoelemente (Ziffer 4.468).

Im gleichen Sinne wie die Vergrößerung von a wirkt die Vergrößerung der wärmeaufnehmenden Oberfläche des Schutzrohres etwa durch in Stromrichtung aufgesetzte Rippen (Bild 29) [45], doch dürfen mit Rücksicht auf die

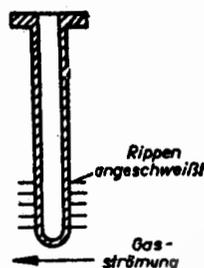


Bild 29
Schutzrohr mit Rippen
in Richtung
der Strömung

Anzeigeverzögerung die Rippen nicht zu große Massen besitzen.

Der Einbau in „tote“ Ecken, die vom zu messenden Stoff nicht durchströmt werden, ist zu vermeiden.

4.432.5 Man verwende für die Schutzrohre Werkstoffe mit möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit (Stahl, Bronze, Messing, Neusilber) und nur dann, wenn es nicht zu umgehen ist, auch Aluminium und Kupfer. Die Wärmeleitfähigkeiten solcher Metalle enthält Tafel 6. Diese Werte gelten bei 20 °C und ändern sich im allgemeinen mit steigender Temperatur nur wenig.

Bei schnell veränderlichen Gas- und Dampftemperaturen und niederen Drücken muß man Schutzrohre kleiner Wärmekapazität, bei Flüssigkeiten und Wasserdampf von hohem Druck solche größerer Wärmeleitfähigkeit vorsehen, um keine Fehler infolge der Wärmeträgheit der Thermometer zu erhalten (siehe Ziffer 1.4).

4.432.6 Über Maßnahmen im Hinblick auf die Meßfehler, die infolge Wärmeübergang durch Strahlung hervorgerufen werden, gelten die Ausführungen in Ziffer 4.462.

Tafel 6: Wärmeleitzahl einiger Metalle in kcal m h grad

| | | | |
|--------------------------|---------|-----------|-----------|
| Wärmefeste Stähle*) | 36 — 47 | Bronze | 36 — 50 |
| Hitzebeständige Stähle*) | 11 — 19 | Messing | 70 — 100 |
| Nichtrostende Stähle*) | 13 | Aluminium | 175 — 195 |
| Neusilber | 18 — 36 | Kupfer | 320 |

*) aus: Stahl-Eisen-Werkstoff 472-50

4.432.7 Der konvektive Wärmetransport im Zwischenraum zwischen Thermometer und Schutzrohr muß weitgehend unterdrückt werden durch eine sorgfältige Abdichtung (Bild 25), geringe Zwischenräume zwischen Thermometer oder Meßeinsatz und Schutzrohr und gegebenenfalls Ausfüllung des Zwischenraumes durch Wärmeschutzmaterial.

4.433 Der nach Ziffer 4.431 berechenbare Wärmeableitungsfehler wird durch die eigene Wärmeableitung des eingebauten Thermometers oder Meßeinsatzes verändert. Maßgebend für den Fehler durch Wärmeableitung sind ebenso wie bei der Anzeigeverzögerung die Wärmeübergangszahl auf das Thermometer und die dem Thermometer entsprechend seinem Aufbau aus verschiedenen Stoffen zuzuordnenden mittleren Zahlenwerte für seinen Wärmedurchgang, seine spez. Wärme und Dichte. Ferner spielen die Abmessungen und Oberflächengestaltung des Thermometers eine Rolle. Es läßt sich der Fehler durch Wärmeableitung in einem beliebigen Stoff bestimmen,

wenn die Fehler in zwei Bezugstoffen, z. B. in Luft und in Wasser sowie die Wärmeübergangszahlen in Luft, Wasser und in dem zu untersuchenden Mittel bekannt sind [23].

Mit zunehmender Wärmeübergangszahl wirkt sich der Einfluß der veränderten Wärmeableitung durch die in die Schutzrohre eingebauten Thermometer bzw. Meßeinsätze so aus, daß der Meßfehler bald einem Grenzwert zustrebt, der nicht mehr unterschritten werden kann. Dieser Grenzwert ist bei vielen technischen Thermometern bereits bei Wärmeübergangszahlen von Wasser erreicht, so daß die Fehler z. B. in Hochdruckdampf etwa ebenso groß wie die in Wasser sind. (Über den zusätzlich zu berücksichtigenden Meßfehler durch Strahlung siehe Ziffer 4.462 [23]).

4.434 Um die Wärmeableitung durch den eingebauten Temperaturfühler möglichst auszugleichen, soll die Wärmeübertragung von dem Schutzrohr auf den Temperaturfühler möglichst gut sein. Bei Thermoelementen z. B. kann man hierzu die Drähte an der Meßstelle in das Schutzrohr einlöten, einschweißen oder anpressen. Zwischen Flüssigkeits- und Widerstandsthermometern und den Schutzrohren verwendet man als Füllmittel Flüssigkeiten, z. B. Öl, bei höheren Temperaturen auch Zinn u. ä. Es ist darauf zu achten, daß das Füllmittel bei der Meßtemperatur nicht teilweise verdampft oder festbrennt. Der Temperaturfühler (z. B. das Quecksilbergefaß eines Glasthermometers) darf auf dem Füllmittel nicht schwimmen, muß vielmehr von ihm bedeckt sein. Zu reichliche Bemessung des Füllmittels vergrößert in gleicher Weise wie zu große Wanddicke des Schutzrohres den Meßfehler durch Wärmeableitung und Verzögerung der Anzeige.

Vor der Verwendung von Quecksilber oder Blei ist wegen der Giftigkeit ihrer Dämpfe zu warnen. Körnige Füllmittel (z. B. Eisenfeilspäne oder Seesand) bereiten häufig Schwierigkeiten, wenn sie über längere Zeit verwendet werden und wenn das Thermometer zur Ablesung teilweise herausgezogen werden muß.

4.44 Messung von mittleren Temperaturen

4.441 Wenn die Temperatur eines Stoffes nicht an allen Stellen die gleiche ist, müssen mehrere Thermometer an verschiedenen Stellen angebracht werden, aus deren Einzelangaben dann der Mittelwert zu bilden ist. Strömt der Stoff z. B. in einer Rohrleitung, so ist bei der Mittelwertbildung auch die Strömungsgeschwindigkeit in den einzelnen Meßpunkten zu berücksichtigen („Netzmessung“).

4.442 Benutzt man Thermoelemente zur Messung von Mitteltemperaturen, so kann man sie, statt sie einzeln mit dem Spannungsmeßgerät zu verbinden, auch zu einer Thermokette hintereinanderschalten. Die Schaltung ist die gleiche wie in Bild 11. Den gesuchten Mittelwert erhält man, indem man den Ausschlag des Anzeigegerätes durch die Anzahl der Thermopaare dividiert (Ziffer 3.193). Die Bildung des Temperaturmittelwertes durch eine Thermokette ist jedoch nur dann zulässig, wenn alle Thermopaare im geraden Bereich ihrer Charakteristik (Grundwertreihe) verwendet werden.

4.443 Widerstandsthermometern kann eine solche Form gegeben werden, daß ihre Drahtwindungen gleichmäßig über das Temperaturfeld gespannt sind (Ziffer 3.223).

4.444 Auch die Temperaturfühler von Flüssigkeitsfederthermometern werden häufig aus einem Rohr von kleinem Querschnitt aufgebaut, das sich über

eine größere Länge erstreckt (Ziffer 2.216). Der gemessene Ausschlag des Anzeigegerätes liefert dann unmittelbar die mittlere Temperatur.

4.445 Die beschriebenen Mittelwertbildungen sind nur zulässig, wenn von Unterschieden der Strömungsgeschwindigkeiten abgesehen werden kann oder wenn diese Unterschiede bei der Anordnung der Temperaturfühler berücksichtigt werden.

4.446 Behelfsmessung

Läßt sich das Thermometer nicht in den Meßraum einbringen, so kann bei sehr gutem Wärmeschutz einer ihn begrenzenden Wand und gutem Wärmeaustausch zwischen dem zu messenden Stoff und der Wand als Notbehelf die äußere Wandtemperatur gemessen werden.

4.45 Messung in Flüssigkeiten

4.451 Bei der Temperaturmessung in Flüssigkeiten ist der durch Wärmeableitung zu erwartende Fehler im allgemeinen viel geringer als bei der Messung in Gasen und Dämpfen, da die Wärmeübergangszahl für Flüssigkeiten wesentlich größer ist als für Gase und Dämpfe von etwa Atmosphärendruck (siehe Schrifttum über Wärmeübergang [28] bis [39]). Auch der Fehler durch Wärmeabstrahlung (Ziffer 4.462) vom Temperaturfühler an umgebende Körper anderer Temperatur (etwa Rohrwände) ist hier praktisch vernachlässigbar.

4.452 Soll die Temperatur einer nichtströmenden Flüssigkeit gemessen werden, so ist die Flüssigkeit ständig durch ein Rührwerk zu durchmischen. Da sich trotzdem unvermischte Schichten an Wänden und in toten Ecken erhalten können, ist das Thermometer in genügendem Abstand hiervon einzubauen.

4.453 Innerhalb hoher Behälter (z. B. Speisewasserbehälter) und in größeren Leitungen oder hinter Mischstellen treten oft erhebliche Temperaturunterschiede auf. Besonders in waagerechten Leitungen oder Kanälen können sich solche Temperaturschichtungen auf große Strecken erhalten. In solchen Fällen empfehlen sich Wirbeleinsbauten vor der Meßstelle (Bild 30).

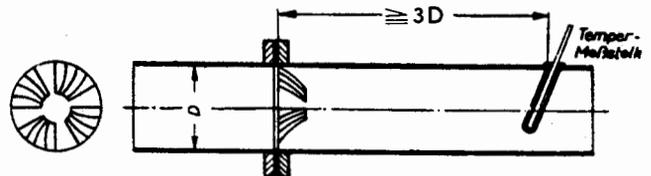


Bild 30

Wirbelblecheinbau zum Messen von Mischtemperaturen

4.46 Messung in Gasen und Dämpfen

Bei der Temperaturmessung in Gasen und Dämpfen ist der einwandfreie Einbau des Thermometers deshalb besonders schwierig, weil einerseits wegen des verhältnismäßig kleinen Wertes der Wärmeübergangszahl von Gasen auf feste Körper die Wärme nur schlecht auf den Temperaturfühler übertragen wird und andererseits Wärme von ihm außer durch Leitung auch durch Abstrahlung an kältere Körper der Umgebung abgegeben wird.

4.461 Fehler durch Ableitung

Wegen der kleinen Wärmeübergangszahl gilt das in Ziffer 4.43 Gesagte besonders für Messungen in Gasen und Dämpfen. Beim Einbau sind daher die dort geschilderten Einflüsse unbedingt zu berücksichtigen.

4.462 Fehler durch Abstrahlung

Die Temperaturmessung in Gasen und Dämpfen mit nicht strahlungsgeschützten Thermometern unterliegt bei Anwesenheit von kälteren oder wärmeren Körpern (etwa Rohr- oder Behälterwänden usw.) durch Strahlung erheblichen Meßfehlern, weil der Temperaturfühler (ebenso wie durch Wärmeleitung) ständig Wärme an die umgebenden Körper abgibt oder von ihnen empfängt; dadurch wird er am vollen Temperaturausgleich mit dem zu messenden Stoff gehindert. Besonders mag hervorgehoben werden, daß die Abstrahlung nicht erst bei so hohen Temperaturen zu berücksichtigen ist, bei denen die Strahlung dem Auge sichtbar ist, sondern auch bei niedrigen Temperaturen, bei denen die Körper nur unsichtbare Wärmestrahlung austauschen. Auch bei der Messung von Lufttemperaturen (siehe Ziffer 4.467) mit nicht strahlungsgeschützten Thermometern können bei Anwesenheit von wärmeren oder kälteren Körpern erhebliche Meßfehler auftreten.

Bei Berechnung der Abstrahlung an kalte Wandungen ist bei Messung in Rauchgasen die Gasstrahlung von Kohlensäure und von Wasserdampf zu beachten (siehe [32], [37] und [68]). Ohne Berücksichtigung der Gasstrahlung wird der Einfluß der Abstrahlung bei der Messung von Rauchgastemperaturen zu groß gefunden.

4.463 Fehler.

In schnell strömenden Gasen¹⁰⁾ In schnell strömenden Gasen treten am Thermometer durch Reibung und durch Stauwirkung Temperaturerhöhungen gegenüber der Gastemperatur ein. Man mißt deshalb einen gegen die tatsächlich vorhandene Gastemperatur erhöhten Wert. Diese Temperaturerhöhung beträgt für längsangeströmte Platten etwa das 0,845fache der sich durch adiabatische Verzögerung der Strömung bis zur Geschwindigkeit 0 ergebenden Temperatursteigerung. Diese beträgt für Luft bei einer Geschwindigkeit von

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|---------|
| 25 | 50 | 100 | 150 | 200 m/s |
| 0,3 | 1,2 | 5 | 11 | 20 °C. |

Besondere Thermometer (Hakenrohrthermometer, Diffusorthermometer, Kugelthermometer) ermöglichen es, fast die volle Staupunkttemperatur $t_{gem}^{11)}$ einer Strömung zu messen. Die tatsächliche Gastemperatur t_w ergibt sich, wenn man von Strahlungseinflüssen absieht, daraus zu

$$t = t_{gem} \frac{A w^2}{2 g c_p}$$

Hierin bedeuten:

- A das mechanische Wärmeäquivalent $\frac{1}{427}$ [kcal/mkg]
- w die Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
- g die Erdbeschleunigung 9,81 [m/s²]
- c_p die spez. Wärmekapazität bei konstantem Druck [kcal/kg grd].

4.464 Verminderung der Abstrahlung durch „Strahlungsschutz“

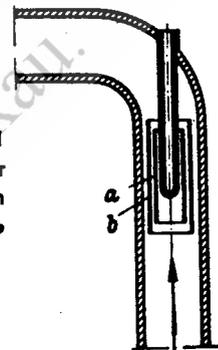
Die Abstrahlung des Thermometers an kältere Körper der Umgebung (z. B. eine schlecht oder gar nicht isolierte Rohrwand) kann durch einen sogenannten „Strahlungsschutz“ vermindert werden, d. h. durch ein stark reflektierendes Metallblech (z. B. Aluminiumblech mit blanker Oberfläche), welches zylinderförmig um den temperaturempfindlichen Teil des Thermometers in einiger Entfernung

von diesem angebracht ist. Dieser Blechzylinder nimmt dann eine Temperatur an, die zwischen der hohen Temperatur des Thermometers und der niedrigen Temperatur der kalten Wand liegt. Da dann das Thermometer nicht im Strahlungsaustausch mit der kalten Wand, sondern mit dem wesentlich wärmeren Blechzylinder steht, wird die Abstrahlung und damit der Meßfehler wesentlich verringert. Er kann noch mehr durch einen zweiten Strahlungsschutz herabgesetzt werden, den man um den ersten Schutz herumlegt (Bild 31).

Der zur Verminderung der Abstrahlung dienende Strahlungsschutz entspricht gewissermaßen der oben in Ziffer 4.432.1 zur Verhinderung der Wärmeableitung empfohlenen äußeren Belegung der Rohrwand mit einem Wärmeschutzstoff.

Ebenso wie der durch Ableitung bedingte Meßfehler durch die um das Rohr gelegte Isolierung zwar vermindert, aber erst durch eine elektrische Heizung der Isolierung zum Verschwinden gebracht werden kann, so genügt auch der Strahlungsschutz allein noch nicht, um die Abstrahlung des Meßgerätes völlig zu beseitigen. Dies

Bild 31 Schutzrohr mit doppeltem Strahlungsschutz a und b



kann jedoch dadurch geschehen, daß man den Strahlungsschutz durch eine elektrische Heizung auf diejenige Temperatur erwärmt, welche das Gas besitzt. Dann kann das Meßgerät keine Wärme durch Strahlung verlieren und nimmt daher die Temperatur des Gases an.

4.465 Verminderung des Strahlungseinflusses durch Verringerung der Strahlungskonstanten

Aus der Theorie folgt, daß die Strahlungsfehler durch Verringerung der Strahlungskonstanten des Thermometergefäßes (am besten durch Vergoldung, gegebenenfalls auch durch Versilberung) auf wenige Prozente der ursprünglichen herabgedrückt werden können. Wenigstens soll das Quecksilbergefäß eines Flüssigkeitsthermometers mit einem Aluminiumblech umgeben werden, wenn sich wärmere oder kältere Körper in seiner Nähe befinden, weil das Aluminium die Wärmestrahlung weniger stark absorbiert als das Glas des Thermometers.

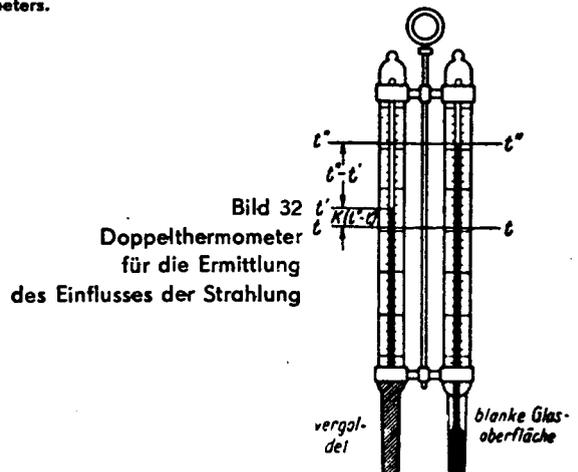


Bild 32 Doppelthermometer für die Ermittlung des Einflusses der Strahlung

¹⁰⁾ Schrifttum über schnell strömende Gase siehe [38], [48], [50], [61] und [73].
¹¹⁾ Im Schrifttum finden sich dafür auch Bezeichnungen wie „Kesseltemperatur“ und „Gastemperatur“.

Durch gleichzeitige Verwendung von zwei Thermometern mit verschiedener Oberflächenstrahlung kann der Strahlungseinfluß auch rechnerisch ausgeglichen werden (Bild 32). Mit den Bezeichnungen dieses Bildes ist die gesuchte Temperatur t :

$$t = t' - K (t'' - t')$$

Darin ist K eine von der Beschaffenheit der beiden Thermometer abhängige Konstante, die bei der im Bilde angegebenen Anordnung bei 0,55 cm Gefäßdurchmesser etwa 0,03 beträgt.

4.466 Verminderung des Strahlungseinflusses durch Verwendung von dünn-drähtigen Thermoelementen

Die Wärmeübergangszahl von Gasen an Drähte (und drahtähnliche Gebilde) ist außer von der Gasgeschwindigkeit abhängig vom Durchmesser des Drahtes und nimmt zu mit abnehmender Dicke. Dies hat zur Folge, daß z. B. bei dünn-drähtigen Thermoelementen die Wärmeabstrahlung der kleinen Oberflächen mengenmäßig zurücktritt gegenüber der Wärmeaufnahme durch Berührung mit dem umgebenden Mittel. Bei der Verwendung von äußerst dünnen Drähten sind daher Temperaturmessungen auch ohne Strahlungsschutz einwandfrei, auch wenn sich Gegenstände von anderer Temperatur in der Nähe der Drähte befinden. Dünn-drähtige Thermoelemente ermöglichen es auch, schnell wechselnde Temperaturen zu messen; denn die dünnen Drähte haben nur eine geringe Wärmespeicherefähigkeit und folgen wegen der großen Wärmeübergangszahl rasch dem Wechsel der Temperatur (siehe auch Ziffer 4.316).

4.467 Messung der Raumlufttemperatur

Die sehr oft benutzte Form der Zimmerthermometer (Bild 33, links) ist zur Bestimmung der Lufttemperatur

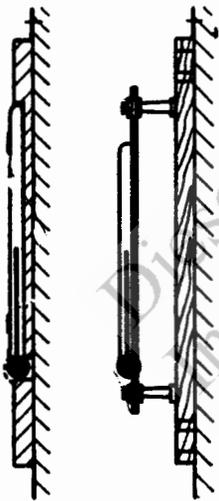


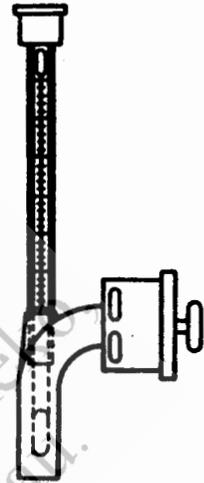
Bild 33
Zimmerthermometer.
Links falsche,
rechts richtige Ausführung

wenig geeignet, da die Quecksilberkugel mit der Zimmerluft kaum in Berührung kommen kann, dafür aber der Wärmeübertragung von der Wandseite her in vollem Maße ausgesetzt ist. Die Luft muß den Temperatursensor frei umspülen können; dieser muß möglichst weit von der Wand entfernt sein. Zwischen Temperatursensor und Wand soll schlecht leitendes Material angebracht sein, um den Wandeinfluß gering zu halten [98 a]. Wesentlich richtiger sind daher die Temperaturangaben des Thermometers der Ausführung rechts im Bild 33.

Eine einwandfreie Bestimmung der Lufttemperatur läßt sich ausführen mit dem Assmannschen Aspirations-thermometer [57], bei welchem die Luft durch einen

kleinen Ventilator mit Uhrwerk (Bild 34) mit einer gewissen Geschwindigkeit an dem Thermometer mit doppeltem Strahlungsschutz vorbeigesaugt wird. Es verbindet die Anwendung des Strahlungsschutzes mit der oben erwähnten Maßnahme (Ziffer 4.432.4), durch Vergrößerung der Geschwindigkeit den Meßfehler zu verkleinern.

Bild 34
Aspirationsthermometer



4.468 Messung mittels Durchflußthermoelement

Bei den Durchflußthermoelementen wird durch Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit die Wärmeübertragung an den Temperatursensor vergrößert und der durch die Wärmeverluste bedingte Meßfehler verringert. Um bei Temperaturen von 700 °C und mehr die Fälschung der Messung durch die Abstrahlung an die Umgebung zu verringern, muß diese Wärmeabfuhr vom Temperatursensor zur Umgebung durch einen besonders wirksamen Strahlungsschutz unterbunden werden. Dies wird bei den Durchflußthermoelementen nach Schack [44] und Wenzl [47] durch zwei konzentrisch angeordnete Strahlungsschirme aus hitzebeständigen, keramischen Stoffen zwischen dem Thermoelement-Schutzrohr und dem Absaugerohr erreicht. Die äußere Reihe deckt im wesentlichen die Strahlungsverluste nach außen, die innere Reihe nimmt annähernd die volle Gastemperatur an und isoliert die Meßstelle gegen Wärmeverluste. Die obere Temperaturgrenze beträgt 1600 °C.

Die Gasgeschwindigkeit kann durch Absaugen, z. B. mit Dampf oder Luftstrahlpumpe (Preßluft), gesteigert werden (Absauge-Thermoelement, Bild 35) oder dadurch, daß man das zu untersuchende Gas, wenn es unter Überdruck steht, durch einen engen Querschnitt abströmen läßt (Ausblase-Thermoelement, Bild 36).

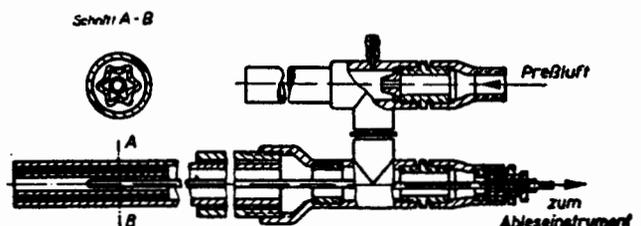


Bild 35
Absauge-Thermoelement (> 1100 °C)

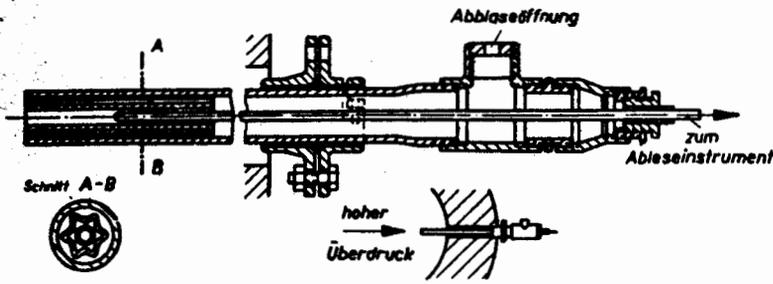


Bild 36
Ausblase-Thermoelement (< 1100 °C)

Werden Durchflußthermoelemente mit Dampf betrieben, so ist zu beachten, daß die Temperatur der Vergleichsstelle durch den Dampf beeinflusst werden kann.

Genaue Gastemperaturmessungen können mit dem Gasthermometer nach *Herm. Schmidt* [69] durchgeführt werden. Bei diesem Gerät wird die Meßstelle des Thermopaars selbst aufgeheizt (etwa durch einen an die Meßstelle angelegten elektrisch geheizten Bügel) und ihr so die durch Strahlung verlorengelungene Wärme wieder zugeführt. Die Heizung der Meßstelle wird so lange verändert, bis ein Beschleunigen des Gasstromes in der Nähe der Meßstelle durch plötzliches Absaugen keine Änderung der Temperaturanzeige mehr hervorruft. Es ist dann die zugeführte Wärmemenge gleich der abgestrahlten und die Temperatur des Gases gleich der der Meßstelle. Da die Messung mit diesem Gerät einige Zeit beansprucht, wird es praktisch wenig verwendet, obwohl es sehr genaue Messungen gestattet.

Die Durchflußthermoelemente eignen sich besonders zur Temperaturmessung langsam strömender Gase, z. B. von Rauchgasen und von Luft bei Vorwärmern.

Bei hohen Temperaturen, bei denen Thermoelemente bzw. deren Schutzrohre versagen, kann man die Temperatur des auf die Gastemperatur gebrachten Absaugestutzens mit einem Strahlungs-pyrometer (Bild 37) bestimmen. (Strahlungs-pyrometer im Abschnitt 6.)

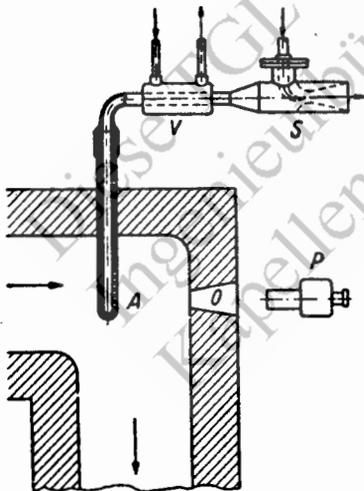


Bild 37

Absaugeeinrichtung und Strahlungs-pyrometer

- A Absaugerohr
- O Öffnung zum Anvisieren des Absaugerohres
- P Strahlungs-pyrometer
- S Strahl-pumpe
- V Kühlvorlage

4.47 Messung in Metallschmelzen¹²⁾

Für die Temperaturmessung in Metallschmelzen, insbesondere in Eisen- und Stahlschmelzen über 1300 °C, wer-

den Hand-Tauchthermoelemente nach Bild 38 für Tauchmessungen in kleinen Öfen, Pfannen usw. verwendet, während für Messungen in großen Schmelzöfen fahrbare Tauchthermoelemente nach Bild 39 entwickelt wurden. Die Fehlergrenze bei Tauchtemperaturmessungen in Metallschmelzen beträgt je nach Meßbedingungen bis zu ± 20 grad.

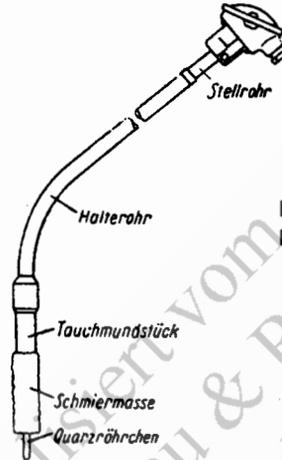


Bild 38
Hand-Tauchthermoelement

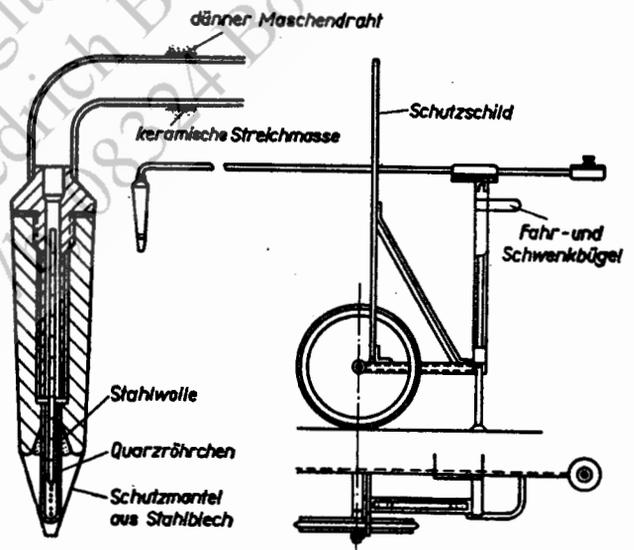


Bild 39

Fahrbares Stahl-Eintauchelement

5 Eichung (Einmessung) und Prüfung der Berührungsthermometer

5.1 Allgemeines

5.11 Unter Eichung (Einmessung) eines Meßgerätes ist im folgenden der Vorgang zu verstehen, bei dem die Anzeige des Meßgerätes bestimmten Sollwerten zugeordnet wird.

5.12 Unter Prüfung ist der Vorgang zu verstehen, bei dem die bereits durch Eichung (Einmessung) erfolgte zahlenmäßige Zuordnung auf ihre Richtigkeit überprüft und bei dem etwaige Abweichungen der angezeigten Istwerte von den Sollwerten festgelegt werden (z. B. in einer Berichtigungskurve).

¹²⁾ Schrifttum hierüber [16], [17], [53], [117], [127], [138].

5.13 Die Temperaturmeßgeräte (auch die amtlich geeichten oder geprüften) sind von Zeit zu Zeit oder nach längerem Lagern auf die Richtigkeit ihrer Anzeige nachzuprüfen [44 a]. Dies geschieht praktisch am besten nach Ziffer 5.2. Von einschlägigen Firmen werden Prüfeinrichtungen geliefert, mit denen die Genauigkeit der Temperaturmeßgeräte zuverlässig geprüft werden kann.

5.14 Bei der Eichung und Prüfung sind die in Ziffer 4.43 behandelten Gesichtspunkte betreffend Wärmeübergang und Wärmeableitungsfehler zu beachten. Grundsätzlich sollen alle Thermometer unter Ausschluß von Wärmeableitungsfehlern geeicht sein (z. B. Flüssigkeits-Glasthermometer mit genügend tief eintauchendem Temperaturfühler). Ist diese Bedingung nicht erfüllt, dann muß auf dem Gerät deutlich erkennbar angegeben sein, unter welchen Bedingungen die Eichung gilt (z. B. für welche Eintauchtiefe des Fühlers; siehe auch Ziffer 2.13).

5.15 Die Prüfung ist bei erschütterungsfrei aufgestelltem Anzeigergerät bei steigender und fallender Temperatur vorzunehmen.

Um eine Abweichung der Verhältnisse bei der praktischen Anwendung von denen bei der Eichung oder Prüfung berücksichtigen zu können, soll zusammen mit dem Eich- oder Prüfergebnis angegeben werden:

1. Bei den Flüssigkeits-Glasthermometern die Berücksichtigung der Temperatur des herausragenden Fadens.

2. Bei den Flüssigkeits-Federthermometern, bei welchem Höhenunterschied zwischen Temperaturfühler und Anzeigeteil geeicht oder geprüft wurde, ferner die Temperatur des letzteren und der Übertragungsleitung. Der Prüfschein soll daneben Angaben über die Berichtigung bei Änderungen des Höhenunterschiedes enthalten.

3. Bei Thermoelementen die Temperatur der Vergleichsstelle. Gemäß TGL 0-43710 ist auf dem Prüfschein die Thermospannung in Abhängigkeit von der Temperatur für die Bezugstemperatur 0 °C anzugeben.

Die Eich- oder Prüfscheine für die zugehörigen Anzeigergeräte sollen die Betriebslage, die zugehörige Art des Thermopaars, den berücksichtigten Leitungswiderstand und die Temperatur bei der Prüfung (im allgemeinen 20 °C) enthalten. Ferner ist die Klasse des Anzeigergerätes und der Temperatureinfluß auf das Anzeigergerät nach DIN 43 709 Ausg. 8.57 anzugeben.

4. Bei Widerstandsthermometern ist es üblich, auf dem Eich- oder Prüfschein den Gleichstromwiderstand in Abhängigkeit von der Temperatur anzugeben. Daneben soll der Thermometerstrom angegeben sein, mit dem die Eichung oder Prüfung durchgeführt wurde (siehe Ziffer 3.242, Ziffer 3).

Die Prüfscheine für die zugehörigen Anzeigergeräte sollen enthalten (DIN 43 709): Betriebslage, Stromartzeichen, Größe der Spannung am Meßgerät und des Thermometerstromes, Art des Meßwiderstandes, Nennwiderstand des Thermometers (bei 0 °C), Sollwert des Zuleitungswiderstandes zum Thermometer und die Temperatur des Anzeigergerätes bei der Prüfung (im allgemeinen 20 °C). Ferner ist die Klasse des Anzeigergerätes und sein Temperaturfehler auf dem Anzeigergerät anzugeben.

5.2 Vergleich der Thermometer mit amtlich geeichten Thermometern

5.21 Berührungsthermometer können geprüft oder geeicht werden durch Vergleich mit einem amtlich geeichten Thermometer oder durch Vergleich mit Festpunkten der Temperaturskala.

5.22 Zum Vergleich der Berührungsthermometer verwendet man für Temperaturen bis etwa 450 °C Flüssigkeitsbäder, denen die gewünschte Temperatur erteilt wird.

Folgende Bäder können verwendet werden:

| | |
|--|----------------------|
| Wasser | für etwa 5 bis 90 °C |
| Naphthalin | für 80 bis 200 °C |
| Öl je nach der Sorte . | für -20 bis 350 °C |
| Schwefel | für 113 bis 445 °C |
| Kali-Natronsalpeter- Mischung | für 300 bis 450 °C |

besondere
Vorsicht
geboten

5.23 Das Beispiel eines Flüssigkeitsbades, in dem gewünschte Temperaturen erzeugt werden können, zeigt Bild 40. Man stellt eine Reihe ausgewählter Tempera-

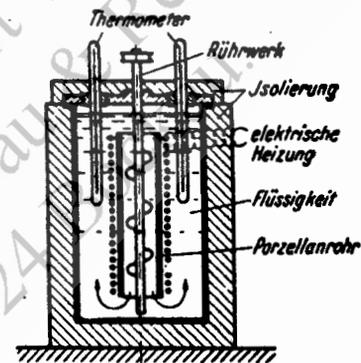


Bild 40

Thermometerprüfeinrichtung (Ölbad mit Rührvorrichtung)

turen ein, wobei für jede derselben der Behorrungsstatus abgewartet werden muß. Zur Kontrolle empfiehlt es sich, je eine Prüfreihe bei steigender und bei fallender Temperatur aufzunehmen. Um eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Bade zu erreichen, ist dieses ständig zu rühren.

5.24 Für Temperaturen bis etwa 750 °C kann man zum Temperaturvergleich einen elektrisch beheizten Block aus gut wärmeleitendem Metall benutzen (siehe Bild 41 [61 a]).

Die zu vergleichenden Thermometer müssen an der Wand der Bohrungen gut anliegen, genügend tief in die Bohrungen eintauchen und sollen gegen die Einführungsöffnung, ähnlich wie in Bild 25 dargestellt, abgedichtet sein. Durch Vertauschen der beiden Thermometer muß man sich vergewissern, daß keine Temperaturunterschiede zwischen den Bohrungen vorhanden sind. Die Temperaturfühler des Prüflings und des Kontrollthermometers sollen sich während des ganzen Prüfvorganges stets in genau gleicher Höhenlage befinden.

Die Prüfung erfolgt zweckmäßigerweise abwechselnd bei steigender und fallender Temperatur. Hierbei soll bei Flüssigkeits-Glasthermometern der Flüssigkeitsfaden jeweils nur um eine geringe Strecke aus dem Ofen herausragen. In diesem Falle ist eine Fadenberichtigung nicht erforderlich.

5.25 Thermoelemente können auch im elektrischen Röhrenofen (Bild 42) verglichen werden.

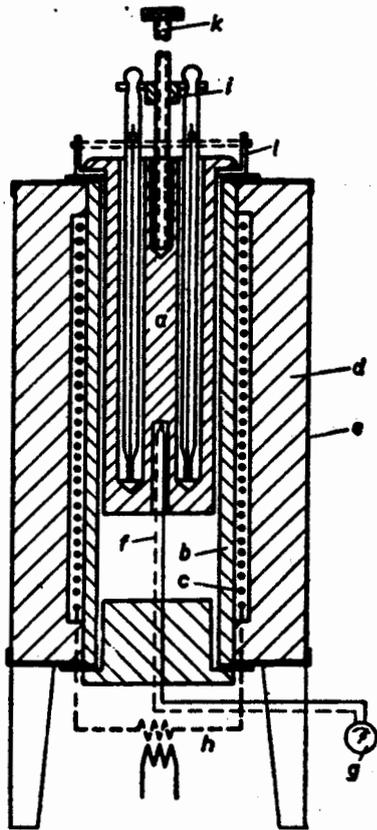


Bild 41

Thermometerprüfgerät (Metallblock)

- a Einsatz für Aufnahme der Thermometer,
- b Röhrenofen,
- c elektrische Heizung,
- d Wärmeschutzhülle,
- e Blechmantel,
- f Thermoelement,
- g Anzeigegerät
- h Schiebetransformator,
- i Haltemutter,
- k Gewindespindel,
- l Vorrichtung zum Herausheben des Einsatzes aus dem Ofen

Hierbei ist folgendes zu beachten:

1. Heizrohr aus keramischen Baustoffen mit nicht mehr als 50 mm Innendurchmesser und mindestens 500 mm Länge verwenden. Vor der Benutzung ist die Temperaturverteilung längs des Heizrohres zu ermitteln, wobei der in Bild 42 dargestellte Verlauf vorhanden sein soll, damit Wärmeströmung innerhalb der zu prüfenden Thermoelemente nahe der Meßstelle vermieden wird. Wicklungsmaterial: für Temperaturen bis 1000 °C Chrom-Nickel, für Temperaturen bis 1300 °C Platin-Folie und bis 1500 °C Molybdän (Schutzgasbespülung).
2. Der Ofen darf nur für Prüf- oder Eichzwecke verwendet werden, keinesfalls daneben für irgendwelche chemische Untersuchungen.
3. Der Ofen ist nur mit horizontal liegendem Rohr zu benutzen; die Rohrenden müssen abgeschlossen werden.
4. Die Meßstellen der eingeführten Thermopaare müssen dicht nebeneinander liegen und dürfen die Rohrwandung nicht berühren.
5. Bei Vergleich unedler Thermoelemente bei Temperaturen über 800 °C mit Pt Rh/Pt-Elementen müssen letztere durch keramische Schutzrohre vor den von den unedlen Thermoschenkeln und deren Isolierung ausgeschleuderten Dämpfen geschützt werden. Eventuell werden zwei keramische Rohre mit Abstand ineinander geschoben, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erhalten.
6. Vor der Ablesung der Thermospannung muß die Ofentemperatur mindestens 20 Minuten gleich gehalten werden. Hierzu wird zweckmäßigerweise die Stromstärke am Stufenwandler verändert. Falls Stufenwandler nicht mit genügend feinen Stufen zur Verfügung stehen, benutzt man zusätzlich einen Regelwiderstand.

5.26 Im Notfalle kann ein Temperaturmeßgerät betriebsmäßig an seiner Verwendungsstelle hinreichend genau mit einem amtlich geeichten Thermometer in der Weise verglichen werden, daß man beide entweder zusammen in das gleiche (beachte hierbei Ziffer 5.25, Nr. 5) oder in zwei getrennte, nebeneinander liegende Schutzrohre oder Meßöffnungen einbaut. Im letzteren Falle müssen die Meßgeräte nach einer längeren Ableszeit vertauscht und dann einer Nachprüfung im gleichen Umfang unterzogen werden. Derartige Prüfungen müssen selbstverständlich im Beharrungszustande der Temperaturverteilung durchgeführt werden. Das Ergebnis darf nicht auf Temperaturverteilungen übertragen werden, die von der Temperaturverteilung bei der Prüfung abweichen (z. B. infolge anderer Einbauverhältnisse).

Im allgemeinen wird es nicht möglich sein, bei derartigen Messungen eine ebenso enge Fehlergrenze zu erzielen wie auf einem vorbereiteten Prüfstand. Trotzdem können die Ergebnisse unter Umständen genauer sein als die erst nach dem Ausbau der Temperaturfühler gewonnenen; so verursacht z. B. die Ungleichförmigkeit in den Thermoschenkeln, die sich während ihres Gebrauches unter ungünstigen Bedingungen einstellen kann, je nach der Temperaturverteilung längs der Thermopaare verschieden große Fehler. In diese gibt eine derartige Prüfung einen Einblick. Besonders störend macht sich die erwähnte Ungleichförmigkeit der Thermopaare bemerkbar, wenn deren Eintauchtiefe gegenüber dem Betriebszustand verändert wird [135].

5.3 Vergleich der Thermometer mit Festpunkten der Temperaturskala

5.31 Da die Eichung und Prüfung von Thermometern durch Vergleich mit Festpunkten schwierig ist, wird sie in der Praxis nur selten durchgeführt. Lediglich die Richtigkeit der Nullpunktlage wird zweckmäßig durch Vergleich mit dem Schmelzpunkt des Eises überprüft. Dies geschieht praktisch mit Geräten nach Bild 43 (die Geräte können auch als Behälter für die Vergleichsstelle von Thermoelementen benutzt werden). Das verwendete Eis

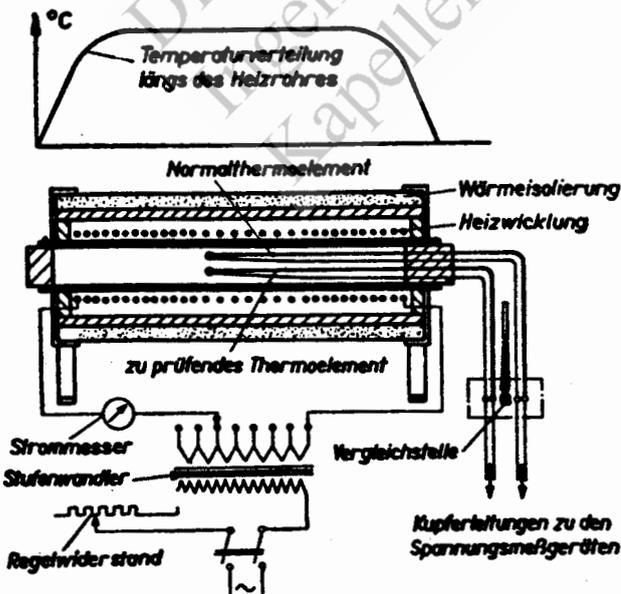


Bild 42

Elektrischer Röhrenofen

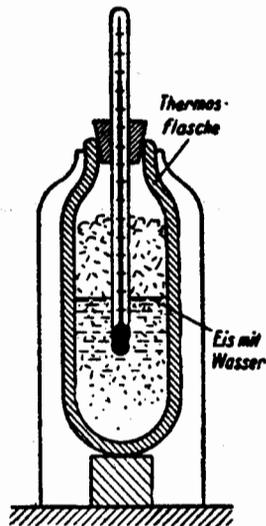


Bild 43
Einrichtung zur Prüfung
bei Temperaturfestpunkten.
Festpunkt: Schmelzendes Eis

soll zur Vermeidung von Meßfehlern klar und salzfrei und das Wasser destilliertes Wasser sein. Der Temperaturfühler muß genügend tief in die Zone eintauchen, die mit Eis-Wasser-Mischung gefüllt ist, damit Fehler durch Wärmezu- oder -abfluß vermieden werden.

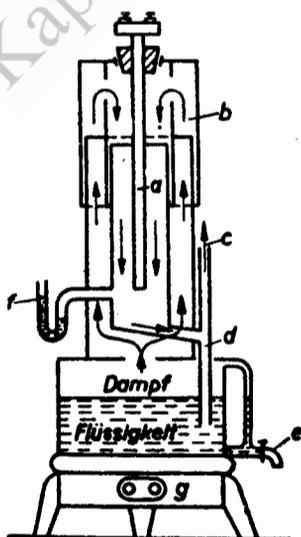
Bei der Prüfung von Thermoelementen und Widerstandsthermometern muß darauf geachtet werden, daß durch die Feuchtigkeit und das sich gegebenenfalls innerhalb der Schutzrohre bildende Kondensat keine Isolierungsverschlechterung entsteht, durch die sich Meßfehler ergeben können.

5.32 Praktisch kommt auch noch der Vergleich mit dem Siedepunkt des Wassers in Frage. Bild 44 zeigt eine Prüfeinrichtung hierfür. Bei der Überprüfung von Thermometern an Siedepunkten ist auf die Abhängigkeit der Siedetemperaturen vom Druck zu achten.

Bei der Prüfung mit der Einrichtung nach Bild 44 ist folgendes zu beachten:

1. Nach Beginn der Heizung warten, bis die in der Prüfeinrichtung eingeschlossene Luft ausgetreten ist und das zu prüfende Thermometer sich auf den Prüfpunkt eingestellt hat. Hierzu muß das Thermometer in kurzen Zeitabständen abgelesen werden.
2. Durch mäßiges Beheizen Dampfüberdruck vermeiden, jedoch den vorhandenen zum Barometerstand hinzufügen.
3. Bei länger dauernden Prüfungen auf ausreichenden Flüssigkeitsstand achten.
4. Mit einer Rückkühleinrichtung kann der kondensierte Dampf in den Flüssigkeitsbehälter zurückgeleitet werden. Dies ist insbesondere bei Verwendung anderer Flüssigkeiten als Wasser zu empfehlen.

Bild 44
Einrichtung zur Prüfung
bei Temperaturfestpunkten.
Festpunkt: Siedepunkt
einer Flüssigkeit
a Einsatz
für Thermometer
b einstellbarer Kopf
(für verschiedene
Thermometerlängen)
c Dampfaustritt
d Kondensatrücklauf
e Entleerungshahn
f Manometer
g elektr. Heizung



6 Strahlungspyrometer

6.1 Allgemeines

6.11 Messung mit Strahlungspyrometern

Bei der Messung höherer Temperaturen werden bevorzugt Strahlungspyrometer angewendet, da mit Berührungsthermometern Schwierigkeiten auftreten. Die Messung beruht auf dem Zusammenhang der Temperatur mit den Eigenschaften der ausgesandten Strahlung (Intensität bei bestimmter Wellenlänge, Farbe, Intensität der Gesamtstrahlung) des Körpers, dessen Temperatur gemessen werden soll. Dabei muß das Strahlungsvermögen (siehe 6.13) der strahlenden bzw. der absorbierenden Oberfläche bekannt sein.

Wenn der Wellenlängenbereich der Strahlung sehr klein ist, spricht man von einfarbiger oder monochromatischer Strahlung oder auch von Teilstrahlung. Die Intensität der einfarbigen Strahlung ist im sichtbaren Gebiet des Spektrums der Leuchtdichte proportional. Die Verteilung der Strahlungsintensität über den sichtbaren Wellenlängenbereich (sichtbares Spektrum) bestimmt die Farbe der Strahlung.

Das Integral der Strahlungsintensität über den gesamten Wellenbereich und einen bestimmten Raumwinkel ergibt die Intensität der Gesamtstrahlung in dem bestimmten Raumwinkel.

6.12 Die Schwarze Strahlung

Zur Festlegung der Temperaturskala für Temperaturen oberhalb des Goldschmelzpunktes (1063 °C, siehe Tafel 2) und zur Eichung der Strahlungspyrometer benutzt man einen Normalstrahler mit bekannter Strahlungszahl (siehe 6.13). Der Normalstrahler ist der sogenannte „Schwarze Körper“.

Der Schwarze Körper ist verwirklicht durch einen allseitig geschlossenen Hohlraum, dessen Wandungen strahlungsundurchlässig und auf gleicher Temperatur sind. Damit seine Strahlung – sogenannte „Schwarze Strahlung“ – gemessen werden kann, hat er eine möglichst kleine ausstrahlende Öffnung. Seine Strahlungsintensität E_0 ist nur von seiner Temperatur und nicht von seiner sonstigen Beschaffenheit abhängig und hat bei jeder Temperatur für alle Wellenlängen das Höchstmaß.

6.13 Das Strahlungsvermögen

Die Strahlungsintensität E aller Körper ist kleiner als diejenige des Schwarzen Körpers gleicher Temperatur, also als diejenige der Schwarzen Strahlung. Sie wird nach dem Kirchhoffschen Gesetz für beliebige Wellenlängen und Temperaturen durch Multiplikation der Strahlungsintensität E_0 des Schwarzen Körpers gleicher Temperatur mit dem Strahlungsvermögen ε des betrachteten Körpers bei gleicher Temperatur und Wellenlänge erhalten:

$$E = \varepsilon E_0.$$

Das Strahlungsvermögen ε liegt zwischen 0 und 1 ($\varepsilon = 0$ für vollständig reflektierende oder durchlässige Körper, $\varepsilon = 1$ für den vollständig absorbierenden Hohlraumstrahler, also für den Schwarzen Körper) und ist zahlenmäßig gleich dem Absorptionsvermögen. Es wird im Schrifttum auch mit „Emissionsvermögen“, „Strahlungszahl“ oder „Schwärzegrad“ und anderen Ausdrücken bezeichnet.

Das Gesagte gilt ebenso für die Strahlung einzelner Wellenlängenbereiche (einfarbige oder monochromatische Strahlung oder Teilstrahlung) wie für die Strahlung aller Wellenlängen (Gesamtstrahlung).

6.14 Die Graue Strahlung

Wenn für einen Körper das Emissionsvermögen ε im gesamten sichtbaren Spektrum unabhängig von der Wellen-

länge ist, also die Strahlungsintensität sich von der des Schwarzen Körpers für alle Wellenlängen nur durch einen konstanten Faktor unterscheidet, so bezeichnet man diese Strahlung als „Graue Strahlung“ und den Strahler als „Grauen Strahler“. Bei technischen Temperaturmessungen kann man sehr oft die Strahler mit ausreichender Annäherung als „Graue Strahler“ ansehen.

6.15 Arten von Strahlungs-pyrometern

6.151 Jedes Strahlungs-pyrometer mißt nur Eigenschaften der Strahlung. Der Schritt von dem gemessenen Wert dieser Eigenschaft (Leuchtdichte, Farbe, Gesamtstrahlungsenergie) der Strahlung zu der gesuchten Temperatur des Körpers ist nur möglich, wenn das Emissionsvermögen ϵ bzw. bei der Messung mit einem Farbpyrometer das Verhältnis der Emissionsvermögen bei den zur Messung benutzten Wellenlängen bekannt ist. Für Hohlraumstrahler kann man wegen $\epsilon = 1$ (Ziffer 6.13) unmittelbar von der gemessenen Strahlungseigenschaft auf die Körpertemperatur schließen.

6.152 Die hauptsächlich verwendeten Strahlungs-pyrometer sind:

Teilstrahlungs-(Leuchtdichte- und Intensitäts-) Pyrometer (Ziffer 6.2), bei denen die Leuchtdichte möglichst einfarbigen, vom untersuchten Körper ausgesandten Lichtes mit der Leuchtdichte eines Vergleichsstrahlers, z. B. einer Pyrometerlampe, im gleichen Spektralbereich verglichen wird oder bei denen die vom Strahler ausgesandte Intensität in einem engen Wellenlängenbereich gemessen wird;

Farbpyrometer (Ziffer 6.3), bei denen aus der Farbe (z. B. aus der Mischfarbe zweier Spektralfarben) des zu untersuchenden Körpers auf die Körpertemperatur geschlossen wird;

Gesamtstrahlungs-pyrometer (Ziffer 6.4), bei denen die von dem Strahler ausgesandte Strahlungsenergie in einem großen Spektralbereich mit einem am Schwarzen Körper geeichten Empfänger (Thermopaar, Photoelement oder Photozelle) gemessen wird.

6.2 Teilstrahlungs-pyrometer

6.21 Leuchtdichtepyrometer

6.211 Die gebräuchlichsten Leuchtdichtepyrometer sind die Glühfadenpyrometer. Bei diesen wird die gleiche Leuchtdichte von Glühfaden und Strahler dadurch erzeugt, daß entweder der Heizstrom des elektrisch geheizten Glühfadens der Vergleichslampe verändert (Holborn-Kurlbaum-Pyrometer) oder die Leuchtdichte des Strahlers mit einem Graukeil oder dergleichen geschwächt wird. Der Heizstrom oder die Heizspannung bzw. die Stellung des Graukeils ist ein Maß für die Temperatur t_s des Schwarzen Körpers, der ebenso hell strahlt wie der gemessene Körper, also für die sogenannte „Schwarze Temperatur“ des Körpers (siehe Ziffer 6.24). Da man die Temperatur des Glühfadens nicht beliebig steigern kann (die des Wolframfadens beispielsweise nur bis zu etwa 1500 °C), schaltet man für höhere Temperaturen in den Strahlengang zwischen Strahler und Vergleichslampe Rauchgläser bekannter Durchlässigkeit oder andere Lichtschwächungsmittel ein.

Bild 45 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Leuchtdichte-(Glühfaden-)Pyrometers mit veränderbarer Lampenstromstärke.

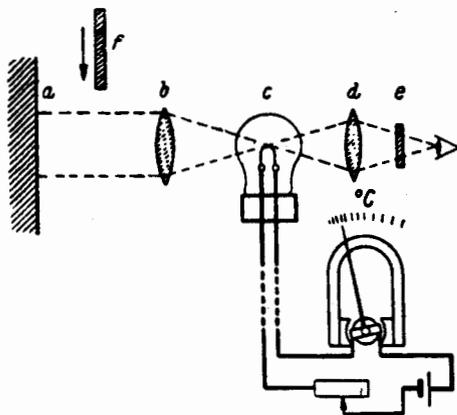


Bild 45
Aufbau eines Leuchtdichtepyrometers

- | | |
|------------------|--|
| a Strahler | f Rauchglas oder andere Lichtschwächung |
| b Objektivlinse | (Einschaltung bei Messung sehr hoher Temperaturen) |
| c Glühfadenlampe | |
| d Okular | |
| e Farbfilter | |

6.212 Das zur Messung notwendige einfarbige Licht wird durch ein vor das Okular des Pyrometers gesetztes Filter erzeugt. Am gebräuchlichsten ist das Jenaer Rotglas RG 2, das für das menschliche Auge annähernd einfarbiges Licht von der Wellenlänge $0,65 \mu\text{m}$ ($= 0,65 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$) durchläßt.

6.22 Intensitätspyrometer

Es werden auch Teilstrahlungs-pyrometer mit Photozellen für objektive Anzeige benutzt, vor allem, wenn schnelle Temperaturänderungen, z. B. in Walzwerken, aufgezeichnet werden sollen [142], [155], [157], [176]¹³⁾.

Die benutzten Meßanordnungen sind ähnlich denjenigen der Gesamtstrahlungs-pyrometer (siehe Ziffer 6.4).

6.23 Ausführung der Messung

6.231 Bei der Messung mit dem Glühfadenpyrometer ist wie folgt vorzugehen: Zunächst ist durch Verschieben der Okularlinse das Bild des Glühfadens scharf einzustellen; dann wird mit der Objektivlinse auf den Strahler scharf eingestellt, wobei der Glühfaden auf dem Bilde des Strahlers als Hintergrund erscheinen muß. Es ist nun der Heizstrom der Vergleichslampe oder die Stellung des Graukeils so lange zu verändern, bis die Kuppe des Glühfadens weder heller noch dunkler als das Bild des Strahlers erscheint und sich von diesem nicht mehr abhebt. Die an der Skala des Gerätes abgelesene Temperatur ist dann die Schwarze Temperatur des Körpers (Ziffer 6.24)

6.232 Allgemein können für die Durchführung von Messungen mit Leuchtdichtepyrometern folgende Richtlinien gelten:

1. Das Gerät nur mit dem Farbfilter verwenden, mit dem es geprüft wurde.
2. Die Spannung der Stromquelle muß, wenn mit Graukeil abgeglichen wird (siehe Ziffer 6.211), während der Messung konstant bleiben. Das elektrische Meßgerät ist gelegentlich nachzuprüfen.

¹³⁾ *ferner: Jupe, J. H. in Electr. Engg. 8 (1939) S. 262; Larsen, M. B. und Shenk, W. E. in Electronics N. Y. 18 (1940) S. 75 und Journ. Appl. Phys. 11 (1940) S. 535; Sordall, L. O., und Sösmann, R. B. in Instruments 18 (1940) S. 127 und Steel 106 (1940) S. 44.*

3. Beobachtung durch geschultes, gut ausgeruhtes Personal. Der Beobachter muß ohne Hast arbeiten.
4. Größte Sauberkeit beachten. Die Fernrohlinse mit weichem Lappen, nicht mit den Fingern putzen!
5. Der Raum zwischen Meßstelle und Meßgerät muß frei von Dämpfen und Rauch sein.
6. Nicht kurz nach äußeren Eingriffen (z. B. bei Schmelzen nicht nach Zugabe von Zusatzstoffen) messen.
7. Vorsicht vor Reflexion von fremder Strahlung (Sonne, helles Tageslicht, elektrische Lampen); der Einfluß von fremdem Licht ist um so größer, je geringer die Strahlungsintensität und das Emissionsvermögen des untersuchten Körpers ist (siehe Ziffer 6.25).
8. Immer zuerst den unberichtigten Wert (also die Schwarze Temperatur) angeben. Wird auch der nach Ziffer 6.24 berichtete Wert genannt, so ist das angenommene Emissionsvermögen anzugeben.

6.24 Wahre und Schwarze Temperatur eines Körpers

6.241 Da die Leuchtdichtepytrometer am Schwarzen Körper geeicht sind und die Nichtschwarzen Körper wegen ihres geringeren Emissionsvermögens nur so stark strahlen wie ein Schwarzer Körper niedrigerer Temperatur, liegen die mit den Leuchtdichtepytrometern gemessenen Temperaturen, also die Schwarzen Temperaturen t_s , für alle Nichtschwarzen Körper unterhalb der wahren Temperatur diese Körper.

6.242 Der Zusammenhang zwischen der am Leuchtdichtepytrometer abgelesenen Schwarzen Temperatur t_s , der Wellenlänge λ des engen Spektralbereiches, in dem der Leuchtdichtevergleich durchgeführt wird, dem Emissionsvermögen ε des Körpers bei der Wellenlänge λ (Teilstrahlungsvermögen, spektrales Emissionsvermögen) und der Körpertemperatur t ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$\frac{1}{273 + t} = \frac{1}{273 + t_s} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon$$

$$= \frac{1}{273 + t_s} + \frac{\lambda \log \varepsilon}{0,4343 c_2}$$

Hierin ist die Konstante $c_2 = 14380 \mu\text{m} \cdot \text{grad}$ gesetzt, so daß λ in μm zu setzen ist. Das Emissionsvermögen ε muß bekannt sein für die Wellenlänge λ und für die Temperatur des Strahlers, mit der es sich jedoch im sichtbaren Gebiet meist vernachlässigbar wenig verändert.

Graphisch kann t aus t_s und ε aus der für die Wellenlänge $\lambda = 0,65 \mu\text{m} = 0,65 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$ gezeichneten Fluchtlinientafel [173], Bild 46, oder der Kurventafel, Bild 47, bestimmt werden.

6.25 Das Teilstrahlungsvermögen

6.251 Das Teilstrahlungsvermögen von Körpern mit freistrahrender Oberfläche hängt sehr stark von der Legierung und der Oberflächenbeschaffenheit (Oxydationszustand, Rauheit, Rissigkeit, Kratzer usw.) des Körpers ab. Eine Reihe technisch wichtiger Werte ist in Tafel 7 angegeben. Die Emissionsvermögen können nur als Anhaltswerte dienen, da die Zahlenwerte insbesondere wegen der genannten Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit auch für denselben Stoff sehr verschieden sein können.

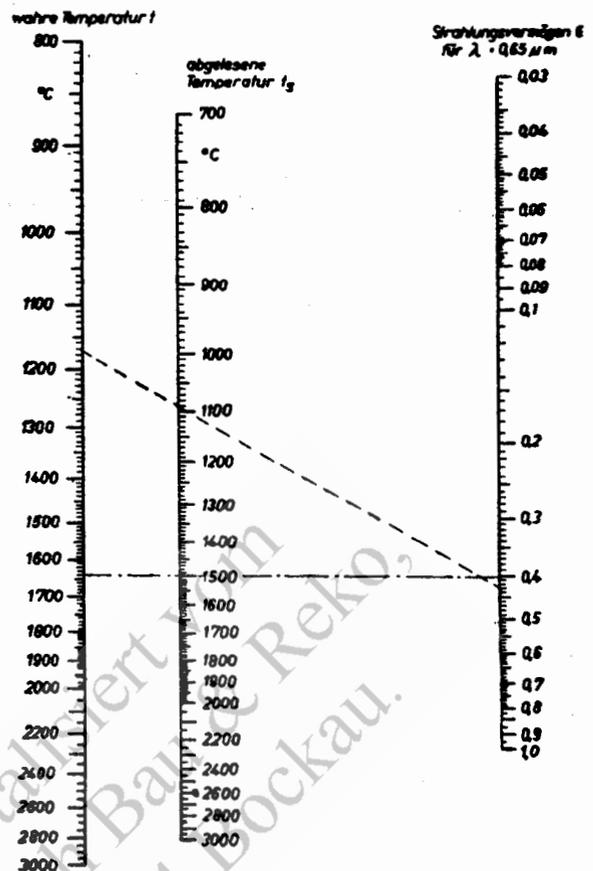


Bild 46

Fluchtlinientafel zur Berichtigung der am Leuchtdichtepytrometer abgelesenen Temperaturen t_s für Nichtschwarze Strahler (für $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$)

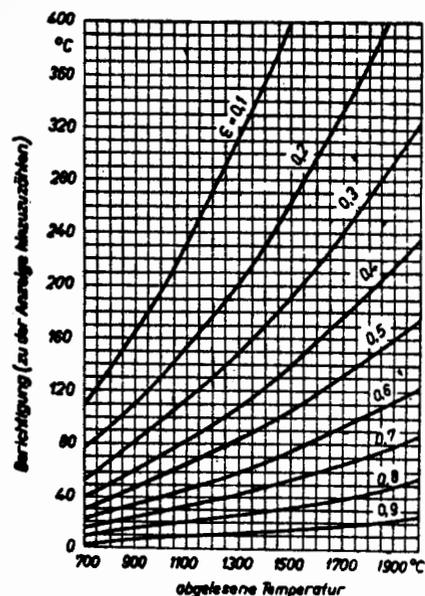


Bild 47

Kurventafel zur Berichtigung der am Leuchtdichtepytrometer abgelesenen Temperaturen t_s für Nichtschwarze Strahler (für $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$)

Für Eisen- und Stahlschmelzen [16], [17], [53], [134], [138] bis [141], [164], [165] hängt z. B. das Strahlungsvermögen unter anderem auch sehr stark vom Oxydationszustand der Oberfläche ab; je dicker die Oxydschicht ist, um so größer ist das Strahlungsvermögen der Oberfläche. Auch kann durch Reflexion (z. B. in der Fältelung des Gießstrahles) eine Erhöhung des Emissionsvermögens vorgetäuscht werden.

Tafel 7
Anhaltswerte für das Teilstrahlungsvermögen verschiedener Metalle und einiger Kunst- und Natursteine (Körper mit frei strahlender Oberfläche; $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$)¹⁴⁾

| Material | Strahlungsvermögen b | Quellen |
|--|---|--|
| Aluminium | 0,1 bis 0,4 | [9] [146] *) |
| Bleibad, schlackenfrei | 0,5 bis 0,6 | [44] |
| Eisen und Stahl, fest, je nach Oberflächenbeschaffenheit (z. B. blank oder oxydiert) | 0,35 bis 1 **) (oxydiertes Eisen hat die höheren Werte) | [16] [17] [134] [138] [139] [140] [164] [165] *) |
| Eisen und Stahl, flüssig, je nach Oxydationsgrad und Fältelung | 0,3 bis 0,8 | [16] [17] [134] [138] bis [141] [164] [165] |
| Kupfer, fest, blank | 0,1 bis 0,25 | [44] [154] *) †) ††) |
| Kupfer, flüssig, je nach Oxydationsgrad | 0,15 bis 0,8 | [44] [154] †) |
| Magnesium | 0,1 bis 0,45 | * [154] |
| Nickel | 0,3 bis 0,4 | [33] [44] [148] [154] *) †) ††) |
| Platin | 0,3 bis 0,4 | [33] [44] [154] *) †) ††) |
| Silber | 0,05 bis 0,1 | [44] [154] †) ††) |
| Wolfram | 0,4 bis 0,5 | [33] [154] *) ††) |
| Zink | 0,2 bis 0,4 | *) |
| Kalkstein | 0,8 bis 0,9 | [172] |
| Kohle und Graphit | 0,85 bis 0,95 | [33] [148] [154] |
| Porzellan | 0,25 bis 0,5 | |
| Schlacke | 0,6 bis 0,9 | [139] [158] [172] |
| Silicasteine | 0,9 bis 1 | [172] |
| Ton | etwa 0,75 | [172] |

*) E. Lax und M. Pirant in: Geiger-Scheel, Handb. d. Physik Bd. 21, J. Springer, Berlin 1929, S. 207.

**) In der Eisenhütten-Industrie kommen bei Temperaturen über 800 °C Werte unter 0,8 nicht vor.

†) International Critical Tables, Vol. I (1926) (Zusammenstellung nach Burgess und Waitenberg).

††) Landolt-Bornstein, Physikalisch-chemische Tabellen, 5. Aufl. 2. Bd. Berlin, J. Springer, 1923. Siehe auch die Ergänzungsbände. (Angabe ist das Reflexionsvermögen R . Das Strahlungsvermögen ϵ ist daraus errechenbar: $\epsilon = 1 - R$.)

Die Werte der Tafel 7 sind Richtwerte für Körper mit frei strahlender Oberfläche. Wenn aber der strahlende Körper sich in einem allseitig geschlossenen Hohlraum (Ofen) befindet, dessen Wandungen strahlungsdurchlässig sind und überall die gleiche Temperatur wie der Körper haben, so ist dieser Körper als schwarz strahlend anzusehen (Strahlungsvermögen $\epsilon = 1$). Sind innerhalb des

14) Die angegebenen Strahlungsvermögen decken sich nicht in allen Fällen genau mit den in den angezogenen Literaturstellen angegebenen Werten.

Ofens Temperaturunterschiede vorhanden, so liegt das Strahlungsvermögen des Körpers um so näher an 1, je höher sein Strahlungsvermögen nach Tafel 7 ist.

Bei der Messung der Temperaturen von Glüh-, Schmelde- und Walzgut [479] ist zweckmäßig nach Abfallen der Zunderschicht vom Block zu beobachten, d. h. nach dem dritten (bis zehnten) Stich in der Walzenstraße selbst. Ist das nicht möglich (z. B. wenn man die Temperatur des Gutes im Walzofen messen will), so ist zu beachten, daß die Zunderschicht wärme-isolierend wirkt und eine Mitteltemperatur zwischen tatsächlich vorhandener Oberflächentemperatur des Blocks und der Temperatur der Umgebung annimmt.

6.252 Will man die Temperatur eines Feuerraumes, falls man diesen nicht als Schwarzen Strahler ansehen kann, oder die Temperatur einer Schmelze mit nicht genügend bekanntem Emissionsvermögen messen, so kann man ein einseitig geschlossenes Rohr aus feuerfestem, keramischem Baustoff oder Sonderstahl in den Feuerraum oder in die Schmelze einsetzen; ein solches Rohr stellt bei genügend kleiner Öffnung (die Rohrlänge soll sich zum Rohrdurchmesser mindestens wie 6 zu 1 verhalten) und gleichmäßiger Wandtemperatur angenähert einen Schwarzen Strahler dar. Durch Anvisieren der Bodenfläche dieses Rohres mit dem Strahlungs-pyrometer kann man dann angenähert seine Temperatur und damit auch die des Feuerraumes oder der Schmelze bestimmen [147].

6.253 Die Temperatur strahlungsdurchlässiger Gase läßt sich durch Strahlungs-pyrometer nicht ohne weiteres messen. Die Temperatur von Flammen, die leuchtende Kohle-teilchen enthalten (wie sie z. B. in Kesseln oder Industrie-öfen auftreten), kann annähernd mit dem Glühfaden-pyrometer gemessen werden. Die gemessene Temperatur liegt stets unterhalb der wahren Flammentemperatur, und zwar um so mehr, je dünner die leuchtende Flamme ist. Sie nähert sich um so mehr dieser Flammentemperatur, je dicker die leuchtende Flamme und je dichter die Kohlen-stoff-suspension in der Flamme ist. Sie stimmt mit der wahren Flammentemperatur bei unendlich dicker Flamme, die bei stark leuchtenden Flammen praktisch bei 1 bis 2 m Stärke verwirklicht ist, überein. Man kann aber die wahre Temperatur leuchtender Flammen durch gleichzeitiges Messen der Schwarzen und der Farbtemperatur aus einer Kurvenschar ermitteln [168].

6.26 Fehlergrenzen

Bei Messungen mit Leuchtdichtepyrometern können verschiedene Fehler auftreten, und zwar 1. die durch das Anzeigegerät, 2. die durch die Grenze der Leuchtdichteempfindlichkeit des menschlichen Auges, 3. die durch die Einmessung bedingten Fehler und 4. die Fehler, die in der mangelnden Kenntnis des Emissionsvermögens liegen. Die Fehler infolge der Grenzen der Empfindlichkeit des menschlichen Auges sind gegen die anderen Fehler klein [150]. Als Anhalt für die Fehlergrenzen von zwei Glühfadenpyrometern mit den Fehlergrenzen des Anzeigegerätes von 0,7 und 0,2% vom Endausschlag ergeben sich folgende Werte:

| Fehlergrenze des Anzeigegerätes in % vom Endausschlag | Gesamtfehlergrenze der Messung in \pm grd | | | | | |
|---|---|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| | Meßtemperatur in °C | | | | | |
| | ohne Rauchglas | | mit Rauchglas | | | |
| | 700° | 1000° | 1400° | 1400° | 1600° | 2000° |
| 0,7 | $\pm 31^\circ$ | $\pm 12^\circ$ | $\pm 7^\circ$ | $\pm 16^\circ$ | $\pm 18^\circ$ | $\pm 16^\circ$ |
| 0,2 | $\pm 10^\circ$ | $\pm 4^\circ$ | $\pm 3^\circ$ | $\pm 5^\circ$ | $\pm 7^\circ$ | $\pm 7^\circ$ |

6.3 Farbpyrometer

6.31 Vorteile der Farbpyrometrie

Die Leuchtdichtepyrometrie ist zur Bestimmung der wahren Temperatur überall da geeignet, wo der zu untersuchende Körper schwarz strahlt (z. B. bei den meisten geschlossenen Öfen). Demgegenüber kann man durch Farbpyrometer, unabhängig vom Strahlungsvermögen des Strahlers, die wahre Temperatur bestimmen, falls dieser als Grauer Strahler (siehe Ziffer 6.14) angesehen werden kann [160]. Da viele technische Körper annähernd Graue Strahlung aussenden, ist die erforderliche Berichtigung bei Messung mit dem Farbpyrometer kleiner als bei Messung mit dem Leuchtdichtepyrometer. Für die meisten Körper liegt die Farbtemperatur (siehe 6.311) oberhalb der wahren Temperatur. Wenn nicht sicher ist, daß ein Körper grau strahlt, kann man also durch gleichzeitige Messung mit dem Farb- und dem Leuchtdichtepyrometer den Bereich abgrenzen, in dem die wahre Temperatur des Körpers liegen muß. Bei vielen Körpern ist die Annäherung an den Grauen Körper so weit erfüllt, daß man mit hinreichender Genauigkeit die Farbtemperatur und die wahre Temperatur gleichsetzen kann. Darin liegt vor allem die praktische Bedeutung der Farbpyrometrie für die Eisenhüttenindustrie [16], [17], [139], [140], [153], [158] bis [164].

6.311 Als „Farbtemperatur“ eines Strahlers wird die Temperatur eines Schwarzen Körpers bezeichnet, bei der dieser einem normalen Auge in der gleichen Farbe wie der zu untersuchende Strahler erscheint. Nach einer anderen Definition wird als Farbtemperatur auch diejenige Temperatur des Schwarzen Körpers bezeichnet, für die das Verhältnis der Strahlungsintensitäten oder Leuchtdichten zweier einfarbiger Strahlungen das gleiche ist wie beim untersuchten Strahler.

Es gibt noch andere Definitionen der Farbtemperatur, nach denen Verfahren zur Farbtemperaturmessung ausgeführt werden können [144], [148].

6.32 Meßverfahren

6.321 Das Leuchtdichteverhältnis kann entweder subjektiv durch den Farbeindruck, den die Mischung der beiden einfarbigen Strahlungen hervorruft, oder aus den Leuchtdichten bei zwei verschiedenen Wellenlängen durch Leuchtdichtepyrometrie ermittelt werden, oder das Verhältnis der Intensitäten kann objektiv mit Hilfe von Photozellen angezeigt werden [169].

6.322 Bei dem Farbpyrometer nach Naeser (Bild 48) [160] werden aus der Strahlung des Körpers durch einen bi-

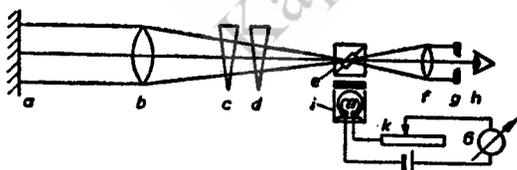


Bild 48

Farbpyrometer nach Naeser

| | |
|-------------------------------------|---|
| a Strahler | h Beobachter |
| b Objektiv | i Vergleichslampe |
| c bichromatischer Farbkeil | mit vorgesetztem, bichromatischem Filter |
| d Graukeil | k Drehwiderstand zum Einstellen des Vergleichslampenstromes mit dem Strommesser G |
| e teilweise versilberter Glaswürfel | |
| f Okular | |
| g Blende | |

chromatischen Farbkeil zwei Farben (Rot und Grün) ausgesondert, die als eine Mischfarbe sichtbar werden. Diese Mischfarbe wird auf die Farbe einer bei konstanter Temperatur brennenden Vergleichslampe, die ebenso durch ein Filter in der Mischfarbe der gleichen Spektralfarben sichtbar gemacht wird, abgeglichen. Zur Abgleichung wird der bichromatische Filterkeil, der mit zunehmender Dicke den Grünanteil der Strahlung in höherem Maße absorbiert als den Rotanteil, so lange verschoben, bis Farbgleichheit herrscht. Die Stellung des Farbkeils ist dann ein Maß für die Farbtemperatur des Strahlers. Um die Farben vergleichen zu können, müssen sie auch auf annähernd gleiche Leuchtdichte abgestimmt werden. Dies geschieht durch Verschieben eines Graukeils im Strahlengang zwischen Strahler und Beobachter. Die Stellung des Graukeils gibt dann gleichzeitig die Schwarze Temperatur des Strahlers für die Mischwellenlänge des Farbfilters an. Die Fehlergrenze beträgt bei farbtüchtigen Beobachtern ± 10 grad¹⁵⁾; Farbblinde können mit diesem Pyrometer nicht messen.

6.323 Um auch für Nichtgraue Strahler unmittelbar die wahre Temperatur zu erhalten, sucht man durch entsprechende Färbung des der Leuchtdichteangleichung dienenden Graukeils und die dadurch erzwungene, zusätzliche Verschiebung des Farbkeils die Abweichung der Strahlung, z. B. von Eisen und Stahl, von der Grauen Strahlung zu berücksichtigen. Die Anfärbung setzt also bestimmte Strahlungseigenschaften des untersuchten Körpers voraus, wenn die abgelesene Temperatur gleich der wahren Körpertemperatur sein soll [160] bis [163].

6.324 Ohne Vergleichslichtquelle kann die Farbtemperatur auch dadurch ermittelt werden, daß man durch Verändern nicht nur des Rot-Grün-Verhältnisses, sondern auch z. B. des Blau-Orange-Verhältnisses des Strahlers die beiden Mischfarben auf Farbgleichheit bringt [144].

6.325 Mit der Leuchtdichtepyrometrie läßt sich die Farbtemperatur durch Messen der Schwarzen Temperatur bei zwei verschiedenen Wellenlängen, z. B. im Roten und Grünen, berechnen [160] bis [163]. Voraussetzung für die Richtigkeit des erhaltenen Wertes ist selbstverständlich, daß zwischen den beiden Teilmessungen das Strahlungsvermögen konstant bleibt.

6.326 Die Farbtemperatur kann auch unmittelbar angezeigt werden¹⁶⁾, wenn man mit einem Graukeil zunächst eine Abgleichung im Roten durchführt und anschließend die so geschwächte Strahlung durch einen zweiten Keil weiter schwächt, bis auch im Grünen der Strahler und die Lampe gleiche Helligkeit haben. Die Stellung des ersten Keiles gibt dann die Schwarze Temperatur, die des zweiten die Farbtemperatur an.

6.327 Es werden auch Farbpyrometer mit Photozellen für objektive Anzeige hergestellt, bei denen unter anderem Kompensationseinrichtungen verwendet werden, die z. B. mit Hilfe des Wechslichtverfahrens arbeiten. Zur Kompensation wird ein Farbkeil so lange im Strahlengang verschoben, bis die auf eine Photozelle fallende Strahlungsintensität des durch ein Rot- bzw. ein Grünfilter gegangenen Lichtes gleich groß ist [169], [174]. Solche Geräte werden u. a. am blasenden Konverter verwendet [167].

¹⁵⁾ Fernandes, *Sven*: Jernkont. Ann. 125 (1941) S. 67. Ref. in Stahl u. Eisen 61 (1941) S. 760.

¹⁶⁾ nach DRP 741 510 (1939) und 760 771 (1941) von K. Jagersberger und F. Lieneberg.

6.4 Gesamtstrahlungs-pyrometer

6.41 Anwendung

6.411 Bei den Gesamtstrahlungs-pyrometern wird die Strahlung mit einem Linsen- oder Hohlspiegelsystem auf einen Empfänger konzentriert. Als solchen verwendet man vor allem Thermoelemente, bei denen die Thermopaare meist blättchenförmig ausgebildet und in einer gasgefüllten oder evakuierten Lampenglocke angeordnet sind. Bild 49 zeigt ein Gesamtstrahlungs-pyrometer mit

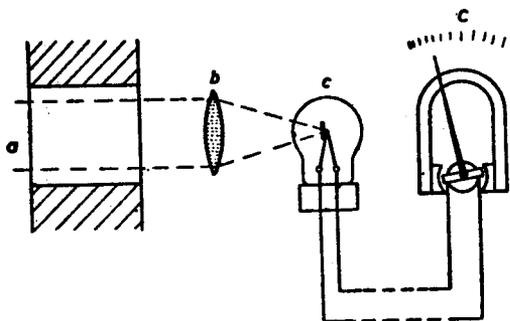


Bild 49

Aufbau eines Gesamtstrahlungs-pyrometers

a Ofenraum (Strahler)

b Objektivlinse

c Thermoelement

Thermoelement. Die durch die Erwärmung der Meßstelle entstehende Thermospannung ist ein Maß für die Intensität der Gesamtstrahlung und damit für die Temperatur des Strahlers. Die optische Einrichtung ermöglicht es, den zu messenden Körper anzuvissieren und zu beobachten, ob der Empfänger voll bestrahlt wird. Die Anzeige kann an beliebigen Orten erfolgen; ferner kann auch der Temperaturverlauf aufgezeichnet oder ein Regler betätigt werden.

6.412 Da Photoelemente praktisch nur auf Strahlung im sichtbaren Wellenbereich ansprechen, werden Messungen mit Photoelementpyrometern durch Strahlungsabsorption von Kohlendioxid und Wasserdampf, die nur im Ultraroten strahlen, nicht gefälscht [154 a]. Da die Photoelemente auf einem schmalen Wellenlängenbereich ansprechen als Thermoelemente, ist auch ihr Meßfehler bei gleicher Grauer Strahlung etwas kleiner. Diese Pyrometer werden in der Eisen- und Stahlindustrie vorzugsweise für Gewölbetemperaturmessungen in Siemens-Martin-Ofen verwendet [142 a].

6.413 Gesamtstrahlungs-pyrometer mit Photozellen arbeiten im allgemeinen nach dem Kompensationsverfahren, indem die Strahlungsintensität des Strahlers mit derjenigen eines Vergleichsstrahlers abgeglichen wird, z. B. unter Verwendung einer Wechsellichtanordnung ähnlich wie beim Farbpyrometer (siehe Ziffer 6.327). Diese Pyrometer zeichnen sich durch sehr schnelle Anzeige der Meßgeräte aus und werden deshalb z. B. für die Überwachung der Temperaturen in Härtereibetrieben eingesetzt [149].

6.414 Für die Messung von Temperaturen Nichtschwarzer Körper sind die Gesamtstrahlungs-pyrometer im allgemeinen nicht tauglich, da das Gesamt-Emissionsvermögen in praktischen Fällen meist unbekannt und von der Temperatur abhängig ist. Deshalb werden die Gesamtstrahlungs-pyrometer hauptsächlich für die Temperaturmessung von

geschlossenen Feuerräumen benutzt, die man angenähert als Schwarze Strahler betrachten kann. So ist z. B. der Herdraum eines Siemens-Martin-Ofens, wenn das Gesichtsfeld frei von der Flamme ist, gegen Ende des Schmelzvorganges annähernd als ein Schwarzer Körper anzusehen [172].

6.415 Wenn man einen Feuerraum oder eine Schmelze nicht als schwarz strahlend ansehen kann, so kann man sich trotzdem eine angenähert Schwarze Strahlung schaffen, indem man in den Ofenraum oder in die Schmelze ein einseitig geschlossenes Rohr einsetzt und dessen Grundfläche mit dem Pyrometer anvisiert (siehe Ziffer 6.252).

Ohne diese Maßnahmen können für Nichtschwarze Körper nur Vergleichswerte bestimmt werden, die allerdings für die Betriebsüberwachung wertvoll sein können [153] und [176]. So wird das Gesamtstrahlungs-pyrometer zur Überwachung der Gleichmäßigkeit von Walzguttemperaturen verwendet; da nach dem zweiten oder dritten Durchlauf durch die Walzen die Zunderschicht abfällt und das glühende Eisen eine reine Strahlungsfäche mit annähernd gleichbleibendem Emissionsvermögen bietet, können die Anzeigen des Pyrometers brauchbar sein.

6.416 Die Überwachung der Konverterflamme zur Verfolgung des Windfrischens beim Bessemer- und Thomasverfahren mit Gesamtstrahlungs-pyrometern (mit Thermoelementen oder Photoelementen) hat sich ebenfalls als zweckmäßig erwiesen [168].

6.417 Bei der Temperaturmessung mit Gesamtstrahlungs-pyrometern ist darauf zu achten, daß der Strahlungsempfänger (das meist blättchenförmige Thermopaar) voll bestrahlt wird; dies ist dann der Fall, wenn das durch das Okular sichtbare Bild des Empfängers vollständig innerhalb des Bildes des Strahlers liegt. Grundsätzlich darf ein von der Größe des Strahlers abhängiger Abstand des Meßgerätes vom Strahler nicht überschritten und ein von der Pyrometerbauart abhängiger Abstand nicht unterschritten werden.

Bei der Messung soll das Gesamtstrahlungs-pyrometer und seine unmittelbare Umgebung möglichst die Temperatur haben, bei der das Gerät geeicht wurde (wenn nichts Besonderes angegeben, etwa 20°C). Ein größeres Abweichen der Umgebungstemperatur von der bei der Eichung eingehaltenen erzeugt einen zusätzlichen Meßfehler. Vielfach werden die Gesamtstrahlungs-pyrometer mit Temperaturberichtigungseinrichtungen mechanischer oder elektrischer Art versehen, durch die der Einfluß der Raumtemperatur beseitigt wird.

6.418 Oft ist es notwendig, bei Strahlungs-pyrometern, die zur ständigen Temperaturüberwachung fest eingebaut sind, das Pyrometer selbst vor mechanischen Beschädigungen und vor starker Strahlung durch eine Schutzverkleidung oder durch einen Asbestschirm zu schützen.

Bei hohen Temperaturen an der Einbaustelle empfiehlt es sich, das Gerät mit Luft- oder Wasserkühlung zu versehen. Eine Verstaubung der Objektivlinse durch Eindringen von Staubteilchen und eine Beschädigung durch Eindringen von Flammen kann man durch Einblasen von Preßluft in den Raum vor der Objektivlinse verhindern; dabei ist darauf zu achten, daß die Linse nicht direkt vom Luftstrahl getroffen und dadurch mit der Zeit getrübt wird. Ebenso ist darauf zu achten, daß der Strahler selbst durch die eingeblasene Luft nicht gekühlt wird. Bild 50 zeigt ein Gerät mit wassergekühltem Anbaurohr und Preßluftanschluß, eingebaut in das Mauerwerk eines Ofens. Da Preßluft meist ölhaltig ist, muß sie durch ein Ölfilter gereinigt werden, oder es wird staubfreier Ventilatorwind verwendet.

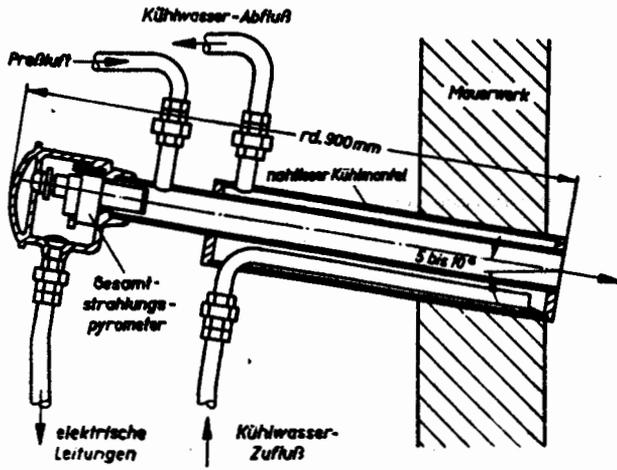


Bild 50
Einbau eines Strahlungs-pyrometers
in das Mauerwerk eines Ofens

6.42 Fehlergrenzen

6.421 Die Fehlergrenze der Gesamtstrahlungs-pyrometer bei der Messung schwarz strahlender Körper ist durch die Abweichungen der Pyrometerelemente von ihrer Grundwertreihe und durch die Fehler bei der Eichung bestimmt.

Sie beträgt für Temperaturmessungen zwischen 800 und 1400 °C etwa ± 15 grd, bei Temperaturen von 2000 °C etwa ± 25 grd. Außerdem sind noch die Fehler durch das Meßgerät und durch die Zuleitung zu beachten. Diese Meßgerätefehler gehen infolge der nach hohen Temperaturen stark auseinandergezogenen Skale jedoch nicht prozentual in die Messung ein. Bei einem Meßbereich von 800 bis 1600 °C und einer Fehlergrenze des Anzeigergerätes von ± 1,5% beträgt beispielsweise bei 1600 °C der Fehler ± 8 grd.

6.422 Da die Intensität der Gesamtstrahlung glühender Körper durch Rauch und Qualm zwischen Strahler und Pyrometer geschwächt wird, ergeben sich Minderanzeigen in üblicher Hüttenluft in der Größenordnung von 2 bis 10 grd; bei Gießqualm kann der Fehler bis zu etwa 100 grd betragen¹⁷⁾.

6.5 Eichung und Prüfung der Strahlungs-pyrometer

6.51 Leuchtdichtepyrometer

6.511 Eichung oder Prüfung am Schwarzen Körper. Als solcher kann z. B. ein einseitig offenes, elektrisch geheiztes Kohle- oder Porzellanrohr (rund 400 mm Länge und 30 mm Durchmesser) mit eingesetzten Blenden von nach außen wachsendem Durchmesser dienen¹⁸⁾. Dabei wird eine in der Mitte des Rohres angebrachte Trennwand anvisiert. Die Temperatur dieses Schwarzen Körpers bei der Eichung wird durch ein nur für diese Zwecke verwendetes, amtlich beglaubigtes Leuchtdichtepyrometer oder Thermolement gemessen. Die Eichung für sehr hohe Temperaturen (etwa über 1400 °C) bei Einschaltung einer Lichtschwächung erfolgt rechnerisch auf Grund der Eichung bis 1400 °C aus der Größe der Lichtschwächung mit Hilfe des Wienschen Strahlungsgesetzes [7].

6.512 Eichung oder Prüfung durch Anvisieren des Bandes einer Wolfram-band-lampe, für welche durch

Eichung die Temperatur des in der benutzten Wellenlänge gleich hell strahlenden Schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Stromstärke bekannt ist. Dieses Verfahren ist für betriebsmäßige Überprüfungen zu empfehlen. Eine Eicheinrichtung zeigt Bild 51.

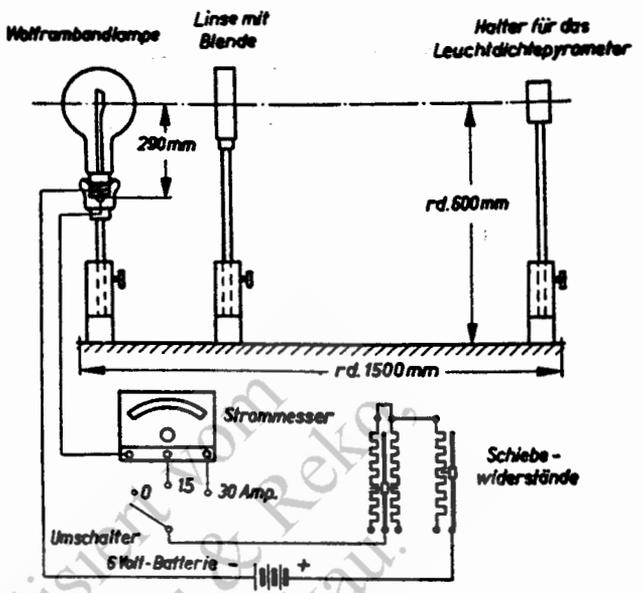


Bild 51
Anordnung zur Eichung oder Prüfung
von Leuchtdichtepyrometern an der Wolfram-band-lampe

Bei diesem Verfahren ist folgendes zu beachten:

1. Die für die Wolfram-lampe angegebenen Werte für die Abhängigkeit der Temperatur von der Stromstärke gelten nur für eine bestimmte, besonders gekennzeichnete Stelle des Wolfram-bandes. Diese Stelle ist bei der Eichung oder Prüfung anzuvisieren. Wird bei der Eichung von Betriebspyrometern das Wolfram-band nicht direkt anvisiert, sondern durch eine Linse, so ist die Schwächung der Strahlung infolge der Reflexion an den Linsenflächen zu berücksichtigen.
2. Infolge der thermischen Trägheit des Wolfram-bandes dauert es etwa 3 Minuten, bis die dem Strom entsprechende Temperatur vorhanden ist. Diese Zeit muß vor der Messung abgewartet werden.
3. Das Wolfram-band darf nicht durch zu starken Strom überlastet werden.
4. Zweckmäßig wird die ganze Meßeinrichtung bei der Eichung der Lampe und ihrer Benutzung mit einem schwarzen Schutzkasten umgeben, der an der Aufstellungsseite des Strahlungs-pyrometers durch einen Vorhang abgeschlossen wird.
5. Bei Verwendung bester Präzisionsstrom-messer und sehr gut konstanter Meßspannung kann die Band-lampe für Temperaturen von 750 bis 1400 °C mit etwa ± 10 grd genau eingemessen werden (Ziffer 6.26).

Eichung und Prüfung durch Vergleich an der Wolfram-band-lampe muß mit einem besonders genau geeichten Vergleichspyrometer erfolgen.

6.52 Farbpyrometer

Eichung und Prüfung am Schwarzen Körper wie in Ziffer 6.511.

6.53 Gesamtstrahlungs-pyrometer

Eichung am Schwarzen Körper wie in Ziffer 6.511. Das Rohr muß jedoch je nach der optischen Einrichtung des Pyrometers größere Abmessungen haben (etwa 1000 mm Länge und 50 mm Durchmesser), damit eine genügend große Strahlungsfläche zur Verfügung steht.

Bei der Überprüfung der Gesamtstrahlungs-pyrometer im Betrieb beschränkt man sich meist auf den Vergleich an einem annähernd schwarzen Ofenhohlraum mit einem gut geeichten Leuchtdichtepyrometer oder Gesamtstrahlungs-pyrometer.

17) Nach I. A. Hall: J. Iron Steel Ind. 160 (1948) Nov., S. 271, 76.
18) Über die Verwirklichung des Schwarzen Körpers siehe auch: Laz, E. und Pirant, M., Experimentelle Verwirklichung der schwarzen Körperstrahlung. In Geiger-Scheel, Handb. d. Physik Bd. XIX. Berlin: J. Springer 1928, S. 4.
Müller, C., In: Wien-Harms, Handb. d. Experimentalphysik Bd. IX. Leipzig: Akod. Verlagsges. 1929, S. 464.

7 Besondere Temperaturmeßverfahren

Die in diesem Abschnitt behandelten Verfahren sollen bei Abnahmeversuchen nur auf Grund besonderer Abmachungen in beiderseitigem Einverständnis verwendet werden.

7.1 Photothermometrie¹⁹⁾

Für Infrarot ($\lambda > 0,7 \mu$) empfindlich gemachte Platten gestatten, Körper von nicht allzu hoher Temperatur, etwa von 250 bis 1000 °C, in ihrer eigenen infraroten Strahlung photographisch aufzunehmen. Hierbei ist die Schwärzung der Platte verhältnismäßig der Temperatur, so daß ein anschauliches Bild der Temperaturverteilung an dem Körper erhalten werden kann. Die Belichtungszeiten bewegen sich zwischen $\frac{1}{25}$ Sekunde bei 850 °C bis zu 15 Stunden bei 275 °C bei einem Öffnungsverhältnis des Objektivs von 2,7. Die genaue Temperaturmessung erfordert die gleichzeitige Aufnahme eines Temperaturmaßstabes, der durch Oberflächen von bekannter Temperatur, z. B. von geheizten Metallplättchen mit in der Oberfläche eingelassenen Thermolementen, gebildet wird. Der durch eine Aufnahme zu erfassende Temperaturbereich liegt zwischen 60 und 120 grd mit einer Fehlergrenze von etwa ± 1 grd. Aus den Schwärzungen der Platte läßt sich dann durch Photometrieren die Temperatur bestimmen. Das Verfahren ermöglicht das Erfassen von ganzen Temperaturfeldern auf einem Bild und die Temperaturmessung ohne Eingriff eines Meßgerätes.

7.2 Temperaturmeßfarben²⁰⁾

Es gibt Farben, die durch einen („Einfachfarben“) oder mehrere („Mehrfachfarben“) charakteristische, augenfällige Farbumschläge bestimmte Temperaturen (im Bereich von etwa 30 bis 650 °C) anzeigen [180] bis [182], [188], [190] und Farben, deren Farbton sich mit der Temperatur mehr oder weniger stetig verändert, so daß die Temperatur (in einem Bereich von etwa 120 bis 400 °C) durch Vergleich mit einer zu der Farbe gelieferten Farbtoneleiter bestimmt werden kann. Bei der letztgenannten Art ist zu bemerken, daß die Genauigkeit der Temperaturbestimmung stark von der relativen Farbempfindlichkeit des Beobachters abhängig ist.

Der Farbumschlag hängt von der Einwirkungsdauer der Temperatur ab. Die normale Umschlagtemperatur (Umschlagtemperatur) gilt für 30 Minuten Einwirkdauer. Bei erheblich höheren Temperaturen tritt der Farbumschlag sehr viel schneller ein. So liegt die Temperatur bei Einfach-Meßfarben je nach Nenntemperatur um 20 bis 70 grd höher, wenn der Umschlag bereits nach 5 Sekunden eintritt.

Oberflächentemperaturen können mit einer für viele praktische Zwecke genügenden Genauigkeit mit diesen Farben nachgewiesen werden. Hauptsächlich eignen sich Temperaturmeßfarben für Messungen in der Motorenindustrie (besonders für luftgekühlte Motoren), für Messungen an Lagern, Getrieben, Kühlern, Wärmeaustauschern usw., an bewegten Gegenständen und als Warnfarben in der Elektro- und chemischen Industrie sowie an Industrieöfen aller Art. Besonders sind sie dann von Vorteil, wenn der Temperaturverlauf über einen ganzen Oberflächenteil interessiert.

Die Farben werden an der zu messenden Oberfläche mit dem Pinsel oder besser mit dem Spritzapparat aufgetragen. Nach kurzer Trockenzeit sind dann die Farben gebrauchsfähig. Man kann die Farben auch direkt auf den heißen Gegenstand aufspritzen. Die Temperaturen können sowohl während des Versuchs als auch längere Zeit nach der thermischen Einwirkung abgelesen werden.

Außer flüssigen Farben kann man Temperaturfarbstifte verwenden. Diese gestatten einen wachsartigen Anstrich, der ebenso wie die Meßfarben bei Erreichung der Nenntemperatur einen Farbumschlag ergibt. Diese Farbstifte sind im Bereich von 45 bis 600 °C anwendbar, allerdings mit großen Temperaturstufen von 50 bis 100 grd. Es genügt, den erhitzten Gegenstand leicht mit dem Stift zu bestreichen.

Bei anderen Temperaturmeßstiften zeigt sich bei Erreichen und Überschreiten der Nenntemperatur eine Flüssigkeitsspur. Diese Stifte werden für den Bereich von 45 bis 1093 °C hergestellt. Ihr

¹⁹⁾ Schrifttum hierzu [183] bis [186].

²⁰⁾ Schrifttum hierzu [180] bis [182], [188], [190].

Vorteil besteht darin, daß die Stifte in Stufen von 7 zu 7 grd zur Verfügung stehen.

In ähnlicher Weise werden Tabletten verwendet, die bei Erreichen der Nenntemperatur schmelzen. Verwendungsbereich zwischen 45 und 1371 °C in Stufen von 7 bis 28 grd.

7.3 Segerkegel

Aus dem in Ziffer 1.31 Gesagten ergibt sich, daß eine Temperaturmessung mittels jeder temperaturabhängigen Änderung einer Eigenschaft eines Vergleichskörpers vorgenommen werden kann, wenn diese Abhängigkeit vorher festgestellt worden ist. Als solche Eigenschaft benutzt man in der keramischen Industrie meist den Erweichungsvorgang keramischer Massen, welche in Form der sogenannten Segerkegel zur Garbrandtemperaturbestimmung sowie zur Schmelztemperaturbestimmung von silikatischen Stoffen, z. B. von feuerfesten Steinen, verwendet werden. Die Temperatur wird dann erreicht, wenn die Kegelspitze die Unterlage gerade berührt [177], [191].

Sie sind für diese Zwecke deshalb besonders geeignet, weil sie sich als keramische Körper während des Brandes wie das Brenngut selbst verhalten. Sie sind jedoch keine Temperaturmesser im eigentlichen Sinne, da ihr Schmelzpunkt von der Art und Dauer der Erwärmung abhängt. Insbesondere ändert sich der Erweichungspunkt

Tafel 8: Mittelwerte der Schmelztemperaturen von Segerkegeln

| Nr. | °C | Nr. | °C | Nr. | °C |
|------|------|-----|------|-----|------|
| 022 | 600 | 02a | 1060 | 19 | 1520 |
| 021 | 650 | 01a | 1080 | 20 | 1530 |
| 020 | 670 | 1a | 1100 | 26 | 1580 |
| 019 | 690 | 2a | 1120 | 27 | 1610 |
| 018 | 710 | 3a | 1140 | 28 | 1630 |
| 017 | 730 | 4a | 1160 | 29 | 1650 |
| 016 | 750 | 5a | 1180 | 30 | 1670 |
| 015a | 790 | 6a | 1200 | 31 | 1690 |
| 014a | 815 | 7 | 1230 | 32 | 1710 |
| 013a | 835 | 8 | 1250 | 33 | 1730 |
| 012a | 855 | 9 | 1280 | 34 | 1750 |
| 011a | 880 | 10 | 1300 | 35 | 1770 |
| 010a | 900 | 11 | 1320 | 36 | 1790 |
| 09a | 920 | 12 | 1350 | 37 | 1825 |
| 08a | 940 | 13 | 1380 | 38 | 1850 |
| 07a | 960 | 14 | 1410 | 39 | 1880 |
| 06a | 980 | 15 | 1435 | 40 | 1920 |
| 05a | 1000 | 16 | 1460 | 41 | 1960 |
| 04a | 1020 | 17 | 1480 | 42 | 2000 |
| 03a | 1040 | 18 | 1500 | | |

von Segerkegeln wesentlich, wenn der betreffende Kegel nach beginnender Erweichung abgekühlt und von neuem wieder angewärmt wird (sogenanntes Verköhlen des Kegels). Die mit Segerkegeln gemessenen Temperaturpunkte sind daher durch die betreffenden Kegelnummern zu bezeichnen und nicht durch die diesen Nummern laut Zahlentafel 8 zufallenden Temperaturen, da diese nur Mittelwerte darstellen.

7.4 Temperaturkennkörper

Eine ähnliche Funktion wie die Segerkegel haben die Temperaturkennkörper [179]. Im Gegensatz zu den aus einer keramischen Masse hergestellten Segerkegeln sind die Temperaturkennkörper jedoch Formkörper aus verschiedenen Metallen oder Metalllegierungen, die die Eigenschaft haben, bei bestimmten Temperaturen zu schmelzen und dadurch die Form zu verlieren. Sie unterscheiden sich ferner dadurch von den Segerkegeln, daß sie kein längeres Erweichungsintervall besitzen so wie diese, sondern einen sehr scharfen Schmelzpunkt. Sie sprechen daher innerhalb eines ziemlich engen Streubereiches an, der mit maximal ± 7 grd angegeben wird, in den meisten Fällen jedoch nur etwa ± 4 grd beträgt. Der Anwendungsbereich der Temperaturkennkörper liegt zwischen 100 und 1600 °C.

8 Schrifttum

Abkürzungen:

| | |
|-------------------|--|
| Arch. Wärmew. | = Archiv für Wärmewirtschaft |
| ATM | = Archiv für Technisches Messen |
| BWK | = Brennstoff-Wärme-Kraft |
| ETZ | = Elektrotechnische Zeitschrift |
| Forsch. Ing. Wes. | = Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens |
| Z. VDI | = Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure |
| ZAMM | = Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik |

8.1 Allgemeines

8.1.1 Selbständige Buchveröffentlichungen

- [1] American Institute of Physics: Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry. Volume I und II. New York 1941 und 1955, Verlag Reinhold.
- [2] Henning, F.: Temperaturmessung. Leipzig 1955, J. A. Barth.
- [3] Jaeger, W.: Elektrische Meßtechnik. 3. Aufl. Leipzig 1928. J. A. Barth.
- [4] Knoblauch, Osc., und Hencky, K.: Anleitung zu genauen technischen Temperaturmessungen, 2. Aufl. München-Berlin 1926, R. Oldenbourg.
- [5] Knoblauch, Osc., und Hencky, K.: Technisch-Physikalisches Praktikum. Berlin 1934, J. Springer. Nachdruck 1941.
- [6] Kohlrausch, F.: Praktische Physik. Leipzig.
- [7] Lieneweg, F.: Temperaturmessung. Leipzig 1950, Akademische Verlagsgesellschaft.
- [8] Lindorf, H.: Technische Temperaturmessungen. Essen 1956, W. Girardet.
- [9] Schmidt, E.: Einführung in die technische Thermodynamik. 4. Aufl. Berlin-Göttingen-Heidelberg 1950, Springer-Verlag.
- [10] Westphal, W. H.: Physikalisches Praktikum. 5. Aufl. Braunschweig 1947, S. 15.

8.1.2 Veröffentlichungen in Handbüchern und Zeitschriften

- [11] Berl, E.: Temperaturmessung. In: *Berl-Lunge*, Chemisch-technische Untersuchungsmethoden, 8. Aufl., Bd. 1, S. 542. Berlin 1931, J. Springer.
- [12] Blaurock, F.: Temperaturmessung. In: *Werkstoffhandbuch Stahl und Eisen*, 2. Aufl. Abschn. W 11. Düsseldorf 1937, Verl. Stahleisen.
- [13] Closterhalfen, A.: Dampfzustandmesser und Wärmeinhaltmesser. Z. VDI 82 (1938) S. 45.
- [14] DIN 1319 (Grundbegriffe der Meßtechnik), Ausgabe Juli 1942.
- [15] Grundmann, W.: Temperaturmeßgeräte. In: *Handb. der meteorolog. Instrumente* (Hrsg. von E. Kleinschmidt) S. 1. Berlin 1935, J. Springer.
- [16] Guthmann, K.: Entwicklung und Stand der metallurgischen Meßtechnik des Auslandes in den letzten 10 Jahren. Stahl und Eisen 69 (1949) S. 8, 18.
- [17] Guthmann, K.: Temperaturmeßtechnik im Gießereiwesen. Gießerei 36 (1949) S. 163/70.
- [18] Hase, R.: Temperaturmessungen an flüssigen und festen Metallen, dargestellt am Beispiel des Eisens. Z. VDI 79 (1935) S. 1351.
- [19] Hase, R.: Verfahren und Fehler bei Gastemperaturmessungen. Z. VDI 81 (1937) S. 571.

- [20] Hencky, K.: Thermometrische Verfahren und Thermometereinbau. In: *Chemie-Ingenieur*. Bd. II, Teil 3, S. 82. Leipzig 1933, Akad. Verlags GmbH.
- [21] Knoblauch, O.: Merkblatt für Temperaturmessungen mit Flüssigkeits- und elektrischen Thermometern. Arch. Wärmew. 4 (1923) S. 15 und 35.
- [22] Leist, K., und Knörnschild, E.: Temperaturmessung an rasch umlaufenden Maschinenteilen. Jb. dtsh. Luftf.-Forsch. 1937, Teil II: Triebwerk, S. 289.
- [23] Lieneweg, F.: Die Bestimmung von Temperaturmeßfehlern mittels Thermometer-Kennzahlen. Allgem. Wärmetechn. 2 (1951) S. 238/49. Auszug in: BWK 3 (1951) S. 305/09.
- [24] Schmidt, E.: Stand unserer Kenntnis der grundlegenden Einheiten und Konstanten der Physik und Technik. Die Naturwissenschaften 34 (1947) S. 95/96.

8.1.21 Temperaturskale

- [25] Verordnung über die physikalisch-technischen Einheiten vom 14. August 1958, Gesetzblatt der DDR, Teil I, S. 647.
- [26] Amtsblatt des Deutschen Amtes für Maß und Gewicht, Berlin 1950 Nr. 1.
- [27] Otto, J.: Die Internationale Temperaturskala von 1948. Phys. Blätter, 5. Jahrg. (1949) S. 505/10.
- [27a] Otto, J.: Die deutsche gesetzliche und die internationale Temperaturskala. ATM V 210-1 (Nov. 1953).
- [27b] Willenberg, H.: Zur Messung hoher Temperaturen. Die Temperaturskala von 1948. Technik 6 (1951) S. 469/70.

8.2 Wärmeübertragung und Wärmeübergang

8.2.1 Buchveröffentlichungen

- [28] ten Bosch, M.: Die Wärme-Übertragung. 3. Aufl. Berlin 1936, J. Springer.
- [29] Gröber, H., und Erk, S.: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Berlin 1933, J. Springer.
- [30] Henning, F.: Wärmetechnische Richtwerte. Berlin 1938 VDI-Verlag.
- [31] Jakob, M.: Allgemeine Grundlagen der Wärmeübertragung (S. 148) und: Die für die Wärmeübertragung wichtigen Stoffeigenschaften (S. 309). In: *Der Chemie-Ingenieur*, Bd. I, 1. Teil. Leipzig 1933, Akad. Verlags GmbH.
- [32] Jakob, M.: Die Wärmeleitung. In: *Handb. d. Physik* (Hrsg. von H. Geiger und K. Scheel) Bd. XI: Anwendung der Thermodynamik, S. 42. Berlin 1926, J. Springer.
- [33] Knoblauch, O., und Reiher, H.: Wärmeübertragung. In:
- [34] Merkel, F.: Die Grundlagen der Wärmeübertragung. Dresden und Leipzig 1927, Th. Steinkopff.
- [35] Schack, A.: Der industrielle Wärmeübergang. Düsseldorf 1949, Verlag Stahleisen.

8.2.2 Veröffentlichungen in Zeitschriften

- [36] Böhm, J.: Ermittlung des Wärmeübergangs durch Strahlung zwischen Rauchgas und Heizfläche. Arch. Wärmew. 20 (1939) S. 209. *Handb. d. Experimentalphys.* (Hrsg. von W. Wien und F. Harms) Bd. IX, S. 189. Leipzig 1929, Akad. Verlags GmbH.
- [37] Koch, B.: Zur Berechnung des Wärmeübergangs durch Gasstrahlung bei Kohlensäure und Wasserdampf. Feuerungstechn. 20 (1939) S. 136.
- [38] Pohlhausen, E.: Der Wärmeaustausch zwischen festen Körpern und Flüssigkeiten mit kleiner Rei-

bung und kleiner Wärmeleitung. ZAMM 1 (1921) S. 115/21.

- [39] *Steger, W.*: Zur Temperaturleitfähigkeit keramischer Massen. Ber. dtsh. keram. Industrie 16 (1935) S. 596.

8.3 Thermometer und ihr Einbau

- [40] *Abmann, R.*: Das Aspirationspsychrometer. Abh. Kgl. Preuss. Meteorolog. Inst. 1 (1892) Nr. 5.
- [41] *Closterhalpen, A.*: Meßfehler bei Thermometer-einbauten, Forsch. Ing.-Wes. 9 (1938) S. 279/86.
- [42] *Keinath, G.*: Pyrometer-Schutzrohre. ATM J 243-1 (Dez. 1932).
- [43] *Krönert, J.*: Durchflußpyrometer. ATM J 242-1 (Sept. 1931).
- [44] *Schack, A.*: Geräte und Verfahren zu Temperaturmessungen. Mitt. 96 und 97 d. Wärmestelle d. Ver. dtsh. Eisenhüttenleute, Düsseldorf 1927, Verlag Stahl Eisen.
- [44a] *Lieneweg, F.*: Meßfehler von Thermometern, ihre Kontrolle, Prüfung und Beseitigung. Feinwerktechnik 56 (1952) S. 325/32.
- [45] *Schmidt, E.*: Zweckmäßige Bauart von Thermometerrohren für strömende Gase. Z. VDI 69 (1925) Ergänzungsheft „Technische Mechanik“ S. 58.
- [46] *Rabald, E.*: Materialangaben für Schutzrohre. In: DECHEMA-Werkstoff-Tabelle, Berlin 1948.
- [47] *Wenzl, M., und Schulze, E.*: Versuche mit Durchflußpyrometern. Mitt. 92 d. Wärmestelle Düsseldorf d. Ver. dtsh. Eisenhüttenleute, Verlag Stahl Eisen 1926.

8.4 Messung der Temperaturen

- [48] *Eckert, E.*: Temperaturmessung in schnell strömenden Gasen. Z. VDI 84 (1940) S. 813/817.
- [49] *Fischer, J.*: Temperaturfehler und Strahlungsempfänger. Z. Techn. Phys. 22 (1941) S. 316/23.
- [50] *Franz, A.*: Meßtechnische Fragen bei Lader-Untersuchungen. Jb. dtsh. Luftf. Forsch. (1938) II, S. 215/218.
- [51] *Friedrich, H.*: Die genaue Temperaturmessung von Kesselrauchgasen mit Absaugepyrometern. Mitt. Forsch.-Anst. Gutehoffn.-Hütte 1 (1930, 32) S. 139.
- [52] *Gnam, E.*: Temperaturmessungen an schnell umlaufenden Maschinenteilen. Luftwissen 10 (1943) S. 110/13.
- [53] *Guthmann, K.*: Temperaturmessung an Metallschmelzen. ATM V 2164-1 (Nov. 1949).
- [54] *Harper, D. R., und W. B. Brown*: Mathematical equations for heat conduction in the fins of air-cooled engines. NACA Rep. Nr. 158 (1922).
- [55] *Hausen, H.*: Zur Messung von Lufttemperaturen in geschlossenen Räumen. Gesundh.-Ing. (1921) S. 43.
- [56] *Hausen, H.*: Die Messung von Lufttemperaturen in geschlossenen Räumen mit nicht strahlungsgeschützten Thermometern. Z. techn. Phys. 5 (1924) S. 169.
- [57] *Hildenbrand, E.*: Bestimmung des Strahlungsmessfehlers bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen in Gasen. Arch. Wärmew. 7 (1926) S. 319.
- [58] *Jäger, H.*: Über die Temperaturmessung von Gasen. Einfluß der Strahlung auf das Meßergebnis. Arch. Wärmew. 19 (1938) S. 23.
- [59] *Koch, W.*: Meßgenauigkeit armierter Thermometer für Flüssigkeiten und gesättigte Dämpfe. Arch. Wärmew. 7 (1926) S. 349.

- [60] *Meier, A.*: Messung schnell veränderlicher Zylinderwand-Temperaturen. Forsch. Ing. Wes. 10 (1939) S. 41/54.
- [61] *Meißner, W.*: Temperaturmessung in rasch strömenden Gasen. Forsch. Ing. Wes. 9 (1938) S. 213/218.
- [61a] *Otte, W.*: Temperaturmessungen in Dampfkraftwerken. BWK 3 (1951) S. 227/29.
- [62] *Pfriem, H.*: Zur Messung veränderlicher Temperaturen von Gasen und Flüssigkeiten. Forsch. Ing. Wes. 7 (1936) S. 85.
- [63] *Pfriem, H.*: Zur Messung schnell wechselnder Temperaturen in der Zylinderwand von Kolbenmaschinen. Forsch. Ing. Wes. 6 (1935) S. 195/201.
- [64] *Pfriem, H.*: Messung schnell veränderlicher Wandtemperaturen im Motorenbau. ATM V 2167-1 (Juli 1940).
- [65] *Reiher, H., und Cleve, K.*: Temperaturmeßfehler bei strömenden Gasen. Z. VDI 69 (1925) Ergänzungsheft „Techn. Mechanik“ S. 49.
- [66] *Reiher, H., und Cleve, K.*: Temperaturmeßfehler in Gasen und überhitzten Dämpfen durch Wärmeableitung von der Meßstelle. Arch. Wärmew. 7 (1926) S. 273.
- [67] *Schack, A.*: Temperaturmessungen an Siemens-Martin-Öfen. Arch. Eisenhüttenw. 3 (1929/1930) S. 7 (Ber. Stahlwerksausschuß 169).
- [68] *Schmidt, E.*: Messung der Gesamtstrahlung des Wasserdampfes bei Temperaturen bis 1000 °C. Forsch. Ing. Wes. 3 (1932) S. 57.
- [69] *Schmidt, Herm.*: Über ein Verfahren zur Messung von Gastemperaturen. Z. techn. Phys. 7 (1926) S. 518.
- [70] *Schoen, J.*: Die Temperaturmessung in strömenden Gasen. ATM V 2165-1 (Aug. 1951).
- [71] *Tewes, W.*: Temperaturmeßfehler in strömenden Gasen und Dämpfen. Z. techn. Phys. 22 (1941) S. 160.
- [72] *Tewes, W.*: Temperaturmeßfehler in strömenden Gasen durch Wärmeableitung und Wärmestrahlung von der Meßstelle. Arch. Wärmew. 19 (1938) S. 189.
- [73] *Wimmer, W.*: Die Messung der Stautemperatur Ing. Arch. 11 (1940) S. 1/23.

8.5 Flüssigkeitsthermometer

- [74] *Adam, J.*: Zur Bestimmung der Korrektur des herausragenden Fadens von Quecksilberthermometern mit Hilfe des Fadenthermometers. Z. Instrumentenkunde 27 (1907) S. 101.
- [75] *Grundmann, W.*: Entwicklung und Probleme der Flüssigkeitsthermometrie. Glas und Appar. 17 (1936) Hefte 6 bis 9, 16 bis 20, 24 und 25; 18 (1937) Hefte 3 bis 5, 7, 12, 17, 21, 25 und 26.
- [76] *Grundmann, W.*: Flüssigkeitsthermometrie. Glasinstrumentenkunde 2. Band. Weimar 1941, Verlag „Glas und Apparat“ R. Wagner Sohn.
- [77] *Heuse, W.*: Quecksilberthermometer. ATM J 212-1 (Okt. 1943).
- [78] *Heuse, W.*: Flüssigkeitsthermometer. ATM J 212-2 (Jan. 1950).
- [79] *Holborn, L., und Otto, J.*: Alterung von Thermometergläsern. Z. Instrumentenkunde 46 (1926) S. 415/24 und Wiss. Abhandl. Phys.-Techn. Reichsanstalt 10 (1926) S. 207/16.
- [80] *Mahlke, A.*: Über ein Hilfsinstrument zur Bestimmung der Korrektur für den herausragenden Faden beim Thermometer. Z. Instrumentenkunde 13 (1893) S. 58.

- [81] *Mahlke, A.*: Über einen Thermometervergleichsapparat für Temperaturen zwischen 250 und 600° und über die Verwendung von Fadenthermometern bei denselben. *Z. Instrumentenkunde* 14 (1984) S. 73.
- [82] *Moser, H.*: Über Quecksilber-Thallium-Legierungen und ihre Verwendung für chemische Zwecke. *Phys. Z.* 37 (1936) S. 885.
- ### 8.6 Elektrische Temperaturmeßgeräte
- #### 8.61 Widerstandsthermometer
- [85] *Bartel, A.*: Platin-Widerstandsthermometer für Temperaturmessung bis 750 °C. *Z. VDI* 92 (1950) S. 726/28.
- [86] *Dettmer, F.*: Temperaturüberwachung in der keramischen Industrie. *ATM V* 2175-2 (April 1941).
- [87] *v. Engel, A., und Steenbeck, M.*: Gas- und Flammentemperaturmessung. *ATM V* 2163-1 (Sept. 1933).
- [88] *Geyger, W.*: Temperaturdifferenz-Messung mit Widerstandsthermometern bei zwei veränderlichen Temperaturen. *ATM V* 2155-2 (1931).
- [89] *Grüss, H.*: Widerstandsthermometer aus hochhitzebeständigen Halbleitern. *ATM J* 221-2 (Dez. 1937).
- [90] *Hunsinger, W., und v. Schaewen, J.*: Der Temperaturfehler und sein Ausgleich beim Kreuzspulgerät. *ATM J* 023-5 (Apr. 1952).
- [91] *Keinath, G.*: Temperaturmessung an Transformatoren. *ATM V* 2177-1 (1931).
- [92] *Keinath, G.*: Widerstandsthermometer. *ATM J* 221-1 (Jan. 1933).
- [93] *Keinath, G.*: Temperaturmessung und -regelung in Härteöfen. *ATM V* 2172-1 (Juni 1937).
- [94] *Lieneweg, F.*: Der Erwärmungsfehler von Widerstandsthermometern. *ATM J* 023-4 (Okt. 1949); siehe auch [23].
- [95] *Lieneweg, F.*: Angleichung von Widerstandsthermometern an andere Eichreihen *ATM J* 222-2 (Dez. 1949).
- [96] *Lindorf, H.*: Temperaturfühler für die Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern. *ATM J* 223-1 (Juli 1941).
- [97] *Lorenz, J.*: Temperaturmessung mit dem Kreuzspulgerät. *ATM* 212-1 (Nov. 1939) und *Jahrb. d. deutsch. Luftf.-Forsch.* 1938.
- [98] *Methger, K.*: Temperaturüberwachung in Glasmelzöfen. *ATM V* 2175-1 (Juni 1933).
- [98a] *Naumann, A.*: Neue elektrische Raumthermometer. *Siemens-Zeitschr.* 25 (1951) S. 67/70.
- [99] *Schulz, B.H.*: Messung schnell fluktuierender Gas Temperaturen. *Philips Techn. Rundschau* 13 (1951) S. 104/09.
- [100] *Schulze, A.*: Werkstoffe für Widerstandsthermometer. *ATM J* 223-2 (Aug. 1943).
- [101] *Wuest, W.*: Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern. *ATM V* 221-1 (Juli 1943).
- [102] *Zschaage, W.*: Temperaturmessung beim Härten. *ATM V* 2172-2 (Nov. 1950).
- [105] *Brunner, W.*: Erwärmung der Reifen von Personenkraftwagen bei hohen Fahrgeschwindigkeiten, *Deutsche Kraftfahrtforschung*, Heft 2, Berlin 1938, VDI-Verlag.
- [106] *Euler, H., und Guthmann, K.*: Fehler bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen. Hinweise für den praktischen Gebrauch von Thermoelementen und Schutzrohren. *Arch. Eisenhüttenw.* 9 (1935/36) S. 73 (Mitt. Wärmestelle 218).
- [107] *Geyger, W.*: Gleichstromkompensatoren mit selbsttätiger Abgleichung. *ATM J* 932-1 und 2 (März und Mai 1936).
- [108] *Gilbert, R. W.*: A New High Speed, High Sensitivity Photoelectric Potentiometer. *Journ. Sci. Instr.* 7 (1936) S. 41/44.
- [109] *Hausen, H.*: Meßgenauigkeit bei der Bestimmung der Temperatur fester Körper mit Thermoelementen. *Arch. Wärmew.* 8 (1927) S. 87.
- [110] *Heraeus, W. C.*: Thermoelemente. *ATM J* 241-2 (Juli 1931).
- [111] *Heuse, W.*: Bimetallthermometer. *ATM J* 211-1 (Juli 1950).
- [112] *Hübner, W.*: Ein Photozellenkompensator hoher Empfindlichkeit für Messungen mit thermischen Strahlungsempfängern *Elektrotechnik* 4 (1950) S. 378/85.
- [113] *Hunsinger, W.*: Der Photozellenkompensator. *Helios* 1939 S. 184.
- [114] *Hunsinger, W.*: Kompensationsgeräte in der Temperaturmeß- und -regeltechnik. *ETZ* 62 (1941) S. 481.
- [115] *Hunsinger, W.*: Neuer tragbarer Kompensator. *Helios* 1942 S. 55.
- [116] *Keinath, G.*: Thermoelemente. *ATM J* 2401-1 (Oktober 1932), *J* 241-1 (Januar 1933), *J* 241-3 (Juli 1943), *J* 241-4 (April 1935).
- [117] *Kirchel, M.*: Ein neues Eintauch-Thermoelement. *Gießerei* 38 (1951) S. 161/62.
- [118] *Knoblauch, H.*: Versuche über den Wärmeaustausch zwischen Bremsstrommel und Felge bei Lastkraftwagen und Omnibussen. *Diss. München* (1932).
- [119] *Koch, W.*: Praktische Auswertung von Eichkurven für Thermoelemente. *Forsch. Ing. Wes.* 2 (1931) S. 302.
- [120] *Koch, W.*: Messung der Luftfeuchtigkeit mit Thermoelementen ohne künstliche Belüftung. *Gesundh. Ing.* 59 (1936) S. 504.
- [121] *Krönert, J.*: Meßbrücken und Kompensatoren, Bd. 1. München 1935, R. Oldenbourg.
- [122] *Leiber, G.*: Temperaturmessungen im Stahlbade des basischen Siemens-Martin-Ofens. *Arch. Eisenhüttenw.* 11 (1937/38) S. 63 (Ber. Stahlwerksausschuß 328).
- [123] *Lindeck-Rothe*: Kompensationsschaltung für Thermoelemente. *Z. Instrumentenkunde* (1899) S. 242 und (1900) S. 293.
- [124] *Merz, L.*: Theorie der selbstkompensierenden Gleichstromverstärker. *Arch. Elektr.* 31 (1907) S. 1/23.
- [125] *Osann, B. jun., und Schröder, E.*: Temperaturmessungen mit Wolfram-Molybdän-Thermoelementen. *Arch. Eisenhüttenw.* 7 (1933/34) S. 89 (Ber. Stahlwerksausschuß 257).
- [126] *Raisch, E., und Schropp, K.*: Die thermoelektrische Temperatur- und Wärmeflußmessung. *Mitt. Forschungsheim für Wärmeschutz München*, Heft 8 (1930).
- [126a] *Schaller, A.*: Lichtelektrische Verstärker. *ATM Z* 634-7 (Febr. 1952).
- #### 8.62 Thermoelemente
- [103] *Bauerfeld, Fr.*: Über die Thermokräfte von Chrom-Nickel-Legierungen. *Diss. Münster. Ref. Z. VDI* 74 (1930) S. 50.
- [104] *Bangerter, H.*: Messung und Bestimmung richtiger Auspuff- und wirklicher Abgastemperaturen bei Brennkraftmaschinen. *Forsch. Ing. Wes.* 7 (1936) S. 117.

- [127] *Scholz, H., und Stebel, O. J.*: Temperaturmessungen des flüssigen Stahles im Siemens-Martin-Ofen mit einem Tauchthermoelement. *Stahl und Eisen* 71 (1951) S. 728/32.
- [128] *Schulze, A.*: Über die Verwendung von Thermo-Elementen in hohen Temperaturen. *Z. VDI* 75 (1931) S. 731.
- [129] *Schulze, A.*: Thermo-Elemente in hohen Temperaturen. *Z. VDI* 77 (1933) S. 1241.
- [130] *Sieber, C.*: Temperaturregelung metallurgischer Ofen. *Metallwirtschaft* (1941) S. 603.
- [131] *Stanek, F.*: Stechpyrometer zum Messen der Verarbeitungstemperatur von Leichtmetallen. *Masch.-Bau Betr.* 16 (1937) S. 505.
- [132] *Tanaka, M., und Okada, K.*: On a New Three-Element Thermocouple for Precision Temperature Measurement. *Electrotechnical Journal Japan*, 1 (1937) S. 42.
- [132a] *Thomas, H.*: Über ein neues, von der Vergleichsstellentemperatur unabhängiges Thermo-Element. *Z. f. Metallk.* 36 (1944) S. 140/41.
- [133] *Wintergerst, S.*: Messung der Oberflächentemperatur umlaufender Walzen. *Forsch. Ing. Wes.* 5 (1934) S. 218.
- 8.7 Strahlungs-pyrometer**
- [134] *Blaurock, F.*: Beitrag zur optischen Temperaturmessung von flüssigem Eisen und Stahl. *Arch. Eisenhüttenw.* 8 (1934/35) S. 517 (Mitt. Wärmestelle 216).
- [135] *Dahl, A. F.*: The stability of base-metal thermocouples in air from 800 to 2200 °F. In: *Temperature, its measurement and control in science and industry*. New York 1941. S. 1238/66.
- [136] *Euler, J.*: Fortschritte auf dem Gebiet der optischen Pyrometrie in den Jahren 1940 bis 1950. *Z. angew. Phys.* 2 (1950) S. 505/09.
- [137] *Eckert, E.*: Technische Strahlungsaustauschrechnungen und ihre Anwendungen in der Beleuchtungstechnik und beim Wärmeaustausch. Berlin 1937, VDI-Verlag.
- [138] *Guthmann, K.*: Fortschritte, Bedeutung und Auswirkung der Temperaturmessung in Eisenhüttenbetrieben. *Radex-Rundschau* 1951, S. 211/23 (Heft 5).
- [139] *Guthmann, K.*: Meßerfahrungen mit einem neuen Farbpyrometer. *Stahl und Eisen* 56 (1936) S. 481 (Mitt. Wärmestelle 228).
- [140] *Guthmann, K.*: Vergleichende Temperaturmessungen an Roheisen-, Gußeisen- und Stahlschmelzen. *Stahl und Eisen* 56 (1936) S. 481/89, 57 (1937) S. 1245/48 und 1269/79 (Mitt. Wärmestelle 150).
- [141] *Guthmann, K.*: Ein neues Farbpyrometer. *ATM V* 214-7 und 8 (Mai 1937).
- [142] *Guthmann, K.*: Amerikanische Verfahren der Temperaturmessung im Bode des Siemens-Martin-Ofens. *Stahl und Eisen* 61 (1941) S. 84/86.
- [142a] *Guthmann, K., u. a.*: Gewölbtemperaturmessung an Siemens-Martin- und Lichtbögenöfen mit Photoelement-Pyrometer. *Stahl und Eisen* 72 (1952) S. 1418/26.
- [143] *Haase, G.*: Farb-Pyrometrie. *ATM V* 214-2 (Okt. 1933).
- [144] *Haase, G.*: Bestimmung der Farbtonempfindlichkeit des menschlichen Auges bei verschiedenen Helligkeiten und Sättigungen. Bau eines empfindlichen Farbpyrometers. *Ann. Phys.* 5. Folge 20 (1934) S. 75.
- [145] *Hase, R.*: Neues Verfahren zur Bestimmung des Emissionsvermögens fester Körper bei hohen Temperaturen. *Z. VDI* 76 (1932) S. 895.
- [146] *Hase, R.*: Emission von Aluminium und seinen Legierungen. *Z. techn. Physik* 13 (1932) S. 145.
- [147] *Hase, R.*: Temperaturmessung an flüssigen und festen Metallen, dargestellt am Beispiel des Eisens. *Z. VDI* 79 (1935) S. 1351.
- [148] *Hoffmann, F., und Tingwaldt, C.*: Optische Pyrometrie. Braunschweig 1938, F. Vieweg & Sohn.
- [149] *Hunsinger, W., und Grönegress, H. W.*: Trägheitslose Temperaturmessung an schnellbewegten Gegenständen. *Z. VDI* 92 (1950) S. 285/90.
- [150] *Jagersberger, A.*: Genauigkeit der Messungen mit technischen optischen Pyrometern. *Bull. Schweiz. Elektrotechn. Verein* 40 (1949) S. 179/86.
- [151] *Jebesen-Marwedel, H.*: Kontrolle der Temperaturanzeige von Teilstrahlungs-pyrometern durch Eichung im Betrieb. *Glastechn. Ber.* 13 (1935) S. 416.
- [152] *Jebesen-Marwedel, H.*: Beitrag zur betrieblichen Überprüfung von Teilstrahlungs-pyrometern. *Arch. Wärmew.* 17 (1936) S. 189.
- [153] *Kreutzer, K.*: Neue Betriebsüberwachungen an Siemens-Martin-Ofen. *Stahl und Eisen* 59 (1939) S. 1017/27.
- [154] *Krönert, J.*: Temperaturmessung durch Messung der Strahlung. *ATM V* 214-1 (Juli 1931).
- [154a] *Land, T.*: A Photo-Electric Roof Pyrometer for Open-Hearth Furnaces. *Journ. Iron Steel Inst.* 155 (1947) S. 568/76
- [155] *Lieneweg, F.*: Oberflächentemperatur. Schnellmessung mit Strahlungs-pyrometern. *ATM V* 2162-1 (Aug. 1937).
- [156] *Liesegang, W.*: Das Messen mit dem Ardometer an Industrieöfen. *Arch. Wärmew.* 12 (1931) S. 293.
- [157] *Lohausen, K. A.*: Über die Möglichkeiten der Temperaturschnellregelung. *Elektrowärme* 10 (1940) S. 171/76.
- [158] *Naeser, G.*: Das Emissionsvermögen von flüssigen Eisenlegierungen. *Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforschg.* XII (1930) S. 365.
- [159] *Naeser, G.*: Die Praxis der Teilstrahlungs-pyrometrie. *Stahl und Eisen* 54 (1934) S. 1158.
- [160] *Naeser, G.*: Ein neues kombiniertes Farbpyrometer mit Vergleichslampe. *Arch. Eisenhüttenw.* 9 (1935/36) S. 483 (Mitt. Wärmestelle 237) und *Stahl und Eisen* 56 (1936) S. 497.
- [161] *Naeser, G.*: Über ein einfaches Farbpyrometer. *Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforschg.* 11 (1929) S. 373.
- [162] *Naeser, G.*: Zur Farbpyrometrie. *Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforschg.* 12 (1930) S. 299/316.
- [163] *Naeser, G.*: Farbpyrometrie. *Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforschg.* 18 (1936) S. 21.
- [164] *Naeser, G.*: Ausschußverminderung durch Strahlungsmessungen in Schmelzbetrieben mit dem Farbhelligkeitspyrometer „Bioptix“. *Stahl und Eisen* 59 (1939) S. 592/98.
- [165] *Naeser, G., und Engels, G.*: Zur Strahlungsanalyse von flüssigem Stahl. *Stahl und Eisen* 69 (1949) S. 508/14.
- [166] *Naeser, G., und Krächter, H.*: Überwachung des basischen Windfrischverfahrens durch Messung der Strahlung der Konverterflamme. *Stahl und Eisen* 62 (1942) S. 341/47.

- [167] Naeser, G., und Pepperhoff, W.: Verfahren zur Ermittlung der Schmelztemperatur im blasenden Konverter. Stahl und Eisen 70 (1950) S. 22/24.
- [168] Naeser, G., und Pepperhoff, W.: Optische Temperaturmessung an leuchtenden Flammen. Arch. Eisenhüttenw. Bd. 22 (1951) S. 9/14.
- [168a] Pepperhoff, W., und Bähr, A.: Zur Optik leuchtender Flammen. Arch. Eisenhüttenw. Bd. 23 (1952) S. 335/44.
- [169] Russel, A. W., und Lucks, C. F.: A new two color optical pyrometer. In: Temperature, its measurement and control in science and industry. New York 1941, S. 1159/63
- [170] Schmidt, E.: Wärmestrahlung technischer Oberflächen bei gewöhnlicher Temperatur. Beihefte z. Gesundh.-Ing., Reihe 1 Heft 20, München und Berlin 1927, R. Oldenbourg.
- [171] Schmidt, Herm., und Furthmann, E.: Über den Einfluß der Linsenabsorption bei Messungen mit Gesamtstrahlungs-pyrometern. Mitt. K.-Wilh.-inst. Eisenforsch. VIII (1926) S. 103.
- [172] Schmidt, Herm., und Liesegang, W.: Ist der Herdraum eines Siemens-Martin-Ofens für die optische Temperaturmessung ein schwarzer Körper? Arch. Eisenhüttenw. 1 (1927/28) S. 677 (Ber. Stahlwerksausschuß 140).
- [173] Schmidt, Herm., und Schweinitz, H.: Fluchtlinientafeln zur Wärmestrahlung. Mitt. K.-Wilh.-Inst. Eisenforsch. 7 (1925) S. 99.
- [174] Sharp, C. H.: An apparatus to measure color temperature of incandescent lamp filaments. J. Opt. Soc. Amer. 20 (1930) S. 62/67.
- [175] Wesemann, F.: Die optische Messung der Oberflächentemperatur von Wärmgut. Stahl und Eisen 56 (1936) S. 1212.
- [176] Zeltmann, H. J.: Temperaturmessung mit Photozellen. ATM V 214-3 (Sept. 1934).
- 8.8 Besondere Temperaturmeßverfahren**
- [177] Dettmer, F.: Temperaturüberwachungen in der keramischen Industrie. ATM V 2175-2 (April 1941).
- [178] Drexler, F.: Verfahren zur Sichtbarmachung der Temperaturverteilung an Glasöfen. Glastechn. Berichte 17 (1939) S. 205/207.
- [179] Fröhlich, K. W.: Temperaturüberwachung mit Temperaturkennkörpern. Werkstatt und Betrieb 83 (1950) Heft 6.
- [180] Guthmann, K.: Farbanstriche und Farbstifte zur Messung von Temperaturen zwischen 40° bis 650°C. Stahl und Eisen 62 (1942) S. 477/82 (Mitt. Wärmestelle 301).
- [181] Guthmann, K.: Temperaturmeßfarben und Meßfarbstifte. I. Allgemeines, ATM V 215-3 (Dez. 1943); II. Anwendung, ATM V 215-4 (Juli 1947).
- [182] Guthmann, K.: Erfahrungen mit Temperaturmeßfarben. Stahl und Eisen 70 (1950) S. 116/18.
- [183] Hencky, K., und Neubert, P.: Die Photo-Thermometrie. ATM V 214-4 (Aug. 1936).
- [184] Neubert, P.: Anwendung der Photo-Thermometrie. ATM V 214-5 (Sept. 1936).
- [185] Neubert, P.: Die Photothermometrie. Arch. Wärmew. 19 (1938) S. 29.
- [186] Neubert, P.: Die direkte Sichtbarmachung von Temperaturfeldern durch Lenard-Phosphore (Temperatur-Sehen). ATM V 214-6 (1937).
- [187] Pahlitzsch, G., und Helmerding, J.: Erfassung nicht stationärer Temperaturfelder mittels Temperatur anzeigender Farbanstriche. Die Wärme 66 (1943) S. 160/163; Z. VDI 87 (1943) S. 564/71 und S. 691/98.
- [188] Penzig, F.: Sichtbarmachung von Temperaturfeldern durch temperaturabhängige Farbanstriche. Z. VDI 83 (1939) S. 69/74.
- [189] Rosenthal, G.: Temperaturmessung mit Hilfe der Linienumkehrmethode. ATM V 2163-2 (Jan. 1942).
- [190] Schallbrock, H., und Lang, M.: Messung der Schnitttemperatur mittels der Farbanstriche. Z. VDI 87 (1943) S. 15/19.
- [191] Steger, W.: Temperaturmessung mit Segerkegeln. ATM V 215-1 (Okt. 1931).
- 8.9 DIN- und TGL-Blätter**
- (E) = Entwurf
- DIN 1319 Grundbegriffe der Meßtechnik
- DIN 12 770 Thermometer (Erläuterungen)
- DIN 12 775 Feinthermometer
- DIN 12 776 Dreisatz-Thermometer (Allihn)
- DIN 12 777 Siebensatz-Thermometer (Anschütz)
- DIN 12 778 Laboratoriums-Thermometer
- DIN 12 779 Destillations-Thermometer
- DIN 12 780 Hochgradige Thermometer
- DIN 12 781 Laboratoriums-Stockthermometer
- DIN 12 782 Betriebs-Stockthermometer
- DIN 12 783 Betriebs-Winkelthermometer
- TGL 0-16 160 Blatt 1 Thermometer, Allgemeine Begriffe (E)
- TGL 0-16 160 Blatt 5 Begriffe für elektrische Thermometer
- DIN 16 160 Blatt 6 Begriffe für Strahlungsthermometer (Pyrometer)
- DIN 16 161 (E) Gerade Maschinen-Thermometer
- DIN 16 162 (E) Winkel-Maschinethermometer 90°
- DIN 16 163 (E) Winkel-Maschinethermometer 45°
- DIN 16 164 (E) Maschinethermometer, Glaseinsätze
- DIN 16 165 (E) Maschinethermometer, Einzelteile (Wahl, Anbringung, Behandlung)
- DIN 16 166 (E) Maschinethermometer, Stückliste
- DIN 16 171 (E) Kleine Maschinethermometer mit Fassung und Glaseinsatz
- DIN 16 172 (E) Kleine Maschinethermometer, Glaseinsätze
- DIN 16 173 (E) Kleine Maschinethermometer, Einzelteile und Stückliste
- DIN 40 685 Keramische Isolierstoffe für die Elektrotechnik
- DIN 43 709 Schalttafelinstrumente für wärmetechnische und ähnliche Zwecke
- TGL 0-43 710 Thermolemente, Thermospannungen und Werkstoffe der Thermopaare (E)
- TGL 0-43 712 Thermolemente, Thermodraht (E)
- TGL 0-43 713 Thermolemente, Ausgleichsdrähte und Litzen (E)
- TGL 0-43 720 Thermolemente, Metallene Schutzrohre für Thermolemente TGL 0-43 733 für Nenndruckstufe ND 1 nach DIN 2401
- TGL (in Vorb.) Thermolemente, Keramische Schutzrohre für Thermolemente TGL 0-43 733
- TGL (in Vorb.) Thermolemente, Isolierteile für Thermolemente aus TGL 0-43 733
- TGL 0-43 729 Thermolemente und Widerstandsthermometer, Anschlußköpfe (E)
- TGL 0-43 732 Thermopaare für Thermolemente TGL 0-43 733
- TGL 0-43 733 Thermolemente, Übersicht über gerade Thermolemente für Nenndruckstufe ND 1 nach DIN 2401

- TGL 0-43734 Anschlagflansche für Thermolemente und Widerstandsthermometer (E)
- TGL 0-43735 Thermolemente, Meßeinsätze (E)
- TGL 0-43760 Widerstandsthermometer (Grundwerte für Meßwiderstände)
- TGL 0-43762 Widerstandsthermometer, Meßeinsätze (E)
- TGL 0-43763 Metallene Schutzrohre für Widerstandsthermometer und Thermolemente TGL 0-43770
- TGL 0-43764 Rauchgas-Widerstandsthermometer (E)
- TGL 0-43765 Widerstandsthermometer mit Schutzrohr B TGL 0-43763
- TGL 0-43766 Widerstandsthermometer und Thermolemente mit Schutzrohr C TGL 0-43763
- TGL 0-43769 Widerstandsthermometer und Thermolemente mit Meßeinsätzen ohne zusätzliches Schutzrohr (E)

- TGL 0-43770 Gerade Widerstandsthermometer und Thermolemente, Übersicht (E)
- DIN 12 784 Blatt 1 Thermometer mit Normschliff, Destillations-Thermometer (eichfähig) Blatt 2 (E) -, Richtlinien für Bestellung
- DIN 75 575 Fernthermometer (Kraftfahrzeugbau)
- TGL 6491 Heißdampf-Temperaturmeßanlagen für Lokomotiven, Technische Lieferbedingungen
- DIN 12 786 Einschlußthermometer für wärmewirtschaftliche Untersuchungen
- DIN 16 160 Blatt 4 (E) Begriffe für Flüssigkeits- und Dampfdruck-Federthermometer
- DIN 16 160 (E) -, Blatt 3 Begriffe für Flüssigkeitsglasthermometer

9 Stichwortverzeichnis

(Die Zahlen geben die Nummern der Abschnitte an)

| | | | |
|---|---|--|---|
| Abkühlungsgesetz, Newtonsches | 1.42 | Meßfehler (siehe auch Fehlergrenze) | 1.31, 1.47, 3.152, 4.43 |
| Abnahmeversuche | 3.182 | Mittlere Temperatur, Messung der | 4.44 |
| Absorptionsvermögen (siehe auch Strahlungsvermögen) | 6.13 | Netzmessung | 4.44 |
| Alterung, Flüssigkeits-Federthermometer | 2.231 | Normalstrahler | 6.12 |
| - Thermdraht | 3.13 | Photoelemente | 6.412 |
| Anzeigeverzögerung (Einstellzeit) | 1.4 | Photothermometrie | 7.1 |
| Aspirationsthermometer, Assmannsches | 4.467 | Photozellen | 6.413 |
| Ausdehnungsbeiwert | 2.113 | Poggendorf-Schaltung | 3.191 |
| Ausgleichsleitung der Thermolemente | 3.144, 3.161, 3.162 | Prüfung siehe Eichung und Prüfung | |
| Ausgleichschaltung | 3.163 | Quecksilber-Federthermometer siehe Flüssigkeits-Federthermometer | |
| Ausschlagschaltungen | 3.232 | Quotientenschaltung | 3.232 |
| Außentemperatur, Einfluß der | 2.22 | Seegerkegel | 7.3 |
| Beckmann-Thermometer | 2.45 | Spannungskurve siehe Grundwertreihe | |
| Bimetallthermometer | 2.42 | Spitzen thermolement (Stechthermolement) | 3.202 |
| Berührungsthermometer | 1.31, 1.32 | Schnell wechselnde Temperaturen | 4.316, 4.667 |
| Betriebsthermometer | 2.111 | Schutzrohre | 2.14, 4.42, 4.432 |
| Brückenschaltung | 3.191, 3.231 | Schwarzer Körper | 6.12, 6.13, 6.511 |
| Dampfdruck-Federthermometer | 2.3 | Schwarze Strahlung | 6.12, 6.13 |
| Differenzschaltung | 3.193 | Schwarze Temperatur | 6.211, 6.24 |
| Drahtdicke von Thermopaaren | 3.151 | Schwärzegrad (siehe auch Strahlungsvermögen) | 6.13 |
| Durchflußpyrometer siehe Durchflußthermolement | | Stabausdehnungsthermometer | 2.41 |
| Durchflußthermolement | 4.468 | Staupunkttemperatur | 4.463 |
| Eichung (Einmessung) und Prüfung, Allgemeines | 5.1 | Stechthermolement (Spitzen thermolement) | 3.202 |
| - der Berührungsthermometer | 5.2, 5.3 | Strahlungskonstante, Verringerung der | 4.465 |
| - der Strahlungs pyrometer | 6.5 | Strahlungspyrometer | 6 |
| Einbau der Thermometer | 1.32, 4 | Strahlungsschutz | 4.464 |
| Einbaulänge | 4.4322 | Strahlungsvermögen (-intensität) | 6.11, 6.12, 6.13 |
| Einschlußthermometer | 2.112 | (siehe auch Teilstrahlungsvermögen) | |
| Elektromotorische Kraft (siehe auch Thermospannung) | 3.11 | Strahlungszahl siehe Strahlungsvermögen | |
| Emissionsvermögen (siehe auch Strahlungsvermögen) | 6.13 | Streuung | 1.51 |
| Faden, herausragender | 2.13 | Tauchthermolement | 4.47 |
| Farbpyrometer | 6.152, 6.3, 6.52 | Teilstrahlung | 6.11 |
| Farbtemperatur | 6.31, 6.311, 6.322, 6.324, 6.325, 6.326 | Teilstrahlungspyrometer | 6.152, 6.2 |
| Fehler | 1.51, 4.43, 4.451, 4.461, 4.462 | Teilstrahlungsvermögen | 6.242, 6.25 |
| Fehlergrenze (Genauigkeit) | 1.5, 2.16, 2.23, 3.18, 3.25, 6.26, 6.42 | Temperaturbeiwert | 3.212 |
| Fehlerfortpflanzungsgesetz | 1.51 | Temperaturfeld | 1.31, 4.21, 4.311 |
| Festpunkte | 1.21, 5.21, 5.3 | Temperaturfühler | 1.31, 1.32, 1.45, 4.11 |
| Flüssigkeits-Federthermometer | 2.2 | Temperaturkennkörper | 7.4 |
| Flüssigkeits-Glasthermometer | 2.1 | Temperaturmeßfarben | 7.2 |
| Füllflüssigkeiten | 2.121, 2.122 | Temperaturmeßstifte | 7.2 |
| Füllmittel (für Schutzrohre) | 4.434 | Temperaturskale | 1.2, 5.3 |
| Genauigkeit siehe unter Fehlergrenze | | Temperaturdifferenzmessung | 3.26 |
| Gesamtstrahlung | 6.11, 6.13 | Temperaturtendenzmessung | 3.26 |
| Gesamtstrahlungspyrometer | 6.152, 6.4, 6.53 | Thermolemente | 3.1, 4.2, 4.3, 4.442, 4.466, 5.15, 5.25 |
| Gesamtemperatur siehe Staupunkttemperatur | | Thermokette | 3.193 |
| Glühfadenpyrometer siehe Leuchtdichtepyrometer | | Thermometerprüfeinrichtungen | 5.2, 5.3 |
| Grauer Strahler | 6.14, 6.31 | Thermopaar | 3.12, 3.13, 3.15, 4.2, 4.3 |
| Grundwertreihe (Thermospannungskurve) | 3.13, 3.141, 3.142, 3.143, 3.212 | Thermospannung | 3.11, 3.13, 3.14, 3.17 |
| Halbwertzeit | 1.4 | Toleranz siehe Fehlergrenze | |
| Helligkeit siehe Leuchtdichte | | Umrechnung (°K in °C und umgekehrt) | 1.22 |
| Intensitätspyrometer (siehe auch Teilstrahlungspyrometer) | 6.152, 6.22 | Vergleichsstelle (bei Thermolementen) | 3.16 |
| Isolierung von Thermopaaren | 3.152, 4.314 | Verwendungsbereich (der Thermometer) | 1.11, 2.11, 2.212, 3.121, 3.221 |
| Kesseltemperatur siehe Staupunkttemperatur | | Wärmeableitung | 4.43, 4.451, 4.461 |
| Kompensationschaltungen | 3.191, 3.231 | Wärmeabstrahlung | 4.451, 4.462 |
| Kreuzpulschaltung | 3.232 | Wärmedurchgangszahl | 1.46 |
| Laboratoriumsthermometer | 2.111 | Wärmeleitfähigkeit | 1.45, 1.46, 4.4325 |
| Leitungswiderstand, elektrischer | 3.17 | Wärmeübergangszahl (Wärmeübergang) | 1.44, 1.45, 1.46, 1.47 |
| Leuchtdichte | 6.11 | Widerstandsthermometer | 3.2 |
| Leuchtdichtepyrometer | 6.151, 6.21, 6.51 | Wolfbrandlampe | 6.512 |
| (siehe auch Teilstrahlungspyrometer) | | Zeitkonstante | 1.42 |
| Leuchtdichteverhältnis | 6.321 | | |
| Lindek-Rothe-Schaltung | 3.191 | | |
| Lufttemperatur (Raumlüfttemperatur), Messung der | 4.467 | | |

Hinweise:

Diese Empfehlung ist entstanden durch Überarbeitung von DIN 1953 Ausg. 7.53.

Im wesentlichen wurden gegenüber DIN folgende Änderungen vorgenommen:

1 Änderungen, die sich auf mehr als einen Abschnitt des DIN-Blattes beziehen:

1.1 Änderungen von Einheiten auf Grund der Verordnung über die physikalisch-technischen Einheiten vom 14. August 1958.

1.11 Änderung der Schreibweise der Kurzzeichen °C und °K.

1.12 Ersetzung der Kurzzeichen „°C“ bzw. „°“ durch das Kurzzeichen grd bei allen Temperaturangaben, die eine Temperaturdifferenz darstellen.

1.13 Ersetzung der Druckeinheiten „mm Hg“ durch „Torr“ und „kg/cm²“ durch „at“.

1.14 Ersetzung der Längeneinheit μ durch μm .

1.15 Ersetzung des Wertes „Wichte“ durch „Dichte“

1.2 Der Begriff „Wahre Temperatur“ wurde nur im Abschnitt 6 beibehalten.

1.3 Der Begriff „Strahlungsvermögen“ wurde ab Ziffer 6.14 durch „Emissionsvermögen“ ersetzt.

2 Änderungen einzelner Abschnitte:

2.1 Seite 2, Bild 1: Die Verwendungsbereiche der Thermolemente NiCr/Ni und PtRh/Pt und die der Teilstrahlungs- sowie Farbpyrometer wurden geändert.

2.2 Seite 2, Tafel 1: In Spalte 5, 1. bis 3. Zeile, wurde „nein“ durch „muß sichtbar sein“ ersetzt.

2.3 Seite 3, Tafel 2: Die Tafelwerte wurden in Übereinstimmung mit der gesetzlichen Temperaturskala gebracht.

2.4 Seite 3, Ziffer 1.22: Die Beziehungen zur Fahrenheit-Skala als einer gesetzlich nicht zugelassenen Skala wurden unterdrückt, der 2. Absatz wurde neu formuliert.

2.5 Seite 5, Tafel 3: Es wurden der Verwendungsbereich der Quecksilberthermometer und der mittlere Beiwert für die Bestimmung der Fadenfehler korrigiert.

2.6 Seite 7, Tafel 4: Die Temperaturbereiche wurden geändert.

2.7 Seite 7, Abschnitt 2.2, und Seite 8, Abschnitt 2.3: Die Begriffe Anzeigegerät, Schreibgerät und Schaft wurden durch die in DIN 16 160 Blatt 4 (E) festgesetzten Begriffe ersetzt.

2.8 Seite 15, Tafel 5: Kupfer-Widerstandsthermometer wurden nicht übernommen, da nicht standardisiert.

2.9 Seite 33, Ziffer 6.26, 5. Zeile von oben: Der Nebensatz: „falls nicht am Schwarzen Körper . . . oder Bandlampe“ wurde gestrichen.

3. Zeile von unten: Der Nebensatz: „falls am Schwarzen Körper geeicht . . . der Leuchtdichte“ wurde gestrichen.

2.10 Seite 36, Ziffer 6.42, 4. Zeile von oben: Es wurde gestrichen: „den Eichfehler und . . . vorgenommen wurde“.

2.11 Seite 38, Ziffer 8.11: Es wurden, soweit bekannt, die neuesten Auflagen angegeben.

2.12 Seite 39, Ziffer 8.121: Es wurden nur die noch geltenden Grundlagen übernommen.

2.13 Seite 42, Ziffer 8.9: Inzwischen erschienene DIN-Normen, DIN- und TGL-Entwürfe wurden berücksichtigt.