

WIDERSTANDS- THERMOMETER IN DER INDUSTRIELLEN PRAXIS

Beratung. Lösung. Vorsprung.

DIPL.-ING. REINHARD KLEMM
RÖSSEL-MESSTECHNIK GMBH

IMPRESSUM (VISDP):

Herausgeber:

RÖSSEL-Messtechnik GmbH

Lohstraße 2

D – 59368 Werne

Tel.: +49/(0)2389/409-0

Fax: +49/(0)2389/409-80

E-Mail: info@roessel-messtechnik.de

Vervielfältigung und Weitergabe, auch auszugsweise, ist ohne ausdrückliche Genehmigung des Herausgebers untersagt. Die Tabellen sind auf der Basis der genormten Polynome berechnet. Für Druck- und Rechenfehler wird keine Haftung übernommen. Im Zweifelsfall gilt grundsätzlich die zitierte Norm. Bei undatierten Normverweisen ist der Stand zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Druckschrift maßgebend.

Stand: 01/2024

INHALT

1 Widerstandsthermometer	4
1.1 Platin-Widerstandsthermometer	4
1.2 Aufbau	4
1.3 Bauformen	5
1.4 Anschluss	5
1.5 Heißleiter	6
2. Weitere Betrachtungen	6
3. DIN EN 60 751 (IEC 60 751)	7
4. Messschaltungen	8
5. Messwiderstände	9
5.1 Drahtgewickelte Widerstände	9
5.2 Metallschichtwiderstände	10
6. Bauformen der Widerstandsthermometer	11
6.1 Anschlussbelegung und Farbkennzeichnung	12
7. Thermometer-Schutzrohre	13
7.1 Allgemeine Hinweise	14
7.2 Auswahl von Schutzrohrwerkstoffen	14
8. Wärmeleitfähigkeit von Stoffen	15
9. Zeitverhalten von Berührungsthermometern	15
9.1 Korrekturfaktoren der Wärmeübertragungskoeffizienten	17
9.2 Richtwerte der Ansprechzeit von Berührungsthermometern	17
10. Einbaulängen und Wärmeableitfehler	18
11. Definition der Temperatur	19
11.1 Temperatur - Was ist das eigentlich?	19
11.2 Temperaturempfinden und Wärmeübertragung	19
12. Thermodynamik	21
12.1 Geschichte	21
12.2 Hauptsätze der Thermodynamik	21
13. Temperaturskalen und ihre Einheiten	22
14. Messung anhand der Temperaturstrahlung	23
15. Temperaturmessung mit Berührungsthermometern	23
15.1 Messung durch thermischen Kontakt	24
16. Temperatur-Widerstands-Tabelle	25
17. Schlussbemerkung	27
18. Literaturverzeichnis	27

WIDERSTANDSTHERMOMETER IN DER INDUSTRIELLEN PRAXIS

1. WIDERSTANDSTHERMOMETER

Widerstandsthermometer sind rein passive elektrische Bauelemente, welche die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von metallischen Leitern zur Messung der Temperatur ausnutzen.

Reine Metalle zeigen im Allgemeinen stärkere Widerstandsänderungen als Legierungen und haben einen relativ konstanten Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes über einen weiten Temperaturbereich. Für präzise Messungen verwendet man hochreine Edelmetalle, meist Platin, da diese besonders wenig Alterung zeigen und die Thermometer daraus mit geringen Fehlergrenzen zu fertigen sind. Der Widerstand kann auch aus Keramik (gesinterte Metalloxide) oder Halbleitern bestehen, womit sich sehr viel höhere Temperaturkoeffizienten als mit Metallen und damit auch viel höhere Empfindlichkeiten erzielen lassen, aber mit geringerer Präzision und erheblicher Temperaturabhängigkeit des Temperaturkoeffizienten selber. Man bezeichnet diese Widerstände als Thermistoren, wobei Heißleiter (Widerstände mit Negativem Temperatur-Koeffizienten NTC) in der Messtechnik eher weniger verwendet werden als Kaltleiter (Widerstände mit positivem Temperatur-Koeffizienten PTC).

Herkömmliche Thermometer messen die Temperatur anhand der Längen- oder Volumenänderung eines Stoffes und sind nur als anzeigende Messgeräte geeignet. Der Vorteil der Widerstandsthermometer liegt darin, dass sie ein elektrisches Signal liefern und sich zum Einsatz in der industriellen Messtechnik eignen, wo sie insbesondere als Platin-Widerstandsthermometer weit verbreitet sind.

Der Nennwert eines solchen Widerstandsthermometers beträgt in der industriellen Anwendung überwiegend 100 Ohm bei 0 °C.

1.1 Platin-Widerstandsthermometer

Pt100-Sensoren sind Temperaturfühler, die auf der Widerstandsänderung von Platin unter Temperatureinfluss basieren. Es handelt sich um Widerstandsthermometer, und zwar um Kaltleiter (PTC – Positive Temperature Coefficient). Zur Temperaturmessung im Bereich von -200 °C bis 850 °C wird häufig die elektrische Widerstandsänderung eines Platindrahtes oder einer Platinschicht genutzt. Die Platin-Temperatur Sensoren werden durch ihren Nennwiderstand R_0 bei einer Temperatur von 0 °C charakterisiert.

Gebräuchliche Typen sind:

- Pt100 ($R_0 = 100 \text{ Ohm}$)
- Pt200 ($R_0 = 200 \text{ Ohm}$)
- Pt500 ($R_0 = 500 \text{ Ohm}$)
- Pt1000 ($R_0 = 1 \text{ kOhm}$)
- Die neue Pt-Generation besteht aus dem Pt 3000, Pt 6000 und Pt 9000.

Die Widerstandsänderung in Bezug auf die Temperatur ist in der DIN EN 60 751: 2009 festgelegt. Der große Vorteil der Standardisierung des Nennwiderstands und der Widerstandsänderung ist die leichte Austauschbarkeit der Temperaturfühler, ohne dass anschließend eine Neukalibrierung der Messkette notwendig wird. Als Widerstandsthermometer ist das Pt100 in den unteren Temperaturbereichen genauer als z. B. Thermoelemente.

1.2 Aufbau

Platin-Temperatur Sensoren lassen sich in zwei Untergruppen aufteilen:

Platindraht-Sensoren

Das temperaturempfindliche Element wird von einem Platindraht gebildet. Der sehr dünne und lange Draht wird mehrfach wendelförmig gewickelt, um Platz zu sparen. Der Abgleich des Nennwiderstandes erfolgt durch Kürzen des Platindrahts. Je nach Qualität des Sensors wird der gewendelte Draht freitragend, auf einem Glasstab gewickelt (Glasmesswiderstand), oder eingebettet in eine Keramikmasse in einem Keramikkapillar (Keramikmesswiderstand) als Gehäuse untergebracht. Der Platindraht muss dabei möglichst frei von mechanischen Spannungen gehalten werden, da diese das Messergebnis verfälschen würden. Die Enden des Platindrahtes werden mit den aus dem Gehäuse ragenden Anschlussdrähten verschweißt. Die Enden des Röhrchens werden durch Einschmelzen (bei Glasgehäusen) oder durch Verguss mit Keramikmasse (bei Keramikgehäusen) hermetisch verschlossen, um den Platindraht vor chemischen Einflüssen zu schützen.

Vorteil von Platindraht-Sensoren ist ihre hohe Genauigkeit und Langzeitstabilität, nachteilig ist der relativ hohe Aufwand für Fertigung und Abgleich.

Dünnschicht-Sensoren

Das Platin wird im Dünnschichtverfahren durch Sputtern mäanderförmig auf einen Keramikträger aufgebracht. Nach dem Bonden der Anschlussdrähte und dem Abgleich des Nennwiderstandes durch Lasertrimmen wird die Platinschicht mit einem Glasüberzug versehen, um sie vor chemischen Einflüssen zu schützen. Der so hergestellte Dünnschicht-Sensor kann zusätzlich in ein Glas- oder Keramikröhrchen eingebaut und hermetisch verschlossen werden, um seine mechanische und chemische Beständigkeit weiter zu erhöhen.

Vorteil von Dünnschicht-Sensoren ist ihr rationelles Herstellungs- und Abgleichverfahren, nachteilig sind der gegenüber den Platindraht-Sensoren geringerer Temperaturbereich und geringere Langzeitstabilität.

1.3 Bauformen

Pt100-Widerstandsthermometer gibt es in verschiedenen Bauformen. Der einfachste Fall ist der Sensor ohne weitere Umhüllung. Für den Einsatz bei geringer chemischer und mechanischer Beanspruchung, zum Beispiel zur Temperaturmessung innerhalb von Geräten, ist kein weiterer Schutz vor Umwelteinflüssen nötig. Der elektrische Anschluss kann beispielsweise durch Einlöten in eine Platine oder durch Oberflächenmontage (SMD) erfolgen.

Im industriellen Einsatz hingegen sind der Schutz des Sensors und seine einfache Montierbarkeit entscheidend. Beides wird durch den Einbau des Sensors in standardisierte Gehäuse erreicht. Durch Einbau des Pt100-Sensors in feste oder biegsame Rohre aus korrosionsbeständigem Stahl entsteht zum Beispiel ein sogenannter Mantelfühler, der häufig noch zusätzlich durch eine Tauchhülse vom zu messenden Medium getrennt wird. Weitere Ausführungen sind Sensoren zum Messen von Gastemperaturen oder zum Einstechen in das zu messende Objekt. Der elektrische Anschluss dieser Sensoren wird durch fest montierte Leitungen oder Steckverbinder hergestellt.

1.4 Anschluss

Die elektrische Verbindung vom Pt100-Sensor zur auswertenden Elektronik kann im Zweileiter-, Dreileiter- oder Vierleiterverfahren erfolgen. Beim Dreileiter- und Vierleiterverfahren soll der Fehler durch den Eigenwiderstand der Sensor-Anschlussdrähte eliminiert werden. Hierzu wird beim Dreileiterverfahren ein Ende mit zwei Anschlussdrähten ausgerüstet, beim Vierleiterverfahren werden beide Enden mit zwei Anschlussdrähten ausgerüstet. Weitere Informationen sind im Abschnitt Messschaltungen zu finden.

Material für Messwiderstände: Platin

Für die in der industriellen Messtechnik weit verbreiteten Platin-Messwiderstände gibt es die DIN EN 60 751, in der für die Funktion $R_t = R(t)$ hinter dem linearen Glied weitere Summanden angegeben werden.

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

■ für den Bereich $t = 0 \dots 850 \text{ }^\circ\text{C}$,

$$R(t) = R_0 (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C (t - 100^\circ\text{C}) t^3)$$

■ für den Bereich $t = -200 \dots 0 \text{ }^\circ\text{C}$

Zahlenwert der Koeffizienten:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}; B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}; \\ C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$$

Als Nennwert wird $R_0 = R(0)$ angegeben, also der Widerstand bei $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Bevorzugt werden die Nennwerte $100 \text{ } \Omega$ und $1000 \text{ } \Omega$. Dann heißen diese Sensoren Pt100 bzw. Pt1000. Die Spanne der Möglichkeiten reicht etwa von Pt10 bis Pt10.000. Die in der Tabelle im Anhang enthaltenen Werte für einen Pt 100/0 sind mit diesen Gleichungen berechnet.

Normalerweise wird R_t gemessen und die Temperatur t gesucht. Die Auflösung („Umkehrung“) dieser Formeln nebst der dazugehörigen Linearisierung ist nicht einfach. Für die Berechnung von Tabellen wird daher meist ein Iterationsverfahren angewendet.

Kenngrößen und Fehlergrenzen

Thermometer Pt100 werden in ihren Fehlergrenzen klassifiziert. Unterschieden wird nach drahtgewickelten Widerständen und Schichtwiderständen:

- Klasse AA:

$$\text{Fehlergrenze} = 0,1 \text{ }^\circ\text{C} + 0,0017 |t| \\ (-50 \text{ bis } 250 \text{ }^\circ\text{C} - \text{drahtgewickelt}), \\ (0 \text{ bis } 150 \text{ }^\circ\text{C} - \text{Schichtwiderstand})$$

- Klasse A:

$$\text{Fehlergrenze} = 0,15 \text{ }^\circ\text{C} + 0,002 |t| \\ (-100 \text{ bis } 450 \text{ }^\circ\text{C} - \text{drahtgewickelt}), \\ (-30 \text{ bis } 300 \text{ }^\circ\text{C} - \text{Schichtwiderstand})$$

- Klasse B:

$$\text{Fehlergrenze} = 0,3 \text{ }^\circ\text{C} + 0,005 |t| \\ (-196 \text{ bis } 600 \text{ }^\circ\text{C} - \text{drahtgewickelt}), \\ (-50 \text{ bis } 500 \text{ }^\circ\text{C} - \text{Schichtwiderstand})$$

Beispiel:

Klasse B: Bei 500 °C sind Abweichungen des Messwertes zulässig bis ± 2,8 °C.

Der Temperaturkoeffizient des Widerstandes wird in der Norm zur Bezugstemperatur 0 °C festgelegt:

$$a_0 = (DR / R_0) * Dt^{-1}$$

Der charakterisierende Wert wird aus dem mittleren Temperaturkoeffizienten über die Spanne 0 ... 100 °C berechnet zu $a_0 = 3,851 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Nickel

Nickel besitzt im Vergleich zu Platin eine höhere Empfindlichkeit, es liefert bei gleicher Temperaturänderung eine größere relative Widerstandsänderung. Allerdings ist dieses Material aus der Normung herausgenommen worden. Für Ni100 galt im Bereich von -60 °C bis +180 °C die Gleichung:

$$R_t = R(t) = R_0 + At + Bt^2 + Ct^4$$

mit t = Temperatur in °C;
 Ro = Widerstandsgrundwert bei 0°C;
 A = 0,5485 Ω / °C; B = 0,665·10⁻³ Ω °C⁻²;
 C = 2,805·10⁻⁹ Ω °C⁻⁴

Gängige Werte für Ro: 100 Ohm; 500 Ohm; 1000 Ohm

Die DIN 43 760 unterscheidet zwei Toleranzbereiche (entsprechend Temperaturbereich):

- | -60 °C bis 0 °C -> tabw = +/- (0,4 + 0,028 * t)
- | 0 °C bis 250 °C -> tabw = +/- (0,4 + 0,007 * t)

wobei (t) die Ausgangstemperatur und tabw die Abweichung ist. Nachteilig zum Platin-Messwiderstand ist der geringere Temperaturbereich (-60 °C ... +250 °C) und die größere Toleranz, speziell im Bereich unterhalb von 0 °C.

1.5 Heißleiter

Heißleiter weisen einen stark nichtlinearen Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur auf. Zur mathematischen Beschreibung des Verhaltens eignet sich eine Funktion der absoluten Temperatur T in der Form

$$RT = R(T) = A * e^{B/T} = R_{T0} * e^{B(1/T - 1/T_0)}$$

Dabei ist T₀ eine beliebige Bezugstemperatur, z. B. 293 K (20 °C). Die Größe B ist eine Material-Konstante; Richtwert B = 2000 ... 6000 K.

Die relativen Fehlergrenzen von R_{T0} liegen typisch bei 20 %, von B bei 5 %. Der Temperaturkoeffizient wird hierzu etwas anders definiert. Er ergibt sich im Grenzfall differentiell kleiner Temperaturänderungen zu

$$a_T = 1/R_T * DR/DT --> -B/T^2$$

Dies verdeutlicht einen mit steigender Temperatur stark abfallenden, aber bei Zimmertemperatur hohen Messeffekt. Beispiel: B = 3600 K; T = 300 K; a_T = -0,04 * 1/K. Das ist gegenüber dem a₀ (0,0003851 * 1/K) von Platin dem Betrage nach rund das Zehnfache. Durch Zusammenschaltung mit ohmschen Widerständen lassen sich die Probleme der Exemplarstreuungen und der Nichtlinearität vermindern, wodurch allerdings auch die Empfindlichkeit der Messanordnung vermindert wird.

2. WEITERE BETRACHTUNGEN

Auch wenn es auf den ersten Blick nicht so aussieht, das Thema Temperatur ist außerordentlich vielschichtig. Gerade der Bereich Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern ist ohne die Theorie der Thermodynamik physikalisch nur schwer verständlich.

Nicht jeder, der mit Widerstandsthermometern Temperaturen messen möchte, muss die vier Hauptsätze der Thermodynamik kennen. Aber vielleicht ist doch der eine oder andere Praktiker an ein wenig Hintergrundinformation interessiert. Ab Seite 19 dieser Druckschrift wird dem in hoffentlich verständlicher Form Rechnung getragen.

3. DIN EN 60 751 (IEC 60 751)

Die im Januar 2009 international in Kraft gesetzte IEC 60 751:2008 mit der deutschen Übersetzung DIN EN 60 751:2009 macht erstmals Unterschiede zwischen drahtgewickelten und Schicht-Messwiderständen sowie zwischen den „nackten“ Messwiderständen und einbau- bzw. gebrauchsfertigen Thermometern. Hintergrund der Unterscheidung nach drahtgewickelten und Schicht-Messwiderständen ist, dass auf Grund der unterschiedlichen Fertigungstechnologien die Schichtmesswiderstände nicht genau der Callendar-vanDuesen-Gleichung, die den Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand eines drahtgewickelten Platin-Messwiderstandes beschreibt, folgt. Je nach Klassengenauigkeit (siehe Tabelle) ist der Temperaturbereich unterschiedlich. Neben Widerstandsthermometern mit 100 Ohm Grundwiderstand bei 0 °C sind auch solche mit 500, 1000, 5000 und 10000 Ohm verfügbar.

4. MESSSCHALTUNGEN

Grenzabweichungen für Widerstände DIN EN 60 751:2009

Drahtgewickelte Widerstände		Flachsicht-Widerstände		
Toleranzklasse	Gültiger Temperaturbereich in °C	Toleranzklasse	Gültiger Temperaturbereich in °C	Toleranzwert in °C
W 0,1	-100 bis 350	F 0,1	0 bis 150	$\pm (0,1+0,0017 \cdot t)$
W 0,15	-100 bis 450	F 0,15	-30 bis 300	$\pm (0,15+0,002 \cdot t)$
W 0,3	-196 bis 550	F 0,3	-50 bis 500	$\pm (0,3+0,005 \cdot t)$
W 0,6	-196 bis 660	F 0,6	-50 bis 600	$\pm (0,6+0,01 \cdot t)$

|t| = Absolutwert der Temperatur in °C unabhängig vom Vorzeichen

Tabelle 1 Grenzabweichungen für Messwiderstände

Grenzabweichungen für Thermometer DIN EN 60 751:2009

Toleranzklasse	Gültiger Temperaturbereich in °C		Toleranzwert in °C
	Drahtgewickelte Widerstände	Flachsicht-Widerstände	
AA	-50 bis 250	0 bis 150	$\pm (0,1+0,0017 \cdot t)$
A	-100 bis 450	-30 bis 300	$\pm (0,15+0,002 \cdot t)$
B	-196 bis 600	-50 bis 500	$\pm (0,3+0,005 \cdot t)$
C	-196 bis 600	-50 bis 600	$\pm (0,6+0,01 \cdot t)$

|t| = Absolutwert der Temperatur in °C unabhängig vom Vorzeichen

Tabelle 2 Grenzabweichungen für Thermometer

Graphische Darstellung der Grenzabweichungen

Die Grenzabweichung ist achsensymmetrisch zur horizontalen Null-Linie. Dargestellt ist nur der positive Teil.

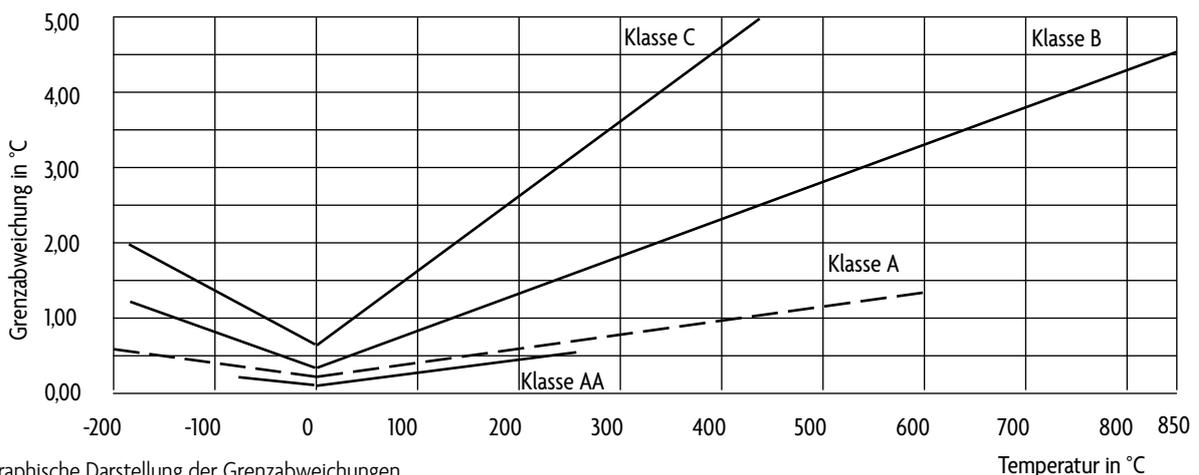


Abb. 1 Graphische Darstellung der Grenzabweichungen

Zur Widerstandsmessung muss der Widerstand von einem konstanten Strom durchflossen werden. Die anliegende Spannung ist ein leicht messbares, dem Widerstand proportionales Signal. Häufig misst man allerdings nicht diese Spannung, sondern nur ihre Änderung gegenüber einem Anfangswert mittels einer differenzbildenden Schaltung (z.B. Wheatstone-Brücke). Um den Fehler durch Eigenerwärmung gering zu halten, muss der Messstrom möglichst gering sein, beim Pt100 typisch 1 Milliampere oder weniger.

In industriellen Anlagen sind häufig größere Entfernungen zwischen Sensor und Messumformer zu überbrücken mit entsprechend langen Zuleitungen. Um die Einflüsse der Zuleitungswiderstände auf den Messwert zu vermeiden, werden Platin-Widerstandssensoren auch in Drei- oder Vier-Leiter-Schaltung gefertigt. Dadurch wird eine getrennte Zuführung des Messstromes möglich bzw. der Zuleitungsfehler kann kompensiert werden. Im Außenbereich ist die Installation mit 3 oder 4 Leitern unbedingt anzuraten. Brücken-Schaltung: Für die fast abgegliche Wheatstone-Brücke (mit kleiner Verstimmung) gilt im Prinzip:

$$U \sim DR = R_t - R_l$$

Zweileiterschaltung:

$$U \sim R_t + 2 \cdot R_{Ltg} + R_{Abgl} - R_l$$

$$U \sim R_t + 2 \cdot R_{Ltg} - konst$$

Ein ΔR_{Ltg} ist nicht unterscheidbar von einem ΔR .

Die gültige Norm lässt daher die Zwei-Leiter-Schaltung nur für Widerstandsthermometer der Klassen B und C zu. Für die Klassen AA und A ist Drei- oder Vier-Leiter-Schaltung vorgeschrieben.

Da Kupfer-Leitungen etwa denselben Temperaturkoeffizienten haben wie ein Pt100, macht sich bei z.B. 10 Ohm Schleifenwiderstand überschlägig jede Temperatur-Änderung der Leitung mit bis zu 10 % wie eine Temperatur-Änderung der Messstelle bemerkbar; dabei sind in Freileitungen Schwankungen um 50 ... 70 °C realistisch.

Dreileiter-Schaltung:

$$U \sim (R_t + R_{Ltg3}) - (R_l + R_{Ltg2})$$

$$U \sim (R_t - R_l)$$

Bei gleichen Leitungen fällt R_{Ltg} heraus. (Ein Abgleichwiderstand ist dann überflüssig.) R_{Ltg1} wirkt wie ein Quellenwiderstand der Speisung und macht sich praktisch nicht bemerkbar.

Vierleiter-Schaltung:

Mit einer elektronisch stabilisierten Konstantstromquelle ist I unabhängig von R_t und von R_{Ltg} in den Speiseleitungen. Wenn man einen elektronischen Spannungsmesser mit hohem Eingangswiderstand verwendet, wird $I_U \ll I$ (keine merkliche Stromverzweigung) und $I_U \cdot R_{Ltg} \ll I \cdot R_t$ (kein merklicher Spannungsverlust in den Messleitungen), so dass $U = I \cdot R_t$ wird, also $U \sim R_t$.

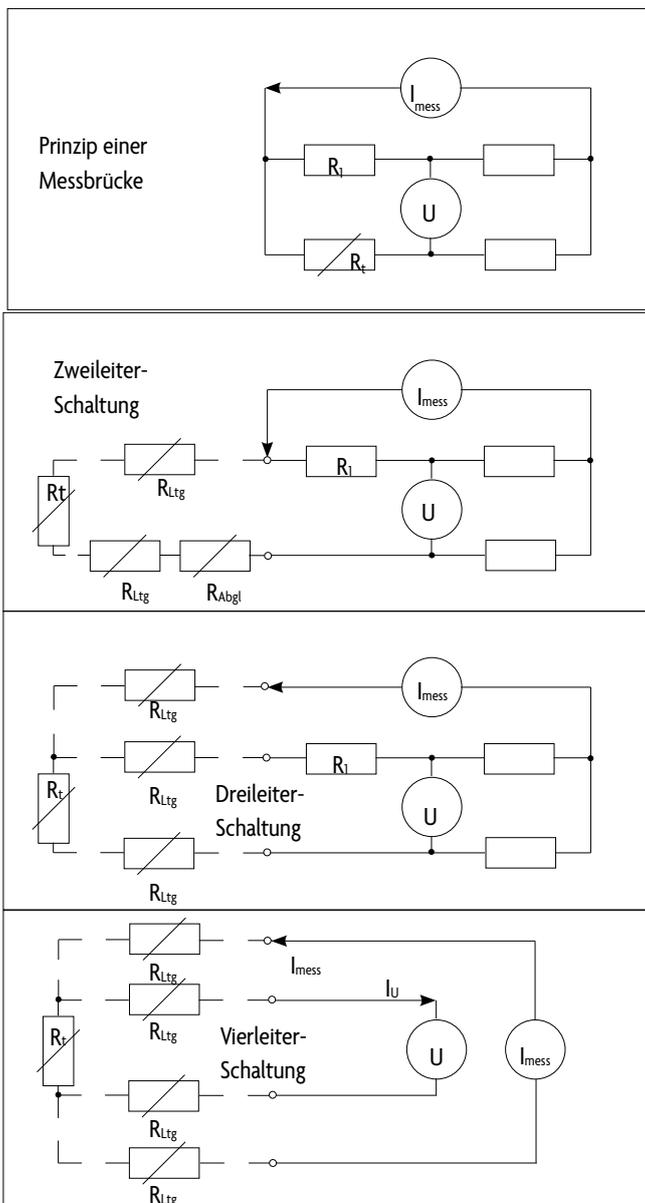


Abb. 2 Messschaltungen

5. MESSWIDERSTÄNDE

Alle Metalle haben eine hohe und mit steigender Temperatur jedoch abnehmende Leitfähigkeit. Die Leitfähigkeit beruht auf der Beweglichkeit der Leitungselektronen. Die Schwingungsamplitude der Gitteratome nimmt mit steigender Temperatur zu (siehe Thermodynamische Definition der Temperatur). Die Kollision der Leitungselektronen mit den Atomhüllen und damit die Ablenkung nimmt im statistischen Mittel zu, was zu einer temperaturabhängigen Zunahme des elektrischen Widerstandes führt.

Die spezifische temperaturabhängige Zunahme des elektrischen Widerstandes nennt man Temperaturkoeffizient. Er ist eine Materialkenngröße. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstandswert ist nicht linear. Er wird mathematisch durch ein Polynom höherer Ordnung beschrieben.

Es werden zwei Gruppen von Widerstands-Temperatur Sensoren bezüglich der Steigung ihrer Kennlinien unterschieden: NTC- und PTC-Fühler.

NTC-Fühler sind Materialien mit negativem Temperaturkoeffizienten, auch Heißleiter genannt. Hier werden vorzugsweise Keramikwerkstoffe verwendet.

PTC-Fühler sind Materialien mit positivem Temperaturkoeffizienten, auch Kaltleiter genannt. Die überwiegende Mehrzahl aller metallischen Leiter gehört dazu.

An die Materialien zur Herstellung von Temperaturfühlern müssen verschiedene Anforderungen gestellt werden, um sichere und reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten:

- | Großer Temperaturkoeffizient
- | Möglichst einfache Übertragungsfunktion
- | Geringe Abhängigkeit von Umwelteinflüssen
- | Großer Messbereich bzw. Temperaturbereich
- | Austauschbarkeit, speziell eine geringe Exemplarstreuung innerhalb von Normen
- | Hohe Langzeitstabilität
- | Gute Verarbeitbarkeit
- | Günstiger Preis

In der industriellen Temperaturmesstechnik hat sich daher Platin als Material für Widerstandsthermometer weitestgehend durchgesetzt. Andere reine Metalle wie Nickel und Kupfer haben als Material für industrielle Messwiderstände nur noch eine geringe Bedeutung.

5.1 Drahtgewickelte Messwiderstände

Jede Einsatzbedingung stellt unterschiedliche Anforderungen an die Konfektionierung der Messwiderstände. Drahtgewickelte oder Metallschicht-Messwiderstände sind je nach Applikation mehr oder weniger gut geeignet. Es gibt durchaus überschneidende Bereiche, wobei die Grenzen fließend sind.

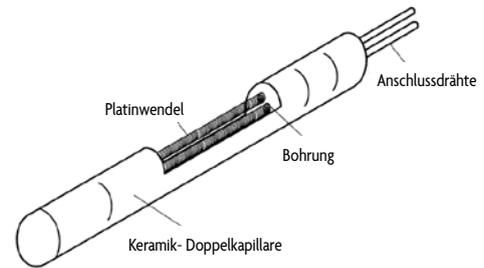


Abb. 3: Darstellung eines drahtgewickelten Messwiderstandes

Bei Metalldrahtwiderständen wird ein Platindraht mit 10 ... 50 µm Durchmesser als Drahtwendel in die Längsbohrungen einer Keramik-Kapillare eingezogen. Die Kapillare wird mit einer Glasurfritte gefüllt, die Enden damit verschlossen. Nach Sintern der Fritte ist der Draht fixiert. Trotzdem ist der Sensor empfindlich gegen Vibrationen. Er muss gemäß DIN EN 60 751 allerdings nur im Bereich 5 bis 500 Hz eine Beschleunigung von 20 bis 30 m/s² auf Dauer aushalten. Drahtgewickelte Widerstände sind nur begrenzt beständig gegen Temperaturschocks.

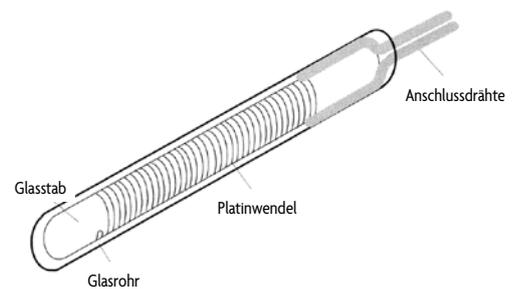


Abb. 4: Darstellung eines Glasmesswiderstandes

Glasmesswiderstände sind i.A. gewickelte Drahtwiderstände. Sie sind weitgehend immun gegen Vibrationen und vor allem im Tieftemperaturbereich beständig gegen Temperaturschocks. Nachteilig ist eine nicht zu vernachlässigende Hysterese sowie der begrenzte Einsatztemperaturbereich.

5.2 Metallschichtwiderstände

Bei Metallschichtwiderständen wird an Stelle der Drähte eine dünne Platinschicht als temperaturempfindliches Element auf einen Keramikträger aufgebracht.

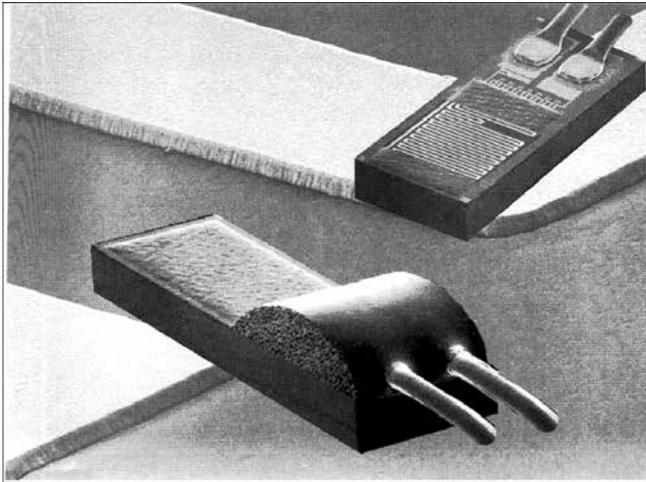


Abb. 5 Flachsichtwiderstände

Man unterscheidet je nach Herstellverfahren zwischen Dickschicht- und Dünnschichtwiderständen. Der Unterschied ist die Schichtdicke: 10 ... 15 μm (Dickschicht) bzw. 1 ... 2 μm (Dünnschicht). Die Leiterbahnweite liegt zwischen 7 und 30 μm .

Die Metallschichtwiderstände aus moderner Produktion reichen fast an den Temperaturbereich der Metalldrahtwiderstände heran. Allerdings ist das Driftverhalten bei Temperaturen über 500 $^{\circ}\text{C}$ und die Hysterese deutlich schlechter.

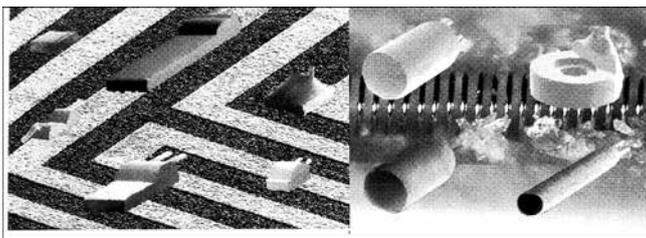


Abb. 6 Verschiedene Bauformen von Flachsichtwiderständen

Die Stärken der Metallschichtwiderstände sind neben dem Preis vor allem:

- Kurze Ansprechzeit
- Hohe Vibrationsbeständigkeit
- Beständigkeit gegen Temperaturschocks
- Kleinere temperaturempfindliche Länge

Als Alternative zu den Metalldrahtwiderständen werden zunehmend Metallschichtwiderstände in runde Keramikröhrchen einzementiert (man spricht dann auch von „gepotteter“).

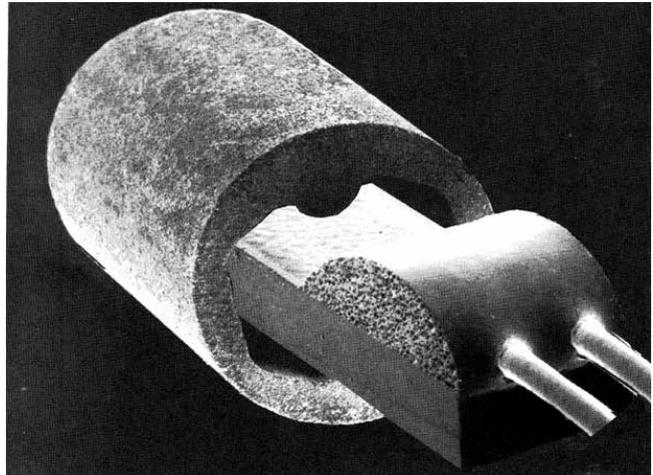


Abb. 7 „Gepotteter“ Flachsichtwiderstand

Dieses zusätzliche Keramikröhrchen schützt die empfindliche Oberfläche des Metallschichtwiderstandes. Das Driftverhalten auf Grund von Kontamination wird entscheidend verbessert.

Die vormaligen Stärken der Metallschichtwiderstände, der Preis und vor allem die schnellere Ansprechzeit bleiben dabei allerdings auf der Strecke. Auch die Eigenerwärmung auf Grund des Messstromes nimmt deutlich zu.

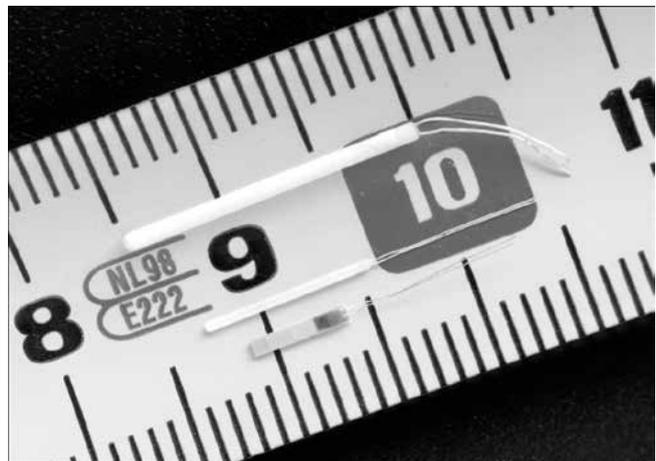


Abb. 8 Größenvergleich

6. BAUFORMEN DER WIDERSTANDSTHERMOMETER

Mantelwiderstandsthermometer sind mit der Bauform der weit verbreiteten Mantelthermoelemente eng verwandt.

Sie finden Anwendung in den Bereichen zwischen -196 °C bis $+600\text{ °C}$ und vereinen in sich die Vorteile der Widerstandsthermometer mit denen der biegbaren Thermoelemente. Als Zuleitung werden mineralisierte Mantelkabel verwendet. Die Zuleitungsdrähte sind in einer Kompaktisolation aus MgO eingebettet und mit einem Metallmantel aus nichtrostendem Stahl (Werkstoff-Nr.: 1.4541) umgeben. Die Kompaktisolation fixiert die Drähte vollständig, so dass weder durch Erschütterung noch durch starke Biegebeanspruchung eine Beschädigung eintreten kann.

Auch Kurzschlüsse zwischen den Leitern oder zwischen Leiter und Mantel sind ausgeschlossen. Der minimale Biegeradius ist abhängig vom Durchmesser der Mantelleitung. Als Richtwert gilt der 5- bis 7-fache Manteldurchmesser.

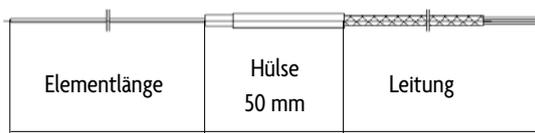
Die temperaturempfindliche Länge beträgt je nach verwendetem Messwiderstand 5 bis 30 mm. Sie kann auf Wunsch länger oder auch kürzer ausgelegt werden. Als Messwiderstände werden normalerweise Flachsichtwiderstände eingebaut. Die Verwendung von drahtgewickelten oder Glasmesswiderständen ist problemlos möglich.

Mantelwiderstandsthermometer



Grundausführung eines Mantel-Widerstandsthermometers. Die Länge der freien Anschlussenden kann in weiten Grenzen bestimmt werden. Der Mantel ist feuchtigkeitsdicht vergossen. T_{max} für den Verguss: 150 °C . In der Standardausführung ist der Manteldurchmesser durchgehend gleich. Abgesetzte und auch verstärkte Versionen sind möglich.

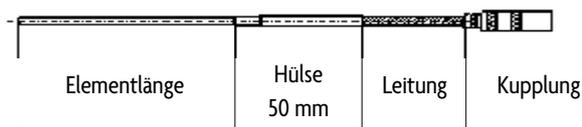
Fest angeschlossene Leitung



Bei dieser Ausführung ist die Kupferlitzenleitung fest angeschlossen. Die Übergangshülse hat je nach Leitungstyp einen Durchmesser von 6 oder 8 mm. Die Standardlänge der Hülse beträgt einheitlich 50 mm. T_{max} an der Hülse: 150 °C . Der Leitungstyp (Aderquerschnitt, Isolationsaufbau, Abschirmung) ist in weiten Grenzen variierbar.

Als Standard wird eine einzeln und gemeinsam TEFLON- isolierte Leitung mit $0,38\text{ mm}^2$ Querschnitt verwendet. Die freien Aderenden sind verzinkt.

Fest angeschlossene Leitung und Rundkupplung



Die vorgenannte Bauform ist um ein Steckersystem erweitert. Die Standardausführung ist mit einer Rundkupplung versehen. Die Präzisionskontakte aus Messing sind galvanisch vergoldet. Der Außenkörper aus Messing ist matt verchromt.

T_{max} an der Kupplung und der Hülse: 150 °C . Stecker und Kupplung werden beim Zusammenfügen automatisch verriegelt und bieten so eine optimale Kontaktsicherheit. Andere Steckersysteme sind ebenfalls möglich.

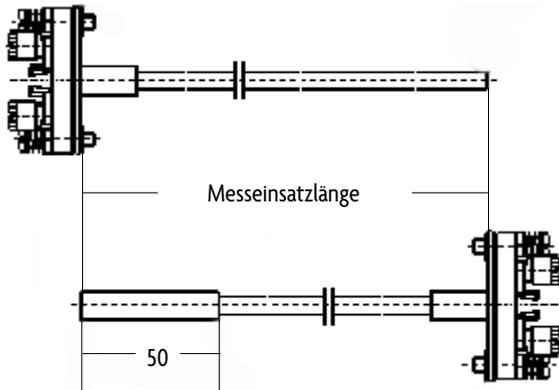
Fest angeschlossene Kupplung



Bei dieser Bauform ist die Rundkupplung direkt mit dem Mantelwiderstandsthermometer verbunden. Die Standardausführung ist mit einer Rundkupplung versehen. Die Präzisionskontakte aus Messing sind galvanisch vergoldet. Der Außenkörper aus Messing ist matt verchromt. T_{max} an der Kupplung: 150 °C .

Anschlussbelegung der Messeinsätze

Mantelmesseinsatz, Durchmesser durchgehend oder Messspitze verstärkt

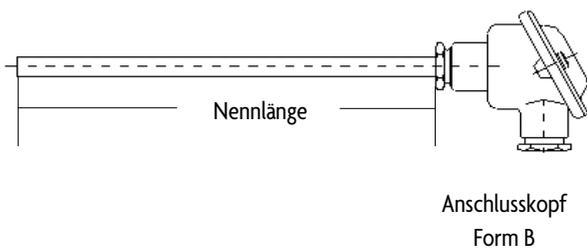


Messeinsatz mit Anschlusssockel, Mantelklemmen und Andrückvorrichtung. Geeignet zum Einbau in Anschlussköpfe Form B nach DIN EN 50 446. Für den Einbau in Anschlussköpfe Form A ist eine Adapterplatte verfügbar.

Messeinsätze werden normalerweise nicht unmittelbar dem Messmedium ausgesetzt. Vorzugsweise werden sie in Schutzarmaturen, auch Schutzhülsen genannt, eingebaut. Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich etwas näher mit diesen Bauteilen.

In der Leittechnik haben sich Messeinsätze mit Manteldurchmesser 3,0, 6,0 und 8,0 mm durchgesetzt. Die Länge richtet sich nach den genormten Armaturen oder den örtlichen bzw. baulichen Gegebenheiten.

Mantelwiderstandsthermometer mit Anschlusskopf Form B



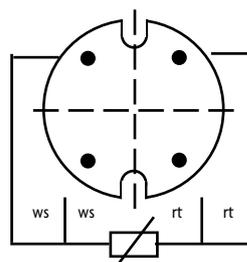
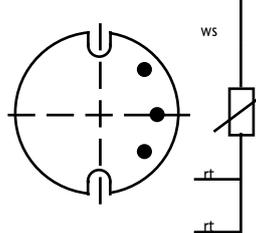
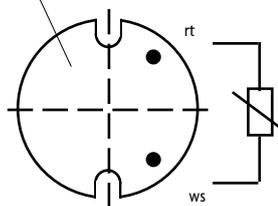
Diese Bauform besteht aus einem Messeinsatz mit Anschlusssockel und Mantelklemmen, eingebaut in einen Anschlusskopf Form B nach DIN EN 50 446. Eine spezielle Rohrhalteverschraubung aus rostfreiem Stahl fixiert den Messeinsatz. Angegeben ist die Nennlänge ab Unterkante dieser Verschraubung.

Häufig werden Manteldurchmesser mit 3,0 oder 6,0 mm eingesetzt. Selbstverständlich sind andere Kopfformen und Manteldurchmesser verfügbar.

6.1 Anschlussbelegung und Farbkennzeichnung der Mantelmesseinsätze

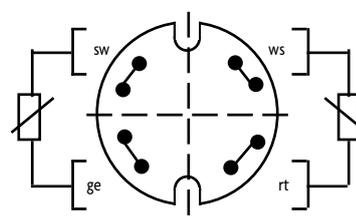
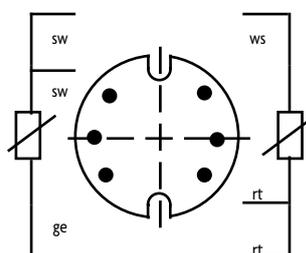
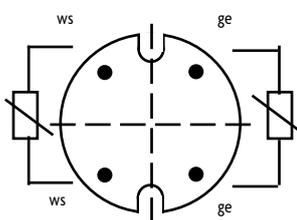
Einfach Pt 100 / 0

Keramik-sockel

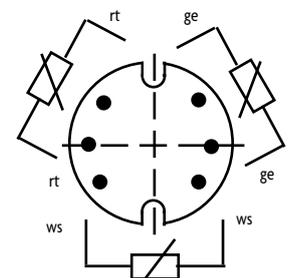


Rot	= rt
Weiß	= ws
Gelb	= ge
Schwarz	= sw

Doppel Pt 100 / 0

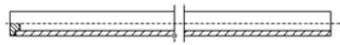
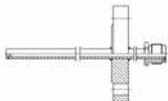
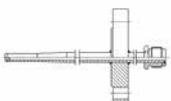


Dreifach Pt 100 / 0



7. THERMOMETER-SCHUTZROHRE AUS METALL GEMÄSS DIN 43 772

Nachfolgende Tabelle zeigt in der Gegenüberstellung die unterschiedlichen Bauformen. Die kursiv gedruckten Bauformen entsprechen der zurückgezogenen DIN 43 763.

Form 1 /Form A	Form 2 /(Form A)	Form 2G /Form B & C
<p>Gerades Schutzrohr zum Einstecken oder Einschweißen</p> 	<p>Gerades Schutzrohr zum Einstecken oder Einschweißen</p> 	<p>Gerades Schutzrohr zum Einschrauben</p> 
Form 2F /(Form F)	Form 3 /Form E	Form 3G /Form G
<p>Gerades Schutzrohr mit Flansch</p> 	<p>Verjüngtes Schutzrohr zum Einstecken oder Einschweißen</p> 	<p>Verjüngtes Schutzrohr zum Einschrauben</p> 
Form 3F /Form F	Form 4 /Form D	Halsrohr
<p>Verjüngtes Schutzrohr mit Flansch</p> 	<p>Konisches Schutzrohr zum Einschweißen für hohe Drücke</p> 	<p>Für Schutzrohre Form 4</p> 

Für Applikationen, bei denen Temperaturen in Gasen, Dämpfen oder Flüssigkeiten innerhalb unter Druck stehender Rohrleitungen bzw. Behälter gemessen werden sollen, werden überwiegend Schutzarmaturen gemäß der DIN 43 772 eingesetzt. Der Vorteil ist, dass der Messeinsatz ausgewechselt werden kann, ohne den Prozess unterbrechen zu müssen.

Form 1: Schutzrohre aus Stahl für Drücke bis 1 bar und Temperaturen bis 550 °C. Je nach Applikation sind Längsnaht-geschweißte und nahtlose Rohre üblich. Genormt sind Außendurchmesser von 15, 22 und 32 mm bei Längen von bis zu 2025 mm.

Form 2, 2G und 2F: Schutzrohre mit Außendurchmesser 9, 11, 12 und 14 mm, Wandstärken von 1, 2 und 2,5 mm sowie Gesamtlängen von bis zu 545 mm. Die Form 2 ist für den Einbau in Verschraubungen vorgesehen, Form 2G hat ein Einschraubgewinde G 1/2" A oder G 1" A. Die Form 2F ist mit einem Flansch gem. EN 1094-1 versehen, der separat zu spezifizieren ist.

Form 3, 3G und 3F: Diese Schutzrohre sind im vorderen Bereich des Messwiderstandes im Außen- und Innendurchmesser reduziert, um eine kürzere Ansprechzeit zu erzielen. Ansonsten entsprechen sie den äquivalenten Bauformen 2, 2G und 2F.

Form 4: Diese Bauform ist hauptsächlich für Applikationen im Druckbereich über 120 bar ausgelegt. Je nach Material sind Drücke bis 550 bar, Temperaturen bis 730 °C und Strömungsgeschwindigkeiten in Luft oder Heißdampf bis über 80 m/s realisierbar. Die Schutzrohre Form 4 werden eingeschweißt. Genormt sind Außendurchmesser von 18 und 24 mm, Bohrungsdurchmesser von 3,5 und 7 mm sowie verschiedene Gesamt- und Konuslängen. Zusammen mit Halsrohr, Anschlusskopf und Messeinsatz bilden sie die Messstelle.

7.1 Allgemeine Hinweise zu den Schutzrohren

Form 1:

Erhalten die Schutzrohre eine Beschichtung, z.B. aus Feueremail, so bleibt das offene Ende des Schutzrohres mindestens 20 mm unbeschichtet. Zu beachten ist, dass sich der Außendurchmesser im Allgemeinen vergrößert.

Formen 2, 3, 3G & 3F:

Die Halbzeuge für die Schutzrohre sind gegläht und zunderfrei. Die Schweißungen an der Schutzrohrspitze erfolgen unter Schutzgas. Der Haltering wird angeschweißt.

Formen 2G, 2F, 3G, 3F und 4F:

Die Schutzrohre sind in den Einschraubzapfen bzw. Flansch eingeschoben und üblicherweise an der Unter- und Oberkante des Einschraubzapfens bzw. Flansches verschweißt. Die prozesseitige Schweißnaht wird zuerst ausgeführt.

Form 4:

Das Schutzrohr wird aus Vollmaterial (einteilig) durch Tieflochbohren hergestellt.

Halsrohre:

Die Halsrohre sind für den Einsatz mit den Einschweiß-Schutzrohren Form 4 vorgesehen.

Alle Formen:

Abnahmeprüfzeugnisse gemäß EN 10 204 - 2.1, - 2.2, - 3.1 und - 3.2 sowie individuelle Prüfzertifikate (z.B. PMI) sind verfügbar, vorzugsweise für die medienberührten Teile. Beschichtungen bzw. Oberflächenbehandlungen, wie z.B. TEFLON, HALAR, PFA, Härten QPQ, Stelletieren oder ähnliches, sind ebenfalls verfügbar. In jedem Fall sind die Bedingungen bzw. Prozessparameter aus der jeweiligen Applikation bei der Auswahl der geeigneten Beschichtung zu beachten.

7.2 Hinweise für die Auswahl von Schutzrohrwerkstoffen

Alle Hinweise sind unverbindlich und stellen keine zugesagte Eigenschaft dar. Beschichtungen auf Schutzrohren erhöhen im Allgemeinen nicht die Einsatztemperatur, sondern stellen nur einen besonderen Schutz gegen chemische Angriffe, Korrosion oder Abrasion dar. Die nachfolgende Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Alle diese Angaben sind unter dem Gesichtspunkt des jeweiligen Einsatzfalles genauestens zu überprüfen. Änderungen, die dem technischen Fortschritt dienen, sind vorbehalten.

Werkstoffe für Schutzrohre

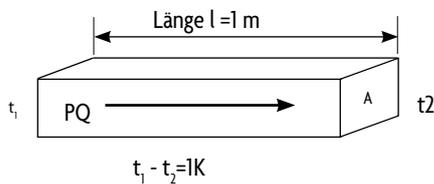
Buchstabe(n) (Optional)	Kurzname	Werkstoff Nr. (AISI od. ASTM)	Einsatztemperatur (Richtwerte)
BF	St 35.8	1.0305 (A 106 A)	400 °C
BL	C 22.8	1.0460 (A 105)	450 °C
J	X 6 CrNiMoTi 17-12-2	1.4571 (316 TI)	600 °C
DU	X 18 CrNi 28	1.4749 (446)	1100 °C
R	X 10 CrAl 24	1.4762 (441)	1100 °C
D	X 15 CrNiSi 2520	1.4841 (310 / 314)	1200 °C
B	INCONEL 600	2.4816	1300 °C
	X10CrMoVNb 12-1	1.4903 (P 91)	680 °C
	X10CrMoWNb 9-1-1	1.4905 (---)	730 °C
	X11CrMoWNb 9-3-1	1.4901 (P 92)	730 °C
	Alloy 617 (NiCr23Co12Mo)		730 °C
CH	16 Mo 3	1.5415 (A 204)	600 °C
BB	13 Cr Mo 44	1.7335 (A182-F11)	600 °C
BA	10 Cr Mo 910	1.7380 (A182-F22i)	600 °C

Tabelle 3 Werkstoffe für Schutzrohre

8. WÄRMELEITFÄHIGKEIT VON STOFFEN

Die Temperaturmessung in einem Prozess erfordert es, dass Wärmeenergie vom Prozessmedium über das Schutzrohr und den Messeinsatz zum Widerstandselement transportiert wird. Die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Materialien, bzw. der Wärmewiderstand der Isolierstoffe und unvermeidbarer Luftspalten, ist daher von ausschlaggebender Bedeutung.

Alle bekannten Stoffe, egal ob fest, flüssig oder gasförmig, leiten die Temperatur mehr oder weniger gut. Die Weiterleitung der Temperatur - der Wärmetransport - ist demnach ein Energietransport. Die Kenngröße für den Transport der Wärmeleistung ist die spezifische Wärmeleitfähigkeit.



Die spezifische Wärmeleitfähigkeit l entspricht der Wärmeleistung PQ , die durch einen 1 m langen Stab bei 1 K Temperaturdifferenz zwischen Anfang und Ende pro Querschnittsfläche A transportiert wird.

$$PQ = l \cdot A \cdot l \cdot DT \quad \text{mit } DT = t_1 - t_2$$

Darin ist:

- PQ = transportierte Wärmeleistung
- l = spezifische Wärmeleitfähigkeit
- l = Stablänge
- A = Querschnittsfläche des Stabes
- t_1 = Temperatur am Anfang des Stabes
- t_2 = Temperatur am Ende des Stabes

Für Gase und Flüssigkeiten gilt ein äquivalentes Denkmodell. Die obige Formel zur Ermittlung der spezifischen Wärmeleitfähigkeit ist auch auf Gase und Flüssigkeiten anwendbar. Sie gilt allerdings nur unter Normalbedingungen.

Der Kehrwert $1/l$ der spezifischen Wärmeleitfähigkeit ist der spezifische Wärmewiderstand.

Die Tabelle in der rechten Spalte gibt einen Überblick über die spezifische Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern, Gasen und Flüssigkeiten. Die Unterschiede zwischen den Materialien können mehrere Zehnerpotenzen umfassen.

Werkstoff	Wärmeleitfähigkeit λ in [W/m ² K]
Acetylen	0,021
Alkohol	0,17
Aluminium	204
Asphalt	0,76
Benzin	0,13
Blei	35
Diamant	2300
Email	1,34
Glas	0,81
Graphit	120 ... 150
Gummi	0,16
Helium	0,11
Keramik	1,7 ... 3,5
Kohlendioxid (CO ₂)	0,015
Kupfer	380
Kohle	1,6 ... 4,7
Leder	0,15
Luft	0,024
Nickel	85
Propan	0,018
Platin	71,2
PVC-Folie	0,16
Quarz	1,34
Quecksilber	10
Sand, trocken	0,58
Sauerstoff	0,023
Silber	432
Stahl, unlegiert	52
Stahl, X12CrNi188	14
Stickstoff	0,025
Tantal	54,5
Wasser	0,6
Wasserstoff	0,18
Wolfram	167
Ziegel, trocken	0,5 ... 1,4
Zinn	67
Verschmutzungen	
Eis	1,75 ... 2,33
Kesselstein, Gips	0,6 ... 2,3
Kesselstein, Silikat	0,08 ... 0,18
Kühlwasser (Gallertschicht)	0,35
Kohlenstaub, trocken	0,11
Ruß, trocken	0,035 ... 0,07
Salz	0,6
Schnee	0,16
Sole (Gallertschicht)	0,46

Tabelle 4 Wärmeleitfähigkeit

9. ZEITVERHALTEN VON BERÜHRUNGSTHERMOMETERN

Die Abhängigkeit des Zeitverhaltens von vielen Einflussfaktoren erschwert nicht nur die exakte Berechnung der Zeitkonstante, sondern schließt auch eine Angabe von allgemein gültigen Zahlenwerten aus. Andererseits ist es praktisch unmöglich, für jedes Messproblem das Zeitverhalten experimentell zu bestimmen. Aus diesem Grund können nur „mittlere Näherungswerte“ angegeben werden.

Wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert, überdeckt allein schon der Bereich der spezifischen Wärmeleitfähigkeit mehrere Zehnerpotenzen.

Deshalb werden die Berührungsthermometer unter definierten Wärmeübertragungs- und Normalbedingungen in geeigneten Anlagen vermessen.

Die Normalbedingungen sind:

Luftdruck	1013 hPa
Umgebungstemperatur	23 °C
Laminare Luftströmung	2 m/s
Laminare Wasserströmung	0,2 m/s
Temperatursprung	max. 20 K
Sensorgeometrie	rund-zylindrisch
Anströmung	quer zur Längsachse

Dabei wird vorausgesetzt, dass der zeitliche Anstieg des Temperatursprunges sehr viel schneller ist als das Zeitverhalten des Prüflings. Gerade bei schnell ansprechenden Sensoren mit kurzen Übergangszeiten, die ein elektrisches Ausgangssignal erzeugen, ist auch das Zeitverhalten der Messtechnik von Bedeutung.

In die Betrachtung mit einzubeziehen ist auch, dass auf Grund unvermeidbarer Fertigungstoleranzen das Zeitverhalten auch von baugleichen Sensoren nicht unerheblich beeinflusst wird.

Will man das Zeitverhalten unter Normalbedingungen auf einen realen industriellen Prozess übertragen, sind folgende zusätzliche Faktoren zu berücksichtigen:

- a) Die relative Wärmeleitfähigkeit des Prozessmediums im Bezug auf Wasser (für Flüssigkeiten) bzw. Luft (für Gase) muss bekannt sein. Werte von < 1 führen zu längeren Übergangszeiten, Werte von > 1 zu kürzeren Zeiten.
- b) Es wird vorausgesetzt, dass die Wärmekapazität - d.h. der Energieinhalt - des Prozessmediums sehr viel größer ist als die Wärmekapazität und das Wärmeableitvermögen des Temperatursensors.
- c) Sensoren (Thermoelemente und Widerstandsthermometer) bis zu einem Durchmesser von 3 mm können in erster Näherung als homogen angenommen werden. Sie haben eine exponentielle Übertragungsfunktion und entsprechen in ihrem Zeitverhalten einem elektrischen RC-Glied.

Sensoren mit größerem Durchmesser und Sensorsysteme aus Messeinsatz und Schutzrohr sind nicht als homogen anzusehen und das reale Zeitverhalten wird erheblich von der Bauform, Bauart und von fertigungstechnischen Gesichtspunkten beeinflusst.

- d) Die Anströmung des Sensors wird in der realen Applikation im Allgemeinen von den Normalbedingungen abweichen. Das gilt nicht nur für den Anströmwinkel (Abweichung von 90° zur Sensorlängsachse) sondern auch für die Strömungsbedingungen. Wirklich laminare Strömung kann als Sonderfall betrachtet werden. Kleine Rohrquerschnitte und hohe Strömungsgeschwindigkeiten führen zu erheblichen Turbulenzen und üben somit Einfluss auf das Zeitverhalten aus. Dieser Einfluss ist in Gasen stärker ausgeprägt als in Flüssigkeiten.
- e) Der Wärmeübergangskoeffizient beschreibt die Fähigkeit eines Gases oder einer Flüssigkeit, Energie von der Oberfläche eines Stoffes abzuführen bzw. an die Oberfläche abzugeben. Sie hängt unter anderem von der spezifischen Wärmekapazität, der Dichte und dem Wärmeleitkoeffizienten des wärmeabführenden sowie des wärme liefernden Mediums ab. Die Berechnung der Koeffizienten für Wärmeleitung erfolgt meist über den Temperaturunterschied der beteiligten Medien. Der Wärmeübergangskoeffizient ist im Gegensatz zur Wärmeleitfähigkeit keine Materialkonstante, sondern ist stark abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit v bzw. der Art der Strömung (laminar oder turbulent) des umgebenden Mediums, von den geometrischen Verhältnissen sowie von der Oberflächenbeschaffenheit der beteiligten Materialien.
- f) Zu guter Letzt spielt natürlich auch das Verhältnis der aktiven (Medien umspülten) Sensoroberfläche zum Wärmeableitvermögen sowie die Masse des Sensors für das Zeitverhalten eine entscheidende Rolle.

Es ist leicht einzusehen, dass es sich bei der Berechnung des Zeitverhaltens von Berührungsthermometern um ein sehr komplexes Gebiet handelt. Die VDE/VDI Empfehlung 3522 beschäftigt sich ausführlich mit diesem Thema.

9.1 Korrekturfaktoren zur Ermittlung der Wärmeübertragungskoeffizienten

für Messungen in anderen Medien als Luft und Wasser

Stoff	-100 °C ¹⁾	-50 °C ¹⁾	0 °C	20 °C ⁴⁾ 25 °C ⁵⁾	50 °C	100 °C	200 °C	300 °C	500 °C
Wasserstoff	8,89	9,99	10,9	11,1	11,2	11,1	10,8	10,4	10,4
Kohlenmonoxid (CO)	0,82	0,89	0,99	0,98	0,96	0,96	0,95	0,95	(0,95)
Stickstoff	0,87	0,97	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01
Stickstoff bei 300 bar	(1,89)	(1,62)	1,47	1,38	1,34	1,24	1,15	(1,11)	(1,03)
Rauchgas aus Erdgas	-	-	-	1,03	1,04	1,05	1,05	1,05	1,05
Methan	1,36	1,55	1,77	1,83	1,88	2,00	(2,29)	(2,52)	(3,00)
Äthylen	0,83	0,89	1,07	1,13	1,18	1,27	(1,41)	(1,58)	-
Kohlendioxid (CO ₂)	-	0,63	0,71	0,73	0,77	0,80	0,85	0,88	1,01
Ammoniak	-	1,36	1,41	1,44	1,48	1,55	1,67	1,75	1,85
Propan	(0,39)	(0,46)	0,99	1,07	1,12	1,26	(1,45)	(1,65)	-
Butan	(0,38)	0,41	0,44	1,08	1,17	(1,32)	(1,50)	(1,73)	-
Wasserdampf	-	-	-	-	-	1,28	1,26	1,33	1,48
Methanol	-	0,37	0,48	0,41	0,36	1,07	1,18	(1,28)	-
Ethanol	(0,14)	0,23	0,38	0,29	0,27	1,12	1,24	1,37	-
Tetrachlormethan	-	-	0,29	0,25	0,22	0,43	0,44	0,44	(0,45)
Benzol	-	-	-	0,29	0,26	0,93	1,17	1,26	-
n-Heptan	-	0,32	0,37	0,31	0,27	1,16	1,40	(1,50)	--
Diphyl (Dowtherm)	-	-	-	0,16	0,17	0,18	0,21	-	-
HT-Öl C	-	-	-	0,10	0,11	0,12	0,15	0,19 ²⁾	-
Ethylglykol 25 %	-	-	0,71	0,72	0,75	-	-	-	-
Salzsäure 30 %	-	-	0,71	0,64	0,60	-	-	-	-
Schwefelsäure 96 %	-	-	-	0,26	0,29	-	-	-	-
Natronlauge 50 %	-	-	(0,28)	0,31	0,40	-	-	-	-
MgCl ₂ -Sole 20 %	-	0,50 ³⁾	0,69	0,70	-	-	-	-	-

¹⁾ Umrechnungsfaktoren für -100 °C und -50 °C sind auf Wasser bzw. Luft von 0 °C bezogen

²⁾ Bezogen auf Wasser von 200 °C

³⁾ Bei -20 °C

⁴⁾ Bei Flüssigkeiten

⁵⁾ Bei Gasen

Die grau unterlegten Zellen zeigen den Korrekturfaktor für Flüssigkeiten, die nicht unterlegten Zellen die für Gase.

Zahlenwerte von < 1 führen zu längeren Übergangszeiten, Werte von > 1 zu kürzeren Zeiten.

Tabelle 5 Korrekturfaktoren

9.2 Richtwerte der Ansprechzeit von Berührungsthermometern

Die Ansprechzeit eines Berührungsthermometers gibt an, wie schnell das Thermometer einer sprunghaften Temperaturänderung folgt. Das Zeitverhalten eines Temperatursensors wird durch eine Exponentialfunktion beschrieben. Der Sensor (und das ihn umgebende Medium) soll sich zunächst auf der Temperatur T1 befinden. Dann ändert sich sprunghaft die Temperatur des Mediums auf T2. Der Sensor nimmt nur mit einer zeitlichen Verzögerung diesen Wert an. Der Verlauf des Messsignals stellt die Übergangsfunktion dar. Man hat zwei Werte gewählt, um die Funktion zu charakterisieren: t_{0,5} und t_{0,9}. Damit ist die Zeit gemeint, nach der das Messsignal 50 %, der sogenannten Halbwertszeit, bzw. 90 % des Endwertes erreicht.

Ansprechzeit von Mantel-Widerstandstherm. Richtwert in Sekunden (-5 % / +15 %)

Mantel-WT mit Schichtwiderstand

Messbe- dingung	Werte- zeit	Manteldurchmesser in mm					
		1,0	1,5	3,0	4,5	6,0	8,0
Wasser 0,2 m/s	50 %	0,15	0,21	1,2	2,5	4,0	7
	90 %	0,5	0,6	2,9	5,9	9,6	17
Luft 2 m/s	50 %	5	11	23	37	45	65
	90 %	18	35	75	120	160	220

Richtwerte für Schutzrohre DIN 43 772

Mantel-Messeinsatz mit 6 mm Durchmesser

Messbe- dingung	Ø in mm	Form 2		Form 3		Form 4	
		11	14	9	11	18	24
Wasser 0,2 m/s	50 %	32	38	25	29	31	38
	90 %	88	90	70	81	96	110
Luft 2 m/s	50 %	133	152	110	127	270	315
	90 %	415	460	370	395	840	1070

Tabelle 6 Ansprechzeiten

10. EINBAULÄNGE UND WÄRMEABLEITFEHLER

Systembedingt ist die Temperaturmessung mit einem Berührungsthermometer stets mit einem Wärmeableitfehler behaftet. Dieser kann nur minimiert – jedoch nicht eliminiert werden.

In den folgenden Tabellen sind die empfohlenen minimalen Einbaulängen für Temperatursensoren mit und ohne Schutzrohr aufgeführt.

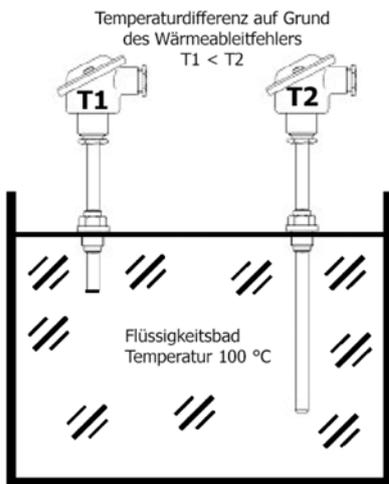


Abb. 9: Wärmeableitfehler

Einbaulänge = Medien-berührte Länge

Es ist offensichtlich, dass bei baugleichen Sensoren auf Grund der unterschiedlichen Einbaulängen die gemessenen Temperaturwerte links niedriger sein müssen als rechts.

In realen technischen Anlagen können diese Einbaubedingungen jedoch nicht immer eingehalten werden. Bei Unterschreitung der empfohlenen Einbaulängen ist mit Messfehlern durch Wärmeableitung (Wärmeableitfehler) zu rechnen.

Die quantitative Größe des Fehlers ist von den jeweiligen Einbauverhältnissen, von der Bauform des Sensors, der Wandstärke des Schutzrohres, vom Medium usw. abhängig und kann daher fast immer nur geschätzt werden.

Steht ein adäquater Laboraufbau zur Verfügung, kann die Größe des Wärmeableitfehlers auch quantitativ ermittelt werden. Die Umsetzung der gefundenen Ergebnisse in die industrielle Praxis gestaltet sich mitunter als unerwartet schwierig.

Die empfohlene Eintauchtiefe von Berührungsthermometern kann anhand der folgenden Tabelle abgeschätzt werden:

	Durchmesser des Sensors in mm		
	1,5 / 1,6	3,0 / 3,2	5,0 / 6,0
Medium	Mindesteinbaulänge in mm 1)		
gasförmig 2)	22 ... 30	45 ... 60	75 ... 120
flüssig 2)	8 ... 15	15 ... 30	25 ... 50
fest 3)	8 ... 12	15 ... 20	20 ... 30

	Durchmesser des Sensors in mm		
	11 / 12	14 / 15	22 / 24
Medium	Mindesteinbaulänge in mm 1)		
gasförmig 2)	150	300	450/480
flüssig 2)	120	150	250/300

Tabelle 7: Eintauchtiefe

- 1) Bei Widerstandsthermometern ist die Länge des Messwiderstandes (typabhängig 5 ... 30 mm) zu den Tabellenwerten zu addieren.
- 2) Größerer Wert --> stehendes Medium, kleinerer Wert --> strömendes Medium
- 3) Größerer Wert --> eng tolerierte Bohrung, kleinerer Wert --> eingelötet in die Aufnahmebohrung

Als generelle Richtwerte können folgende Faustformeln angewendet werden:

Bei Einsatz in Gasen:

Mindesteinbaulänge 15 ... 20 x Außen-Ø

Bei Einsatz in Flüssigkeiten:

Mindesteinbaulänge 5 ... 10 x Außen-Ø

Anhand der nachstehenden Grafik kann der relative Messfehler in Prozent bezogen auf das n-fache des Thermometerdurchmessers für den Einsatz in Flüssigkeiten abgeschätzt werden. Zu beachten ist, das äquivalent zum Zeitverhalten der Wärmeableitfehler ebenfalls von den Wärmeübertragungseigenschaften des Mediums abhängt.

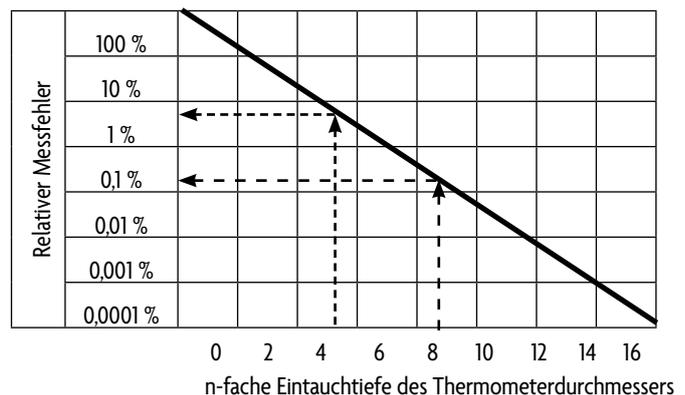


Abb. 10 Wärmeableitfehler

11. Temperatur

11.1 Temperatur - Was ist das eigentlich?

Die Temperatur ist sowohl eine physikalische als auch eine thermodynamische Zustandsgröße.

Die „Absolute Temperatur“ in Kelvin (K) bedeutet die mittlere kinetische Energie pro Freiheitsgrad eines Teilchens oder Teilchensystems.

Freiheitsgrade kennzeichnen mögliche „Bewegungstypen“ wie Bewegungen entlang der drei Raumachsen (Translation), Drehbewegungen (Rotation) oder Schwingungen von Teilchen gegen-einander (Vibration). Die Temperatur ist eine makroskopische, intensive und damit phänomenologische Größe. Sie verliert allerdings bei Betrachtungen auf Teilchenebene ihren Sinn.

Die Werte der relativen Temperaturskala werden in der Maßeinheit Grad (°) angegeben, wobei verschiedene empirische Temperaturskalen üblich sind - Celsius (°C) oder Fahrenheit (°F) im Anglo-Amerikanischen.

Als Ausgangswerte für deren Einteilung und den Nullpunkt verwendet man die Übergangstemperatur chemisch reiner Stoffe von einem Aggregatzustand in einen anderen, z.B. den Tripelpunkt des Wassers oder den Erstarrungspunkt von Metallen mit extrem hoher Reinheit.

Hohe Temperaturen werden umgangssprachlich als heiß, niedrige als kalt bezeichnet. Das entspricht dem intuitiven Ansatz einer relativen Skala, was beim Badewasser „heiß“ ist, ist bei einer Suppe nur „lau“, „hohe Temperatur“ ist im Zusammenhang betrachtet kein richtiger physikalischer Ausdruck.

Die Wärmeempfindung des Menschen beruht nicht auf der Temperatur, sondern auf dem Wärmestrom. Dazu passt, dass die Wärmeempfindung oft als gefühlte Temperatur bezeichnet wird und so als Wärme beziehungsweise Kälte empfunden wird. Die gefühlte Temperatur unterscheidet sich teilweise erheblich von der tatsächlichen Temperatur.

11.2 Temperaturempfinden und Wärmeübertragung

Stehen zwei Körper unterschiedlicher Temperatur in Wärmekontakt, so wird nach dem „Nullten Hauptsatz der Thermodynamik“ solange Energie vom wärmeren zum kälteren Körper übertragen, bis beide im thermischen Gleichgewicht stehen und die gleiche Temperatur angenommen haben. Es gibt dabei drei Möglichkeiten der Wärmeübertragung:

- 1) Wärmeleitung
- 2) Konvektion
- 3) Wärmestrahlung

Der Mensch kann Temperaturen nur im Bereich um +30 / -60 °C relativ zur Körpertemperatur fühlen. Genau genommen nimmt man nicht Temperaturen wahr, sondern die Größe des Wärmestroms durch die Hautoberfläche, weshalb man auch von einer gefühlten Temperatur spricht. Dieses hat für das Temperaturempfinden einige Konsequenzen:

- Temperaturen oberhalb der Oberflächentemperatur der Haut fühlen sich warm an, solche unterhalb empfinden wir als kalt
- Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit, wie Metalle, führen zu höheren Wärmeströmen und fühlen sich deshalb kälter beziehungsweise wärmer an, als Materialien mit niedrigerer Wärmeleitfähigkeit wie Holz oder Polystyrol
- Die gefühlte Temperatur ist bei Wind niedriger als bei Windstille. Der Effekt wird bei Temperaturen < 0 °C durch den „Windchill“ und bei höheren Temperaturen durch den „Hitzeindex“ beschrieben
- Der Mensch kann Lufttemperatur von überlagerter Wärmestrahlung nicht unterscheiden, was auch ganz allgemein gilt und unter anderem dazu führt, dass Lufttemperaturen immer im Schatten gemessen werden
- Gleiche Temperatur wird von den beiden Händen als unterschiedlich wahrgenommen, wenn diese vorher unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt waren

Genau genommen gilt dieses nicht nur für das menschliche Empfinden, auch in vielen technischen Anwendungen ist nicht die Temperatur von Bedeutung sondern der Wärmestrom.

So hat die Atmosphäre der Erde oberhalb 1.000 km Temperaturen von mehr als 1.000 °C, dennoch verglühen deshalb keine Satelliten. Auf Grund der geringen Teilchendichte ist der Energieübertrag äußerst gering. Alle festen Stoffe, Flüssigkeiten und Gase bestehen aus Atomen und Molekülen. Diese befinden sich in ständiger Bewegung und zwischen ihnen wirken Kräfte. Die Geschwindigkeiten der einzelnen Teilchen eines Stoffes sind zwar unterschiedlich groß aber im Mittel gleich 0 bzw. gleich der Geschwindigkeit des Körpers.

Anders ist es mit den Abweichungen vom Mittelwert, besonders dem Mittelwert des Quadrates der Geschwindigkeiten. Wie groß das mittlere Geschwindigkeitsquadrat aller Teilchen eines Stoffes ist, hängt von der Art des Stoffes, vom Aggregatzustand und vor allem von der Temperatur ab. Für feste, flüssige und gasförmige Körper gilt: Je höher die Temperatur eines Körpers ist, desto größer ist das mittlere Geschwindigkeitsquadrat aller Teilchen des Stoffes, aus dem der Körper besteht.

Die Temperatur ist damit ein Maß für den durchschnittlichen ungeordneten, also zufälligen, Bewegungsenergieanteil (kinetische Energie) einer Ansammlung von Teilchen. Die Teilchen sind hierbei die Luftmoleküle bzw. die Moleküle oder Atome eines Gases, einer Flüssigkeit oder eines soliden Festkörpers. In der statistischen Mechanik steht die Temperatur mit der Energie pro Freiheitsgrad in Zusammenhang. Im idealen Gas aus einatomigen Molekülen sind das drei Translationsfreiheitsgrade pro Molekül und bei mehr-atomigen Gasen können weitere Rotationsfreiheitsgrade hinzukommen.

Bei Gasen kann man diesen Zusammenhang zwischen Temperatur und Teilchengeschwindigkeit nach obiger Beziehung sogar quantitativ angeben. Eine Verdopplung der Temperatur auf der Kelvin-Skala führt bei idealen Gasen zu einer Erhöhung der quadratisch gemittelten Teilchengeschwindigkeit um den Faktor $2^{1/2} = 1,414$. Zwei unterschiedliche Gase haben dann die gleiche Temperatur, wenn das Produkt aus der Molmasse des jeweiligen Gases und dem Quadrat der quadratisch gemittelten Teilchengeschwindigkeit gleich groß ist.

Im thermischen Gleichgewicht nimmt jeder Freiheitsgrad der Materie (Bewegung, potentielle Energie, Schwingungen, elektronische Anregungen usw.) eine der Temperatur entsprechende Menge an Energie auf. Wie viel genau muss aus der regulären Verteilung (Boltzmann-Konstante) berechnet werden und ist durch das Verhältnis von Energie zu Temperatur mal Boltzmann-Konstante k_B bestimmt. Bei der kontinuierlichen (klassischen) kinetischen Energie ist diese genau $k_B T/2$. Die Boltzmann-Konstante ergibt einen Zusammenhang zwischen Energie und Temperatur, der 11.606,7 Kelvin pro Elektronenvolt beträgt. Bei Raumtemperatur (~300 Kelvin) ergibt dieses 0,0258472 eV.

Die durchschnittliche kinetische Energie der Teilchen ist abhängig von der Molekülmasse bzw. Molmasse. Dabei sind die schweren Teilchen jedoch auch langsamer. Bei idealen Gasen gleichen sich Massenerhöhung und Geschwindigkeitserniedrigung gegenseitig aus, was zum Gesetz von Avogadro führt.

Die thermische Energie ist jedoch wie die Temperatur selbst nur ein Mittelwert innerhalb eines Vielteilchensystems und ihr Zusammenhang mit der Teilchengeschwindigkeit lässt sich ebenfalls aus der Maxwell-Boltzmann-Verteilung ableiten:

$$E_{kin} = 0,5 * m v^2$$

mit E_{kin} und v^2 als Mittelwerte.

Das thermische Gleichgewicht hat eine wichtige Eigenschaft, die in der Thermodynamik zur Formulierung des Nullten Hauptsatzes führt.

12. THERMODYNAMIK

Die Thermodynamik, die auch als Wärmelehre bezeichnet wird, ist ein Teilgebiet der klassischen Physik. Sie ist die Lehre der Energie, ihrer Erscheinungsformen und der Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Sie erweist sich als vielseitig anwendbar in der Chemie, Biologie und Technik. Mit ihrer Hilfe lässt sich beispielsweise erklären, warum bestimmte chemische Reaktionen spontan ablaufen und andere nicht. Die Thermodynamik ist eine rein makroskopische Theorie, in deren Rahmen angenommen wird, dass sich die physikalischen Eigenschaften eines Systems hinreichend gut mit makroskopischen Zustandsgrößen beschreiben lassen. Sie ist eine effektive Theorie, da sie die Bewegung der einzelnen Atome und Moleküle vernachlässigt und nur mittlere Größen wie Druck und Temperatur betrachtet.

Die Gleichungen, die konkrete Zusammenhänge zwischen den Zustandsgrößen für spezielle physikalische Systeme (z.B. ideales Gas) liefern, heißen Zustandsgleichungen.

Durch die statistische Mechanik nach James Clerk Maxwell und Ludwig Boltzmann können viele Aspekte der Thermodynamik anhand mikroskopischer Theorien bestätigt werden. In ihrer gesamten Darstellung behält sie allerdings weiterhin den ausgezeichneten Status einer eigenständigen physikalischen Theorie. Ihre Anwendbarkeit muss jedoch auf geeignete Systeme eingeschränkt werden, nämlich solche, die sich aus genügend vielen Einzelsystemen, also meist Teilchen, zusammensetzen

12.1 Geschichte

Die Thermodynamik als eigenständiges Wissensgebiet entstand im Verlauf des 19. Jahrhunderts auf der Grundlage der Arbeiten von James Prescott Joule, Nicholas Leonard Sadi Carnot, Julius Robert von Mayer und Hermann von Helmholtz.

Historisch wurde sie auf vier Hauptsätzen aufgebaut. Diese sind in ihrer ursprünglichen Formulierung – entsprechend ihrer Entstehung auf empirischen Beobachtungen beruhend – reine Erfahrungssätze. Die Entropie wird als abstrakte Hilfsgröße eingeführt. Die mathematische Struktur erhielt diese Darstellung durch die Arbeiten von Josiah Willard Gibbs, der als Erster die Bedeutung der Fundamentalgleichung erkannt und ihre Eigenschaften formuliert hat.

12.2 Hauptsätze der Thermodynamik

0. Hauptsatz: Stehen zwei Systeme jeweils mit einem Dritten im thermodynamischen Gleichgewicht, so stehen sie auch untereinander im Gleichgewicht.

1. Hauptsatz: Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur in andere Energiearten umgewandelt werden.

2. Hauptsatz: Thermische Energie ist nicht in beliebigem Maße in andere Energiearten umwandelbar.

3. Hauptsatz: Der absolute Nullpunkt der Temperatur ist unerreichbar.

„Nullter“ Hauptsatz (manchmal auch 4. Hauptsatz genannt)

Annahme:

A steht mit B im thermischen Gleichgewicht.

Ferner steht B mit C im thermischen Gleichgewicht.

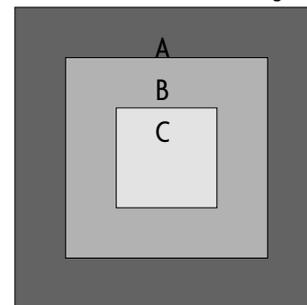


Abb. 11 Nullter Hauptsatz der Thermodynamik

Folgerung:

Nullter Hauptsatz der Thermodynamik:

Stehen zwei Systeme jeweils mit einem Dritten im thermodynamischen Gleichgewicht, so stehen sie auch untereinander im Gleichgewicht.

Daraus folgt die Definition der Temperatur:

Zwei Systeme, die sich untereinander im thermischen Gleichgewicht (Equilibrium) befinden, haben dieselbe Temperatur. A hat also dieselbe Temperatur wie B und C.

Rein praktisch stellt sich die Anwendung des nullten Hauptsatzes in der Temperaturmessung wie folgt dar:

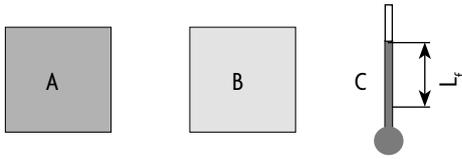


Abb. 12 Nullter Hauptsatz der Thermodynamik

Zeigt das System C (z.B. Flüssigkeits-Glasthermometer) mit der temperaturabhängigen Größe L_f denselben Wert für L_f im Kontakt mit dem System A wie im Kontakt mit dem System B, so haben A und B dieselbe Temperatur.

Wenn ein System A sich mit einem System B sowie B sich mit einem System C im thermischen Gleichgewicht (Equilibrium) befindet, so befindet sich auch A mit C im thermischen Gleichgewicht.

Anders formuliert, das Gleichgewicht ist transitiv. Dies erlaubt es, eine neue Zustandsgröße, die empirische Temperatur d einzuführen, so dass zwei Systeme genau dann die gleiche Temperatur haben, wenn sie sich im thermischen Gleichgewicht befinden.

Dieses Gesetz wurde erst nach den drei anderen Hauptsätzen formuliert. Da es aber eine wichtige Basis bildet, wurde es später als „Nullter Hauptsatz“ bezeichnet. Dieser ist die Grundlage für alle Messungen mit Berührungsthermometern. Es erklärt, warum ein Thermometer, das in Kontakt mit dem zu messenden Objekt steht, dessen Temperatur messen kann.

13. TEMPERATURSKALEN UND IHRE EINHEITEN

Eine Temperaturskala ist eine willkürliche Festlegung der Größenordnung der Temperatur und gestattet die Angabe der Temperatur in Bezug zu einem Vergleichswert.

Es werden zwei Fixpunkte festgelegt. Diese Fixpunkte sind zweckmäßigerweise in der Natur vorkommende und durch Experimente reproduzierbare Werte. Der Abstand zwischen den Fixpunkten wird dann gleichmäßig aufgeteilt - z.B. wird bei der Celsius-Skala der Abstand zwischen dem Eis- und Kochpunkt von Wasser unter Normalbedingungen in 100 Skalenteile geteilt.

Eine andere Methode, die sich trotz einiger Vorteile nicht etablieren konnte, orientiert sich an der Volumenänderung von Gasen bei konstantem Druck. Als Einheit wurde von Rudolf Planck der Temperaturunterschied vorgeschlagen, der einer Volumenänderung um den Faktor $(1 + 1/273,15)$ entspricht.

Eine solche logarithmische Temperaturskala erstreckt sich von minus Unendlich bis plus Unendlich. Es ist kein absoluter Nullpunkt erforderlich, dessen Bestimmung nicht exakt möglich ist.

Die Kelvin-Skala beginnt dagegen beim absoluten Nullpunkt und verwendet die lineare 100er Teilung der Celsius-Skala. Beim absoluten Nullpunkt handelt es sich jedoch praktisch um einen gegen Null gehenden Grenzwert, da er durch das Erliegen jeglicher Teilchenbe-

wegung definiert ist, was seine Messung prinzipiell ausschließt. Die bekanntesten Temperaturskalen mit ihren verschiedenen Charakteristika sind weiter unten tabellarisch dargestellt. Die heute gültige Temperaturskala ist die „International Temperature Scale of 1990“ (ITS 90).
SI-Einheit

Die SI-Einheit der thermodynamischen Temperatur (Formelzeichen: T) ist das Kelvin mit dem Einheitenzeichen: K. Ein Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser, bei dem dessen feste, flüssige und gasförmige Phasen koexistieren. Der Nullpunkt der Kelvin-Skala liegt beim absoluten Nullpunkt.

Es ist erlaubt, Temperaturdifferenzen sowohl in $^{\circ}\text{C}$ als auch in K anzugeben (gleicher Zahlenwert). Empfohlen wird jedoch, Temperaturdifferenzen in K anzugeben, damit der Unterschied zwischen Temperatur und Temperaturdifferenz deutlicher wird.

Nicht-SI-Einheiten

Die empirische Temperatur (Formelzeichen: d ; vielfach auch t), auch als Celsius-Temperatur bezeichnet, da in Grad Celsius (Einheitenzeichen: $^{\circ}\text{C}$) angegeben, ergibt sich damit aus der thermodynamischen Temperatur durch:

$$d / ^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15$$

Temperaturdifferenzen können vom Prinzip her auch in Grad Celsius angegeben werden, das den gleichen Skalenabstand aufweist wie die Kelvin-Skala, dessen Nullpunkt sich aber auf den Gefrierpunkt von Wasser bei Normaldruck (mittlerer Luftdruck auf Meereshöhe - 1013 hPa) bezieht.

Der so festgelegte Gefrierpunkt liegt 0,01 K unterhalb der Temperatur des Tripelpunktes von höchst reinem Wasser.

In den USA ist die Fahrenheit-Skala mit der Einheit Grad Fahrenheit (Einheitenzeichen: $^{\circ}\text{F}$) immer noch sehr gebräuchlich.

Die absolute Temperatur auf Fahrenheit-Basis wird mit Grad Rankine (Einheitenzeichen: $^{\circ}\text{Ra}$) bezeichnet. Die Rankine-Skala hat den Nullpunkt wie die Kelvin-Skala beim absoluten Temperaturnullpunkt, im Gegensatz zu dieser jedoch die Skalenabstände der Fahrenheit-Skala.

Übersicht über die verschiedenen Temperaturskalen

Skala	Kelvin	Celsius	Fahrenheit	Rankine	Delisle	Newton	Réaumur	Rømer
Einheit	Kelvin	Grad Celsius	Grad Fahrenheit	Grad Rankine	Grad Delisle	Grad Newton	Grad Réaumur	Grad Rømer
Einheitenzeichen	K	°C	°F	°Ra, °R	°De, °D	°N	°Ré, °Re, °R	°Rø
Unterer Fixpunkt F_1	$T_{0} = 0 \text{ K}$	$T_{\text{Schm}}(\text{H}_2\text{O})^2 = 0 \text{ °C}$	Kältemischung = 0 °F^3	$T_{0} = 0 \text{ °Ra}$	$T_{\text{Schm}}(\text{H}_2\text{O}) = 150 \text{ °De}$	$T_{\text{Schm}}(\text{H}_2\text{O}) = 0 \text{ °N}$	$T_{\text{Schm}}(\text{H}_2\text{O}) = 0 \text{ °Ré}$	$T_{\text{Schm}}(\text{Lake})^4 = 0 \text{ °Rø}$
Oberer Fixpunkt F_2	$T_{\text{In}}(\text{H}_2\text{O}) = 273,16 \text{ K}$	$T_{\text{Sied}}(\text{H}_2\text{O})^2 = 100 \text{ °C}$	$T_{\text{Mensch}}^3 = 96 \text{ °F}$	–	$T_{\text{Sied}}(\text{H}_2\text{O}) = 0 \text{ °De}$	$T_{\text{Sied}}(\text{H}_2\text{O}) = 33 \text{ °N}$	$T_{\text{Sied}}(\text{H}_2\text{O}) = 80 \text{ °Ré}$	$T_{\text{Sied}}(\text{H}_2\text{O}) = 60 \text{ °Rø}$
Skalenintervall	$(F_2 - F_1) / 273,16^1$	$(F_2 - F_1) / 100$	$(F_2 - F_1) / 96$	$1 \text{ °Ra} = 1 \text{ °F}$	$(F_1 - F_2) / 150$	$(F_2 - F_1) / 33$	$(F_2 - F_1) / 80$	$(F_2 - F_1) / 60$
Erfinder	<u>William Thomson, Lord Kelvin</u>	<u>Anders Celsius</u>	<u>Daniel Gabriel Fahrenheit</u>	<u>William Rankine</u>	<u>Joseph-Nicolas Delisle</u>	<u>Isaac Newton</u>	<u>René-Antoine Ferchault de Réaumur</u>	<u>Ole Rømer</u>
Entstehungsjahr	<u>1848</u>	<u>1742</u>	<u>1714</u>	<u>1859</u>	<u>1732</u>	~ <u>1700</u>	<u>1730</u>	<u>1701</u>
Verbreitungsgebiet	Weltweit (SI-Einheit)	Weltweit	USA	USA	Russland (19. Jhd.)	–	Westeuropa bis Ende 19. Jhd.	–

1) Ursprünglich über Celsius-Skala definiert (Temperaturunterschied $1 \text{ K} = 1 \text{ °C}$)
 2) Traditionelle Fixpunkte; ursprüngliche umgekehrt (ähnlich wie Delisle)
 Tabelle 3: Temperaturskalen

3) Genutzt wurde die Temperatur einer Kältemischung von Eis, Wasser und Salmiak oder Seesalz ($-17,8 \text{ °C}$) und die „Körpertemperatur eines gesunden Mannes“ ($35,6 \text{ °C}$)
 4) Genutzt wurde die Schmelztemperatur einer Salzlake ($-14,3 \text{ °C}$)

14. MESSUNG ANHAND DER TEMPERATURSTRAHLUNG

Die Temperatur kann berührungslos durch Messung der Temperaturstrahlung bestimmt werden, die alle Körper oberhalb des absoluten Nullpunktes aussenden. Die Messung erfolgt z.B. mit einem Pyrometer oder mit einer Thermografie-Kamera.

Je nach Temperatur kommen dabei verschiedene Wellenlängenbereiche in Frage (Stefan-Boltzmann-Gesetz oder Wien'sches Verschiebungsgesetz). Bei niedrigen Temperaturen kommen Bolometer, Mikro-Bolometer oder gekühlte Halbleiterdetektoren in Frage, bei hohen Temperaturen werden ungekühlte Fotodioden oder auch der visuelle Vergleich von Intensität und Farbe des Glühens angewendet (Wolframfaden-Pyrometer, „Disappearing Filament Pyrometer“).

Eine Thermografie-Kamera erzeugt eine Falschfarbendarstellung der Strahlungsemission im mittleren Infrarot (ca. $5...10 \mu\text{m}$ Wellenlänge), die sich durch Kalibrierung in Form einer Farbskala an die Temperaturskala koppeln lässt. Messfehler entstehen hierbei wie auch bei Pyrometern durch unterschiedliche Emissionsgrade der Messobjekte, bei bekannten Emissionsgraden sind Messgenauigkeiten bzw. Kontraste bis herab zu Temperaturdifferenzen von $0,01 \text{ K}$ möglich.

15. TEMPERATURMESSUNG MIT BERÜHRUNGSTHERMOMETERN

Unter dem Begriff Berührungsthermometer sind alle diejenigen Thermometer zu verstehen, die direkt mit dem Medium in Berührung kommen, dessen Temperatur gemessen werden soll. Zu den Berührungsthermometern gehören Ausdehnungsthermometer (Flüssigkeits- und Bimetallthermometer) und alle elektrischen bzw. elektronischen Thermometer, die mit Temperatursensoren arbeiten.

Industrielle Berührungstemperatursensoren bestehen aus dem temperaturempfindlichen Element (z. B. Thermoelement oder Pt 100), das zum Schutz in ein Schutz- oder Tauchrohr eingebaut ist. In vielen Fällen besitzt das Rohr am oberen Ende einen Klemmsockel zum Anschluss der elektrischen Leitungen.

Dieser Gesamtaufbau ist genormt und wird Messeinsatz genannt. Messeinsätze können mit einem Schutzrohr und einem Anschlusskopf versehen werden. Schutzrohr und Anschlusskopf bilden zusammen die sogenannte Schutzarmatur. Die Schutzarmatur schützt den empfindlichen Messeinsatz gegen mechanische und chemische Beanspruchung sowie die Anschlussklemmen vor Schmutz und Feuchtigkeit.

15.1 Messung durch thermischen Kontakt

Die Temperaturmessung erfolgt hierbei mit Hilfe von Thermometern oder Temperatursensoren. Das Herstellen eines thermischen Kontaktes erfordert ausreichende Wärmeleitung, Konvektion oder ein Strahlungsgleichgewicht zwischen Messobjekt (Festkörper, Flüssigkeit, Gase) und Sensor. Die Messgenauigkeit kann z.B. durch nicht ausgeglichene Wärmestrahlungsbilanz, Luftbewegungen oder durch Wärmeableitung entlang des Sensors beeinträchtigt sein. Die Messgenauigkeit wird theoretisch durch die zufällige Brownsche Molekularbewegung begrenzt.

Die Temperaturerfassung durch Wärmekontakt kann in drei Methoden unterteilt werden:

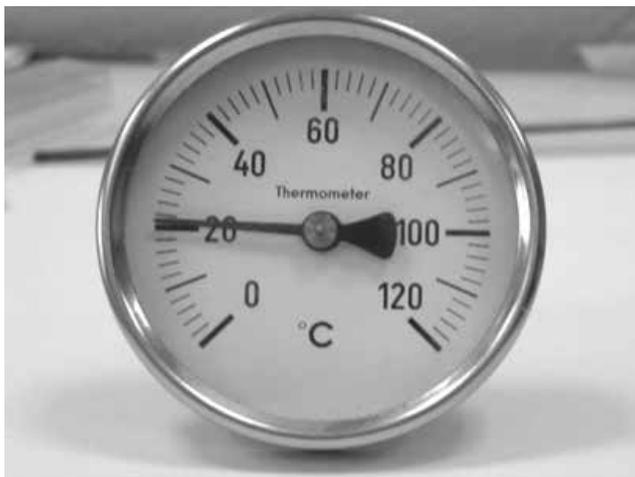


Abb. 13 Zeigthermometer

a) Mechanische Erfassung

Durch Ausnutzen der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Materialien mittels Gas- oder Flüssigkeitsthermometer (z. B. traditionelle Quecksilber- oder Alkoholthermometer) bzw. Bimetallthermometer wird die Temperatur bestimmt.

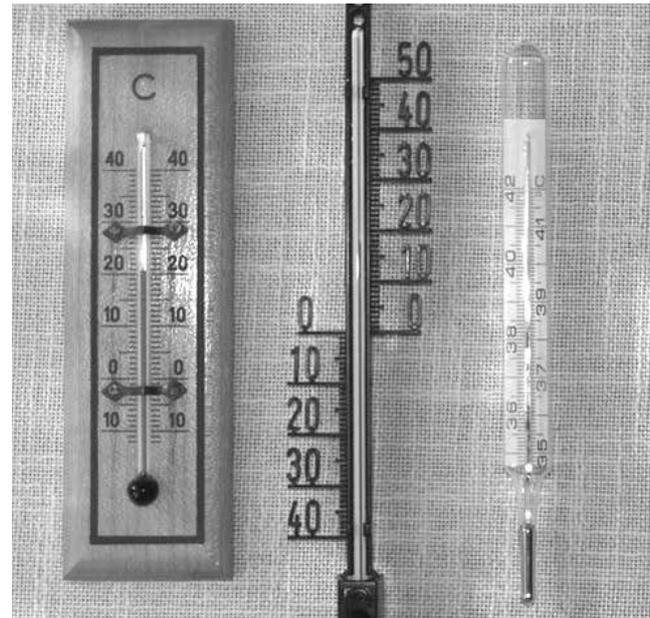


Abb. 14 Flüssigkeits-Glas-Thermometer

b) Elektrische Erfassung

Nutzung des temperaturabhängigen elektrischen Widerstandes von elektrischen Leitern, Halbleitern oder Keramikelementen:

- | Widerstandsthermometer (z.B. Pt 100), Kaltleiter (PTC) und Heißeiter (NTC).
- | Nutzung der Thermoelektrizität
- | Elektronische Sensoren, die die lineare Temperaturabhängigkeit der Bandlücke von Halbleitern dazu nutzen, ein temperaturproportionales Signal zu erzeugen.

c) Indirekte Messung

Sie erfolgt durch temperaturabhängige Zustandsänderungen von Materialien (z.B. tabellierte Stoffdaten), faseroptische Temperaturmessung mit Lichtwellenleitern, Seger-Kegel, Temperaturmessung durch Farbumschlag (bei einer bestimmten Temperatur), Beobachten des Erstarrens, Schmelzens, Glühens oder der Anlauffarben.



Abb. 15 Widerstandsthermometer

16. ZUSAMMENHANG ZWISCHEN TEMPERATUR IN °C UND WIDERSTAND IN OHM

Wie bereits im Abschnitt 14 beschrieben, stellt die in der Norm DIN EN 60 751:2009 enthaltene Callendar-van Duesen-Gleichung den mathematischen Zusammenhang zwischen der Temperatur in °C und dem Widerstand in Ohm her. Obwohl die Tabelle den Bereich von -200 °C bis +850 °C überstreicht, gelten die in der Norm aufgeführten Einschränkungen für technische Widerstandsthermometer.

t ₉₀ in °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	18,520	18,952	19,384	19,815	20,247	20,677	21,108	21,538	21,967	22,397
-190	22,825	23,254	23,682	24,110	24,538	24,965	25,392	25,819	26,245	26,671
-180	27,096	27,522	27,947	28,371	28,796	29,220	29,643	30,067	30,490	30,913
-170	31,335	31,757	32,179	32,601	33,022	33,443	33,864	34,284	34,704	35,124
-160	35,543	35,963	36,382	36,800	37,219	37,637	38,055	38,472	38,889	39,306
-150	39,723	40,140	40,556	40,972	41,388	41,803	42,218	42,633	43,048	43,462
-140	43,876	44,290	44,704	45,117	45,531	45,944	46,356	46,769	47,181	47,593
-130	48,005	48,416	48,828	49,239	49,649	50,060	50,470	50,881	51,291	51,700
-120	52,110	52,519	52,928	53,337	53,746	54,154	54,562	54,970	55,378	55,786
-110	56,193	56,600	57,007	57,414	57,821	58,227	58,633	59,039	59,445	59,850
-100	60,256	60,661	61,066	61,471	61,876	62,280	62,684	63,088	63,492	63,896
-90	64,300	64,703	65,106	65,509	65,912	66,315	66,717	67,120	67,522	67,924
-80	68,325	68,727	69,129	69,530	69,931	70,332	70,733	71,134	71,534	71,934
-70	72,335	72,735	73,134	73,534	73,934	74,333	74,732	75,131	75,530	75,929
-60	76,328	76,726	77,125	77,523	77,921	78,319	78,717	79,114	79,512	79,909
-50	80,306	80,703	81,100	81,497	81,894	82,290	82,687	83,083	83,479	83,875
-40	84,271	84,666	85,062	85,457	85,853	86,248	86,643	87,038	87,432	87,827
-30	88,222	88,616	89,010	89,404	89,798	90,192	90,586	90,980	91,373	91,767
-20	92,160	92,553	92,946	93,339	93,732	94,124	94,517	94,909	95,302	95,694
-10	96,086	96,478	96,870	97,261	97,653	98,044	98,436	98,827	99,218	99,609
0	100,000	100,391	100,781	101,172	101,562	101,953	102,343	102,733	103,123	103,513
10	103,903	104,292	104,682	105,071	105,460	105,849	106,238	106,627	107,016	107,405
20	107,794	108,182	108,570	108,959	109,347	109,735	110,123	110,510	110,898	111,286
30	111,673	112,060	112,447	112,835	113,221	113,608	113,995	114,382	114,768	115,155
40	115,541	115,927	116,313	116,699	117,085	117,470	117,856	118,241	118,627	119,012
50	119,397	119,782	120,167	120,552	120,936	121,321	121,705	122,090	122,474	122,858
60	123,242	123,626	124,009	124,393	124,777	125,160	125,543	125,926	126,309	126,692
70	127,075	127,458	127,840	128,223	128,605	128,987	129,370	129,752	130,133	130,515
80	130,897	131,278	131,660	132,041	132,422	132,803	133,184	133,565	133,946	134,326
90	134,707	135,087	135,468	135,848	136,228	136,608	136,987	137,367	137,747	138,126
100	138,506	138,885	139,264	139,643	140,022	140,400	140,779	141,158	141,536	141,914
110	142,293	142,671	143,049	143,426	143,804	144,182	144,559	144,937	145,314	145,691
120	146,068	146,445	146,822	147,198	147,575	147,951	148,328	148,704	149,080	149,456
130	149,832	150,208	150,583	150,959	151,334	151,710	152,085	152,460	152,835	153,210
140	153,584	153,959	154,333	154,708	155,082	155,456	155,830	156,204	156,578	156,952
150	157,325	157,699	158,072	158,445	158,818	159,191	159,564	159,937	160,309	160,682
160	161,054	161,427	161,799	162,171	162,543	162,915	163,286	163,658	164,030	164,401
170	164,772	165,143	165,514	165,885	166,256	166,627	166,997	167,368	167,738	168,108
180	168,478	168,848	169,218	169,588	169,958	170,327	170,696	171,066	171,435	171,804
190	172,173	172,542	172,910	173,279	173,648	174,016	174,384	174,752	175,120	175,488
200	175,856	176,224	176,591	176,959	177,326	177,693	178,060	178,427	178,794	179,161
210	179,528	179,894	180,260	180,627	180,993	181,359	181,725	182,091	182,456	182,822
220	183,188	183,553	183,918	184,283	184,648	185,013	185,378	185,743	186,107	186,472
230	186,836	187,200	187,564	187,928	188,292	188,656	189,019	189,383	189,746	190,110
240	190,473	190,836	191,199	191,562	191,924	192,287	192,649	193,012	193,374	193,736
250	194,098	194,460	194,822	195,183	195,545	195,906	196,268	196,629	196,990	197,351
260	197,712	198,073	198,433	198,794	199,154	199,514	199,875	200,235	200,595	200,954
270	201,314	201,674	202,033	202,393	202,752	203,111	203,470	203,829	204,188	204,546
280	204,905	205,263	205,622	205,980	206,338	206,696	207,054	207,411	207,769	208,127
290	208,484	208,841	209,198	209,555	209,912	210,269	210,626	210,982	211,339	211,695

Temperatur - Widerstand - Tabelle Fortsetzung

300	212,052	212,408	212,764	213,120	213,475	213,831	214,187	214,542	214,897	215,252
310	215,608	215,962	216,317	216,672	217,027	217,381	217,736	218,090	218,444	218,798
320	219,152	219,506	219,860	220,213	220,567	220,920	221,273	221,626	221,979	222,332
330	222,685	223,038	223,390	223,743	224,095	224,447	224,799	225,151	225,503	225,855
340	226,206	226,558	226,909	227,260	227,612	227,963	228,314	228,664	229,015	229,366
350	229,716	230,066	230,417	230,767	231,117	231,467	231,816	232,166	232,516	232,865
360	233,214	233,564	233,913	234,262	234,610	234,959	235,308	235,656	236,005	236,353
370	236,701	237,049	237,397	237,745	238,093	238,440	238,788	239,135	239,482	239,829
380	240,176	240,523	240,870	241,217	241,563	241,910	242,256	242,602	242,948	243,294
390	243,640	243,986	244,331	244,677	245,022	245,367	245,713	246,058	246,403	246,747
400	247,092	247,437	247,781	248,125	248,470	248,814	249,158	249,502	249,845	250,189
410	250,533	250,876	251,219	251,562	251,906	252,248	252,591	252,934	253,277	253,619
420	253,962	254,304	254,646	254,988	255,330	255,672	256,013	256,355	256,696	257,038
430	257,379	257,720	258,061	258,402	258,743	259,083	259,424	259,764	260,105	260,445
440	260,785	261,125	261,465	261,804	262,144	262,483	262,823	263,162	263,501	263,840
450	264,179	264,518	264,857	265,195	265,534	265,872	266,210	266,548	266,886	267,224
460	267,562	267,900	268,237	268,574	268,912	269,249	269,586	269,923	270,260	270,597
470	270,933	271,270	271,606	271,942	272,278	272,614	272,950	273,286	273,622	273,957
480	274,293	274,628	274,963	275,298	275,633	275,968	276,303	276,638	276,972	277,307
490	277,641	277,975	278,309	278,643	278,977	279,311	279,644	279,978	280,311	280,644
500	280,978	281,311	281,643	281,976	282,309	282,641	282,974	283,306	283,638	283,971
510	284,303	284,634	284,966	285,298	285,629	285,961	286,292	286,623	286,954	287,285
520	287,616	287,947	288,277	288,608	288,938	289,268	289,599	289,929	290,258	290,588
530	290,918	291,247	291,577	291,906	292,235	292,565	292,894	293,222	293,551	293,880
540	294,208	294,537	294,865	295,193	295,521	295,849	296,177	296,505	296,832	297,160
550	297,487	297,814	298,142	298,469	298,795	299,122	299,449	299,775	300,102	300,428
560	300,754	301,080	301,406	301,732	302,058	302,384	302,709	303,035	303,360	303,685
570	304,010	304,335	304,660	304,985	305,309	305,634	305,958	306,282	306,606	306,930
580	307,254	307,578	307,902	308,225	308,549	308,872	309,195	309,518	309,841	310,164
590	310,487	310,810	311,132	311,454	311,777	312,099	312,421	312,743	313,065	313,386
600	313,708	314,029	314,351	314,672	314,993	315,314	315,635	315,956	316,277	316,597
610	316,918	317,238	317,558	317,878	318,198	318,518	318,838	319,157	319,477	319,796
620	320,116	320,435	320,754	321,073	321,391	321,710	322,029	322,347	322,666	322,984
630	323,302	323,620	323,938	324,256	324,573	324,891	325,208	325,526	325,843	326,160
640	326,477	326,794	327,110	327,427	327,744	328,060	328,376	328,692	329,008	329,324
650	329,640	329,956	330,271	330,587	330,902	331,217	331,533	331,848	332,162	332,477
660	332,792	333,106	333,421	333,735	334,049	334,363	334,677	334,991	335,305	335,619
670	335,932	336,246	336,559	336,872	337,185	337,498	337,811	338,123	338,436	338,748
680	339,061	339,373	339,685	339,997	340,309	340,621	340,932	341,244	341,555	341,867
690	342,178	342,489	342,800	343,111	343,422	343,732	344,043	344,353	344,663	344,973
700	345,284	345,593	345,903	346,213	346,522	346,832	347,141	347,451	347,760	348,069
710	348,378	348,686	348,995	349,303	349,612	349,920	350,228	350,536	350,844	351,152
720	351,460	351,768	352,075	352,382	352,690	352,997	353,304	353,611	353,918	354,224
730	354,531	354,837	355,144	355,450	355,756	356,062	356,368	356,674	356,979	357,285
740	357,590	357,896	358,201	358,506	358,811	359,116	359,420	359,725	360,029	360,334
750	360,638	360,942	361,246	361,550	361,854	362,158	362,461	362,765	363,068	363,371
760	363,674	363,977	364,280	364,583	364,886	365,188	365,491	365,793	366,095	366,397
770	366,699	367,001	367,303	367,604	367,906	368,207	368,508	368,810	369,111	369,412
780	369,712	370,013	370,314	370,614	370,914	371,215	371,515	371,815	372,115	372,414
790	372,714	373,013	373,313	373,612	373,911	374,210	374,509	374,808	375,107	375,406
800	375,704	376,002	376,301	376,599	376,897	377,195	377,493	377,790	378,088	378,385
810	378,683	378,980	379,277	379,574	379,871	380,167	380,464	380,761	381,057	381,353
820	381,650	381,946	382,242	382,537	382,833	383,129	383,424	383,720	384,015	384,310
830	384,605	384,900	385,195	385,489	385,784	386,078	386,373	386,667	386,961	387,255
840	387,549	387,843	388,136	388,430	388,723	389,016	389,310	389,603	389,896	390,188
850	390,481									

17. SCHLUSSBEMERKUNG

Widerstandsthermometer sind keine Entwicklung der Neuzeit. Schon zu Beginn der industriellen Revolution entdeckte H.-C. Oersted im Jahr 1818 die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes der Metalle von der Temperatur. Allerdings dauerte es noch bis 1871, als Werner von Siemens das erste industriell brauchbare Platin-Widerstandsthermometer vorstellte.

Zum Beginn des 18. Jahrhunderts gab es erste Bemühungen, einheitliche Kriterien – Skalen – für die Temperaturmessung zu schaffen. Auch heute, im 21. Jahrhundert, sind diese Bemühungen noch nicht abgeschlossen – auch wenn sich die Diskussion inzwischen um Milli- und Mikro-Kelvin dreht.

Heute hat sich die Temperatur zu der mit Abstand meist gemessenen Messgröße überhaupt entwickelt und liegt weit vor der Druckmessung. Widerstandsthermometer spielen dabei eine entscheidende Rolle – sie sind mit einem Anteil von ca. 40 % an den Produktions- und Einsatzzahlen der Temperatursensoren beteiligt. In bestimmten Industriebereichen, z.B. der Petro- und allgemeinen Chemie, Pharmazie sowie im Bereich der Nahrungs- und Genussmittel, erreichen die Einsatzzahlen 90 % und darüber.

Auch der Trend zu immer kleineren, schnelleren und genaueren Widerstandsthermometern ist ungebrochen. Gleichzeitig werden die nutzbaren Temperaturbereiche stetig nach oben hin erweitert.

Die traditionelle Grenze zwischen Widerstandsthermometern und Thermoelementen in Bezug auf Temperaturbereich und Messunsicherheit verwischt sich mehr und mehr, die Überschneidungen werden größer.

Diese Druckschrift kann naturgemäß nicht alle Aspekte der Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern erschöpfend behandeln. Unser Anliegen war es, dem Praktiker einen möglichst kompletten Überblick über die Bedingungen zu vermitteln, die eine zuverlässige Temperaturmessung in industrieller Umgebung ermöglichen. Alles darüber hinausgehende sei den einschlägigen Veröffentlichungen, Richtlinien und Normen vorbehalten.

18. LITERATURVERZEICHNIS

Fischer, H.: „Werkstoffe in der Elektrotechnik“, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München/Wien 1987

Michalowsky, L.: „Neue Technische Keramikwerkstoffe“, Wiley-VCH-Verlag 1994

Bergmann, W.: „Werkstofftechnik“, Teil 2, Carl Hanser Verlag, München / Wien 1987

Kittel, Ch.: „Einführung in die Festkörperphysik“, Oldenbourg-Verlag, München / Wien 1970

Philippow, E.: „Grundlagen der Elektrotechnik“, 9. Aufl., Verlag Technik, Berlin / München 1992

Beckerath, A. von u.a.: WIKA-Handbuch „Druck- und Temperaturmesstechnik“, ISBN 3-9804074-0-3

Alfa Aesar, A.: Johnson Matthey Company „Forschungsschemikalien, Metalle und Materialien 1999-2000“

Weber, D.; Nau, M.: „Elektrische Temperaturmessungen“, M. K. Juchheim, Fulda, 6. Auflage. Nov. 1997

Körtvelyessy L.V.: „Thermolement Praxis“, Vulkan Verlag, Essen 1987

Weichert, L.: „Temperaturmessung in der Technik“, Expert Verlag, Siedelfingen 1992

Lieneweg, F.: „Handbuch - Technische Temperaturmessung“, Vieweg Verlag, Braunschweig 1976

Autorenkollektiv VDI Berichte 1379, „Temperatur 98“, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1998

VDI/DE-Richtlinien 3511 „Technische Temperaturmessungen“, Blatt 1-5, Düsseldorf 1993

VDI/DE-Richtlinien 3522 „Zeitverhalten von Berührungsthermometern“,

Bonfig, K.W. u.a.: „Technische Temperaturmessung“, Veranstaltungsunterlagen, Haus der Technik e.V., Essen, 1999

Die vorstehende Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Wegen der unübersichtlichen Vielzahl der Veröffentlichungen zum Thema wurde eine mehr willkürliche Auswahl getroffen. Sollte eine wesentliche Veröffentlichung, zitiert oder nur erwähnt, nicht aufgeführt sein, bitten wir um Nachsicht. Bitte informieren Sie uns entsprechend, damit wir die Liste vervollständigen können.



Hubert Topmüller
Experte Ofenbau

Henry Hall (M.A.)
Geschäftsführer

Carsten Tillmann
Experte Stahlindustrie

Frank Elsenbach
Experte Automotive

Jörg Reichelt
Geschäftsführer / Experte Halbleiter

RÖSSEL-MESSTECHNIK – IHR ZERTIFIZIERTER PARTNER

Als zertifizierter Hersteller von Temperaturmesstechnik für Industrie und Forschung erfüllen wir höchste Fertigungsstandards. Mit international anerkannten Zulassungen und Kalibrierungen bieten wir Qualität, auf die Sie sich weltweit verlassen können.



LERNEN SIE UNS KENNEN KONTAKT



 RÖSSEL Messtechnik GmbH
Seidnitzer Weg 9
D-01237 Dresden

 +49 351 312 25-10

 info@roessel-messtechnik.de
 www.roessel-messtechnik.de



 RÖSSEL Messtechnik GmbH
Lohstraße 2
D-59368 Werne

 +49 2389 409-0

 info@roessel-messtechnik.de
 www.roessel-messtechnik.de