

THERMOELEMENTE IN DER INDUSTRIELLEN PRAXIS

Beratung. Lösung. Vorsprung.

IMPRESSUM (VISDP):

Herausgeber:

RÖSSEL-Messtechnik GmbH

Lohstraße 2

D – 59368 Werne

Tel.: +49 2389 409-0

Fax: +49 2389 409-80

E-Mail: info@roessel-messtechnik.de

Autor: Dipl.-Ing. Reinhard Klemm

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: 09/2023

INHALT

1. Einleitung	4
2. Funktionsprinzip der Thermoelemente	4
2.1. Thermoelektrizität, Seebeck-Effekt, Peltier-Effekt, Thomson-Effekt	4
2.2. Der Joule - Effekt	4
2.3. Der Thomson - Effekt	4
2.4. Der thermoelektrische Effekt (Seebeck - Effekt)	5
2.5. Folgerungen	5
2.6. Gesetz der linearen Superposition	6
2.7. Der Peltier - Effekt	6
3. Struktur von Thermoelement- Messkreisen	7
4. Überblick zu Temperaturskalen, Thermopaaren und Normen	8
5. Historischer Überblick	8
6. Die IEC 584-1 (DIN EN 60 584-1) Grundwerte der Thermospannung IEC 60584-1	10
6.1. Nicht-Edelmetall-Thermoelemente gem. DIN EN 60 584-1	10
6.2. Edelmetall-Thermoelemente gem. DIN EN 60 584-1	10
6.3. Thermoelemente Typ L und U	10
6.4. Thermoelement Typ L gem. DIN 43 710 (10/97 zurückgezogen)	10
7. Die IEC 60584-1 (DIN EN 60584-1) Grenzabweichungen	12
8. Grenzabweichung der Anschlussleitung	13
8.1. IEC 60 584-3 Farbkennzeichnung	14
9. Beispiele industrieller Bauformen	14
9.1. Gerade Thermoelemente mit Metall- oder Keramikschutzrohr	14
10. Mantelthermoelemente	16
11. Ansprechverhalten und Einbaulängen	17
11.1. Einbaulänge und Wärmeableitfehler	18
12. Alterung, Drift und Inhomogenitäten	19
12.1. Häufige Fälle von Kontamination	20
12.2. Zusammenfassung	21
13. Schlussbemerkung	21
14. Literaturverzeichnis	23

THERMOELEMENTE IN DER INDUSTRIELLEN PRAXIS

1. EINLEITUNG

In sehr vielen Industriezweigen spielen Wärmebehandlungs- oder Brennprozesse eine entscheidende Rolle im Produktionsablauf und in der Qualität des Endproduktes. Als Beispiele seien Vergütungs-, Härte- oder Normalisierungsprozesse genannt. Der Brennprozess ist entscheidend für die Qualität der Keramik – technische Keramik genauso wie Gebrauchskeramik oder z.B. Ziegel.

Viele Brennprozesse sind dem Wesen nach eigentlich Sinterprozesse – die Herstellung von Sinter- und Hartmetallen fällt in diese Kategorie. Und nicht zu vergessen die Verbrennungsprozesse in Kraftwerken, Müllverbrennungsanlagen und natürlich auch in Verbrennungsmotoren.

Eines jedoch haben alle diese Applikationen gemeinsam:

Fast immer kommen auf Grund der hohen Temperaturen Thermolemente zum Einsatz. Neben den Thermopaaren, die kein Edelmetall enthalten (meist auf Eisen, Nickel und Nickel-Chrom-Legierungen basierend), werden vermehrt solche aus Platin-Rhodium-Legierungen eingesetzt. Für sehr hohe Temperaturen werden Thermopaare aus Wolfram-Rhenium-Legierungen verwendet.

Diese Thermopaare müssen vor kontaminierenden, korrosiven und/oder abrasiven Einflüssen der Umgebungsbedingungen geschützt werden. Eine große Bandbreite verschiedener Bauformen mit unterschiedlichen Schutzrohrwerkstoffen steht dafür zur Verfügung.

2. FUNKTIONSPRINZIP DER THERMOELEMENTE

2.1. Thermoelektrizität, Seebeck-Effekt, Peltier-Effekt, Thomson-Effekt

Diese Betrachtung stellt die Anwendung thermodynamischer Prinzipien auf elektrische Effekte heraus und zeigt die Umwandlung von Wärme in elektrische Energie und umgekehrt.

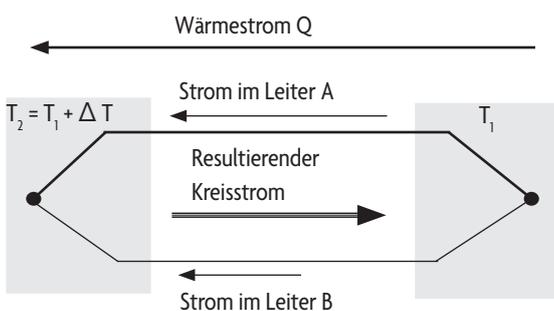


Abb. 1: Schematische Darstellung des Seebeck - Effekts

Um es gleich vorweg zu nehmen: Wärmefluss und Elektronenfluss sind unmittelbar und untrennbar miteinander verbunden. Das Eine existiert nicht ohne das Andere. Daraus ergibt sich zwangsläufig, dass mit Thermoelementen nur und ausschließlich Temperaturunterschiede gemessen werden können.

Diese Temperaturunterschiede werden durch eine Gleichspannung dargestellt, die „Thermospannung“ genannt wird. Andererseits ist die Thermospannung oft eine lästige Fehlerquelle bei genauen Messungen kleiner elektrischer Größen. Um diese systematischen Fehler auszuschalten, ist das Wissen über die thermoelektrischen Effekte notwendig. Im Wesentlichen sind es „nur“ vier Effekte, die zum Verständnis des Funktionsprinzips von Thermolementen notwendig sind:

2.2. Der Joule - Effekt

In einem metallischen Leiter, der von einem elektrischen Strom I durchflossen ist, wird aufgrund des Ohmschen Widerstands R die Joule'sche Wärme erzeugt --> $Q_{\text{Joule}} = I^2 \times R$.

2.3 Der Thomson - Effekt

Ein chemisch homogener Leiter ist physikalisch inhomogen, wenn längs des Leiters ein Temperaturgefälle (Temperaturgradient) herrscht. Die physikalische Inhomogenität wirkt sich auf die Energiezustände der Leitungselektronen aus, ähnlich wie die chemische Inhomogenität an der Kontaktstelle zweier Metalle (Seebeck- / Peltier- Effekt).

Tritt bei einem stromdurchflossenen chemisch homogenen Leiter ein Temperaturgradient auf, so zeigt sich ein kontinuierlich über den ganzen Leiter verteilter Peltier - Effekt, den man als Thomson - Effekt bezeichnet.

Man unterscheidet zwischen positiver Thomson - Wärme (Leiter erwärmt sich bei Stromdurchgang { keine Joule ´sche Wärme!}) und negativer Thomson - Wärme (Leiter kühlt sich bei Stromdurchgang ab). Dies hängt davon ab, wie die Stromrichtung eines von außen aufgeprägten Gleichstromes relativ zum Temperaturgradienten ist.

2.4. Der thermoelektrische Effekt (Seebeck - Effekt)

In einem Leiterkreis aus zwei verschiedenen Metallen entsteht eine elektrische Gleichspannung, wenn die Verbindungsstellen der beiden Metalle (die Kontaktstellen) auf unterschiedlicher Temperatur gehalten werden.

In einem leitfähigen Festkörper, der einem Temperaturgefälle ausgesetzt ist, verschieben sich elektrische Ladungen - ein Effekt, den man Thermodiffusion nennt. Die Ursache für den Aufbau thermoelektrischer Felder (Thermoelektrizität) liegt - vereinfacht ausgedrückt - in der temperatur- und somit ortsabhängigen Geschwindigkeitsverteilung der Ladungsträger. Makroskopisch messbare Effekte treten bei der Kombination verschiedener Materialien auf:

Fügt man beispielsweise zwei Leiter zu einer Schleife zusammen und bringt die Übergangsstellen auf unterschiedliche Temperaturen, so äußert sich die Thermoelektrizität in einem stationären elektrischen Kreisstrom (Abb. 1).

Angetrieben wird er von der sogenannten Thermospannung, welche bei geöffnetem Kreis, d. h. im stromlosen Fall, auch direkt messbar ist (Seebeck-Effekt). Für hinreichend kleine Temperaturunterschiede wächst der Betrag der Thermospannung zumeist linear mit der Temperaturdifferenz der Kontaktstellen an. Bei Temperaturunterschieden von 100 K misst man für Metall-Metall-Kombinationen typischerweise Spannungen von bis zu einigen mV, bei dotierten Halbleitern hingegen von bis zu einigen 100 mV.

Da sich die Thermospannung auf Grund der Thermodiffusion von Ladungen entlang der Leiter ausbildet, hängen die gemessenen Werte empfindlich von den spezifischen Transporteigenschaften der verwendeten Materialien ab. Das bedeutet, dass strukturelle Defekte oder Verunreinigungen bei niedrigen Temperaturen einen großen Einfluss haben.

Der Seebeck-Effekt hat eine wesentliche praktische Anwendung:

Die Thermospannung ist ein Maß für die Temperaturdifferenz, so dass Thermoelemente als Temperatursensoren eingesetzt werden können.

- | Der Wärmetransport ist an den Fluss der „freien“ Ladungsträger gekoppelt.
- | Dadurch wird auf Grund des Thomson-Effekts in beiden Leitern ein Strom erzeugt.
- | Da Material A ungleich Material B ist, sind die Leiterströme unterschiedlich.
- | Daraus ergibt sich in einem geschlossenen Stromkreis ein resultierender Kreisstrom.

2.5. Folgerungen

- | Der Wärmetransport ist untrennbar an den Fluss der freien elektrischen Ladungsträger (Valenzelektronen) gekoppelt.
- | Ein Transport von Ladungsträgern erzeugt immer einen Wärmetransport - umgekehrt erzeugt ein Wärmetransport einen Ladungstransport.
- | Nur wenn in einem Thermopaar aus ungleichen Leitern ein Wärmetransport auf Grund einer Temperaturdifferenz stattfindet, wird eine Thermospannung erzeugt.
- | In einem homogenen Temperaturfeld wird keine Thermospannung erzeugt.
- | In einem homogenen Leiter hängt die Größe der Thermospannung ausschließlich von der Temperaturdifferenz zwischen Mess- und Vergleichsstelle ab.
- | In der Verbindungsstelle (Messstelle) der Heißseite wird keine Thermospannung erzeugt!

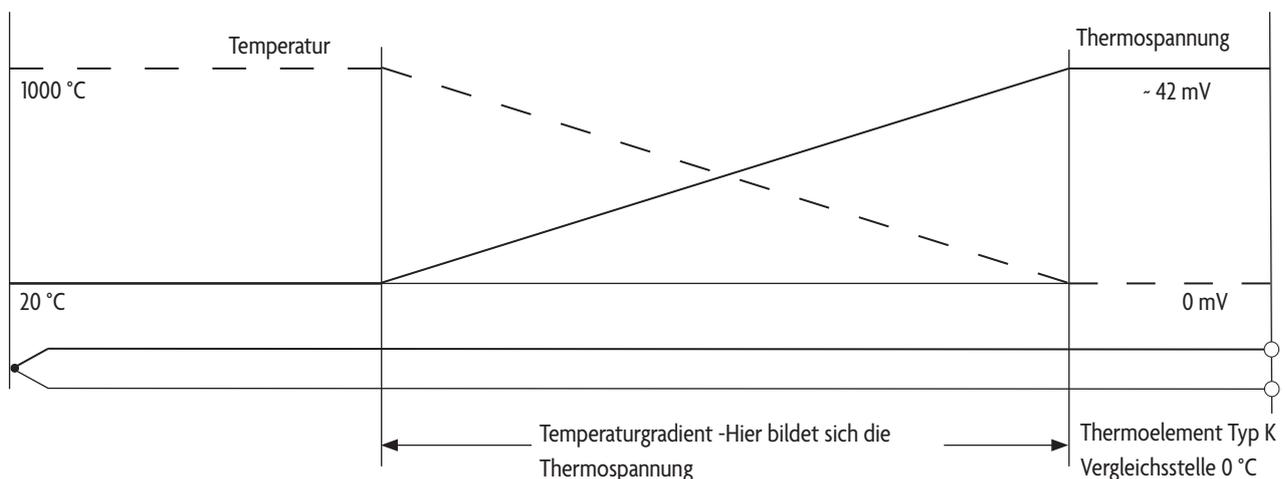


Abb. 2: Schematische Darstellung des Thermospannungsverlaufs

2.6. Gesetz der linearen Superposition

Ein Thermopaar kann man sich als Reihenschaltung (unendlich) vieler, differentiell kleiner Thermoelemente vorstellen, deren Thermospannungen sich linear addieren.

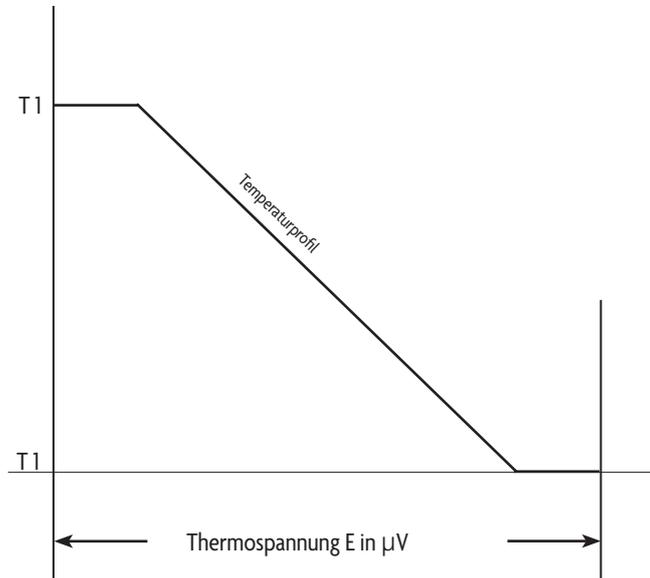


Abb. 3a: Ideales Temperaturprofil

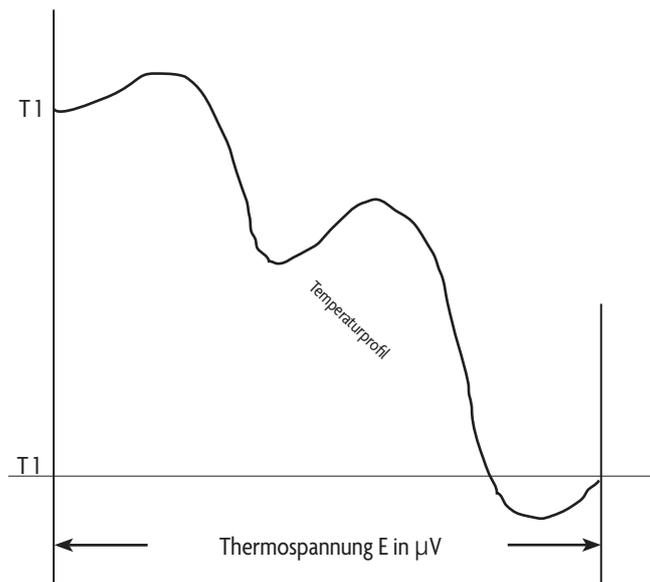


Abb. 3b: Realistisches Temperaturprofil

Die erzeugte thermische Spannung an den Enden der Leiter ist die algebraische Summe aller Teilspannungen entlang der Leiter. Die Polarität der Thermospannung ist von der Richtung des Temperaturgradienten abhängig.

Ein zusätzlich eingebrachter Heißbereich hat keinen Einfluss, da sich die zusätzlichen Thermospannungen gegenseitig aufheben. Für eine gegebene Temperaturdifferenz ist sie stets gleich, unabhängig von der Verteilung der Temperaturgradienten.

2.7. Der Peltier - Effekt

Grundlage für den Peltier-Effekt (Abb. 4) ist der Kontakt von zwei (Halb-) Leitern, die ein unterschiedliches Energieniveau der Leitungsbänder besitzen. Leitet man einen Strom durch zwei hintereinanderliegende Kontaktstellen dieser Materialien, so muss auf der einen Kontaktstelle Wärmeenergie aufgenommen werden, damit das Elektron in das energetisch höhere Leitungsband des benachbarten Halbleitermaterials gelangt, folglich kommt es zur Abkühlung. Auf der anderen Kontaktstelle fällt das Elektron von einem höheren auf ein niedrigeres Energieniveau, so dass hier Energie in Form von Wärme abgegeben wird (Umkehrung des thermoelektrischen Seebeck - Effekts). Pult man die Stromrichtung um, so vertauschen sich Abkühlung und Erwärmung. Der Effekt tritt auch bei Metallen auf, ist hier jedoch sehr gering und wird fast vollständig durch die Stromwärme und die hohe Wärmeleitfähigkeit der Metalle überlagert.

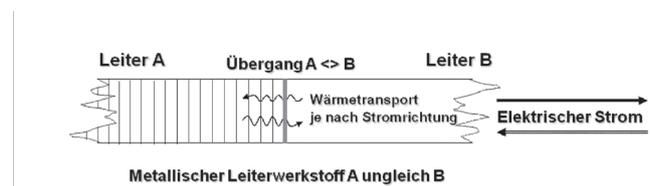


Abb. 4: Peltier Effekt

Ein Peltier-Element (Abb. 5) besteht aus zwei oder mehreren kleinen Quadern je aus p- und n-dotiertem Halbleitermaterial (Bismut-Tellurit, Bi_2Te_3 , Silizium-Germanium), die abwechselnd oben und unten durch Metallbrücken miteinander verbunden sind. Die Metallbrücken bilden zugleich die thermischen Kontaktflächen und sind durch eine aufliegende Folie oder eine Keramikplatte isoliert. Immer zwei unterschiedliche Quader sind so miteinander verbunden, dass sie eine Reihenschaltung ergeben. Der zugeführte elektrische Strom durchfließt alle Quader nacheinander. Abhängig von Stromstärke und -richtung kühlen sich die oberen Verbindungsstellen ab, während die unteren sich erwärmen. Der Strom pumpt somit Wärme von einer Seite auf die andere und erzeugt eine Temperaturdifferenz zwischen den Platten.

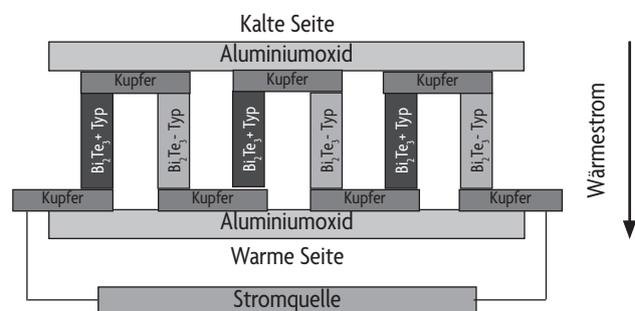


Abb. 5: Peltier Element

3. STRUKTUR VON THERMOELEMENT- MESSKREISEN

Wie bereits im Abschnitt „Funktionsprinzip“ erwähnt, kann ein Thermoelement nur eine Temperaturdifferenz in eine proportionale Thermospannung wandeln. Dieser Zusammenhang ist höchst unlinear und wird mathematisch durch ein Polynom höherer Ordnung beschrieben. Für die praktische Anwendung muss zudem noch eine Vergleichs- oder Referenztemperatur definiert und auch erzeugt oder simuliert werden.

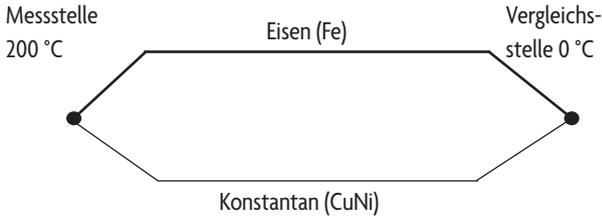


Abb. 6: Grundform eines Thermoelement-Messkreises

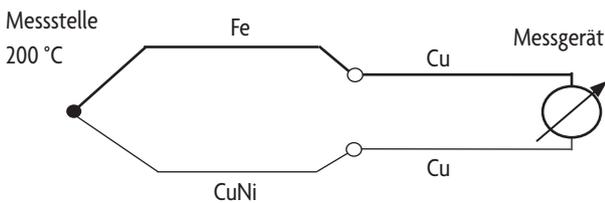


Abb. 7: Thermoelement-Messkreis mit Anzeigergerät

Abbildung 6 zeigt die Grundform eines Thermoelement-Messkreises. Der darin erzeugte resultierende Kreisstrom ist so nicht direkt messbar. Der Messkreis muss also aufgetrennt und an ein Strom- oder Spannungsmessgerät angeschlossen werden. Auf Grund des relativ hohen spezifischen Widerstandes der Thermomaterialien wird kein Strommessgerät verwendet. Stattdessen wird ein Spannungsmessgerät mit hohem Innenwiderstand verwendet, damit die Thermospannung unbelastet gemessen werden kann.

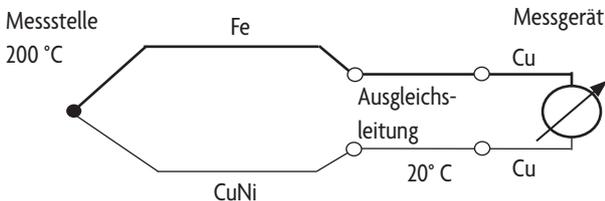


Abb. 8: Thermoelement-Messkreis mit Ausgleichsleitung

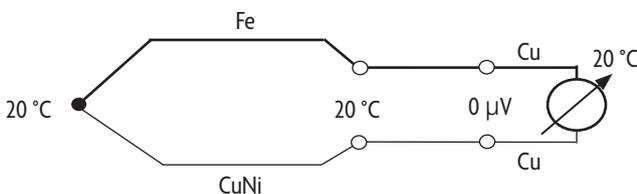


Abb. 9: Nullpunkt des Messgerätes

Dabei wird zwangsläufig ein Materialübergang zwischen den Thermomaterialien und den internen Kupferverbindungen des Messgerätes geschaffen. Dieser Übergang bildet sich als zwei zusätzliche Thermoelemente aus und führt so zu Fehlmessungen.

Wie in Abbildung 8 gezeigt, soll darüber hinaus das Messgerät seine Vergleichsstellentemperatur (z.B. 20 °C) anzeigen, obwohl die Temperaturdifferenz 0 °C ist und damit auch die Thermospannung 0 mV beträgt. Da die Umgebungstemperatur (im obigen Beispiel 20 °C) im Allgemeinen unbekannt und keineswegs stabil ist, muss für eine verlässliche Messung eine stabile und genau bekannte Vergleichs- oder Referenztemperatur verwendet werden.

Als sehr praktikabel und leicht realisierbar (Eis-Wasser-Gemisch) hat sich dafür national und international die Vergleichsstellentemperatur 0 °C durchgesetzt. Alle Tabellenwerte der genormten Thermoelemente basieren auf dieser Vergleichsstellentemperatur.

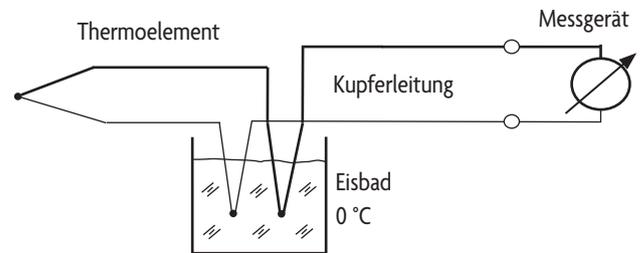


Abb. 10: Klassische Vergleichsstelle

Abbildung 10 zeigt die klassische Methode der Vergleichsstelle unter Verwendung eines „Eisbades“ – einer Mischung aus fein gehacktem Eis aus destilliertem Wasser und ebenfalls destilliertem Wasser. Die Vorteile dieser Methode: hervorragende Stabilität, bekannte Temperatur und einfache Realisierbarkeit. In vielen Kalibrierlabors wird diese Art der Vergleichsstelle nach wie vor angewendet. Dagegen liegt der wesentliche Nachteil klar auf der Hand: für industrielle Messungen ist diese Methode völlig impraktikabel. Dort wird ausschließlich die simulierte Vergleichsstelle angewendet. (Abb. 11)

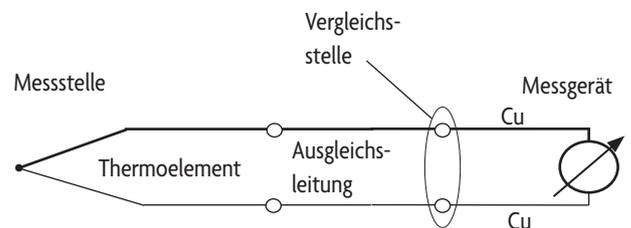


Abb. 11: Simulierte Vergleichsstelle

Abbildung 12 zeigt die analoge Art der Vergleichs-stellenkompensation. Ein Sensor misst die Temperatur des isothermalen Ausgleichsblocks und addiert eine proportionale Spannung (in μV) dem Eingangssignal hinzu. Anschließend wird das Summensignal graphisch oder elektronisch linearisiert und angezeigt.

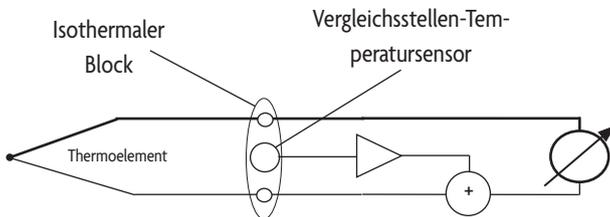


Abb. 12: Analoge Vergleichsstellenkompensation

Die digitale Vergleichsstellenkompensation gemäß Abbildung 13 benutzt ebenfalls einen Sensor zur Messung der Temperatur des isothermalen Ausgleichsblocks. Dieses Signal wird digitalisiert und dem ebenfalls digitalisierten Eingangssignal zuaddiert. Das Summensignal wird mathematisch linearisiert und angezeigt bzw. zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt.

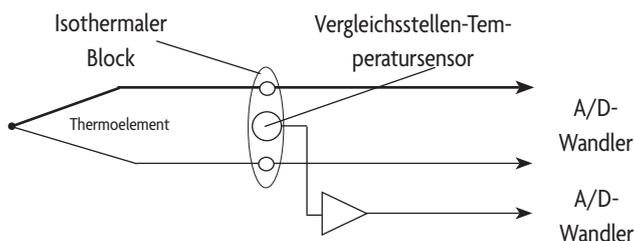


Abb. 13: Digitale Vergleichsstellenkompensation

HISTORISCHER ÜBERBLICK ÜBER DIE ENTWICKLUNG DER TEMPERATURSENSOREN

- 1592 Indirekte Quellen weisen auf Galileo Galilei als Erfinder des offenen Thermoskops hin
- 1642 Erstes geschlossenes Flüssigkeitsthermometer durch Ferdinand II, 5. Großherzog der Toscana
- 1724 Erstes Flüssigkeits-Glasthermometer mit Quecksilberfüllung durch Daniel Gabriel Fahrenheit
- 1745 0 bis 100 Grad Skale basierend auf 2 Fixpunkten durch Carolus Linnaeus und Anders Celsius
- 1800 Entwicklung erster einfacher Bimetallthermometer durch Antoine Louis Bréguet
- 1818 Entdeckung der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von metallischen Leitern durch Hans Christian Oersted
- 1821 Beschreibung des thermoelektrischen Effektes durch Thomas Johann Seebeck
- 1821 Konstruktion des ersten Thermoelements durch Humphry Davy
- 1840 Bau eines Thermoelements aus Eisen (Fe) und Neusilber (CuNi) durch Christian Poggendorf
- 1852 Aufstellung der thermodynamischen Temperaturskala, basierend auf dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik durch William Thomson (später Lord Kelvin of Largs)
- 1871 Konstruktion eines Pt – Widerstandsthermometers durch Werner von Siemens
- 1885 Weiterentwicklung des Pt – Widerstandsthermometers zum Präzisionsinstrument auch für höhere Temperaturen durch Hugh Lonbourne Callendar
- 1887 Herstellung von technischen Thermoelementen durch Henry Louis le Chantelier & Carl Barus
- 1892 Entwicklung des ersten brauchbaren Spektralpyrometers durch Henry Louis le Chantelier

4. ÜBERBLICK ZU TEMPERATURSKALEN, THERMOPAAREN UND NORMEN

Unter der Vielzahl der möglichen Metallkombinationen, aus denen Thermoelemente geformt werden können, wurden bisher zehn ausgewählt und sowohl international als auch national genormt.

Ausgewählt wurden Materialkombinationen, die sich teils aus historischen und teils aus technisch praktischen Erwägungen als praktikabel erwiesen hatten. Wesentliche Kriterien für die Auswahl waren, neben historischen Gründen, unter Anderem:

- ▮ Preis und Verfügbarkeit der Thermomaterialien
- ▮ Stabilität und Wiederholgenauigkeit
- ▮ Austauschbarkeit
- ▮ Weiter Temperaturbereich

Insbesondere wurden die Spannungsreihen (Grundwertreihen), die Grenzabweichungen (auch Toleranz oder Messunsicherheit genannt) und die Farbkodierung genormt und nicht die genaue Materialzusammensetzung. Folgende zehn Thermoelemente sind genormt: Typen E, J, K, N, T, S, R, B, C und A (siehe Absatz 5.2)

5. HISTORISCHER ÜBERBLICK

Unsere heute gültigen nationalen und internationalen Normen sind natürlich mit der Entwicklung der Temperatursensoren und der international als verbindlich anerkannten Temperaturskalen eng verknüpft. Ein kurzer historischer Überblick soll hier ein wenig Klarheit schaffen:

Somit waren Ende des 19. Jahrhunderts im Wesentlichen alle heute noch gebräuchlichen elektrischen Berührungsthermometer und Pyrometer erfunden bzw. entwickelt. Bereits Rømer, Newton, Réaumur, Fahrenheit, Delisle, Celsius, Kelvin und Rankine entwickelten zwischen 1700 und 1860 nach ihnen benannte Temperaturskalen.

Insgesamt sind 71 (!) verschiedene nationale Temperaturskalen bekannt. Davon sind heute aber nur noch die Fahrenheit-, Celsius- und Kelvin-Skale in Gebrauch. Aber auch Poggendorf, Callendar und le Chantelier schlugen auf Fixpunkten basierende Temperaturskalen mit den zugehörigen Normalinstrumenten vor.

ENTWICKLUNG DER INTERNATIONALEN TEMPERATUR SKALEN (ITS)

- 1889** Callendar schlägt 3 Fixpunkte vor: Erstarrungs- und Kochpunkt von Wasser sowie der Kochpunkt von Schwefel mit einem Pt-Widerstandsthermometer als Normalinstrument.
- 1911** Die PTR (später PTB) schlägt zusammen mit dem NPL (England) und BS (später NBS bzw. NIST, USA) eine thermodynamische Skale als erste „International Temperature Scale“ ITS vor.
- 1913** Auf der 5. Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) sollte diese Skale verabschiedet werden. Der bevorstehende Ausbruch des 1. Weltkrieges verhinderte die Konferenz.
- 1923** PTR, NPL und BS etablieren eine Temperatur-Skale, basierend auf Fixpunkten (Erstarrungspunkt Quecksilber bis Kochpunkt Schwefel) und extrapoliert bis 650 °C mit Pt-Thermometern, sowie bis 1100 °C mit Thermoelement Pt10%Rh-Pt - heute als Typ S genormt.
- 1925** Die Skale von 1923 wird nach unten hin bis -193 °C erweitert und oben um die Fixpunkte Antimon, Silber und Gold ergänzt.
- 1927** Die erste „International Temperature Scale of 1927“ wird als ITS 27 von der 7. CGPM angenommen.
- 1937** Es wird das „Consultative Committee on Thermometry“ (CCT) gegründet.
- 1948** Das CCT veranlasst die erste Revision der ITS 27 und setzt sie als ITS 48 in Kraft.
- 1958** Die 1958 4He Skale für den Temperaturbereich 0,5 bis 5,23 K wird eingeführt.
- 1962** Die 1962 3He Skale für den Temperaturbereich < 0.9 K wird eingeführt.
- 1968** Die 2. Revision der ITS 27 wird als IPTS 68 in Kraft gesetzt. Es werden 4 Teilbereiche definiert:
 - (a) 13.81 K bis 273.15 K; Normalinstrument: Pt-Widerstandsthermometer
 - (b) 0 °C bis 630.74 °C; Normalinstrument: Wie (a)
 - (c) 630.74 °C bis 1064.43 °C; Normalinstrument: Thermoelement Pt10%Rh-Pt und
 - (d) über 1064.43 °C; Normalinstrument: Spektral-Pyrometer
- 1976** Das Bureau International des Poids et Mesures (CIPM) etabliert die 1976 Provisional 0.5 K to 30 K Temperature Scale (EPT-76)
- 1990** Die „International Temperature Scale of 1990“ (ITS-90) erlangt am 1. Januar 1990 weltweit Gültigkeit und ersetzt die IPTS 68 und EPT 76.
Allerdings entfallen die Thermoelemente als Normalinstrumente zur Approximierung der ITS 90 zu Gunsten der Pt-Widerstandsthermometer im Bereich von:
13,8 K (-259,35 °C, Tripelpunkt H₂) bis 1234,93 K (961,78 °C, Erstarrungspunkt Ag)

6. DIE IEC 60 584-1 (DIN EN 60 584-1) GRUNDWERTE DER THERMOSPANNUNG

Die ITS 90 ist die zurzeit weltweit verbindliche Temperaturskala und damit die Basis der gültigen Normen DIN IEC 60 571 für industrielle Widerstandsthermometer und DIN EN 60 584 für Thermoelemente. In dieser letztgenannten Norm sind acht Thermoelemente in zwei Gruppen genormt. Die Gruppe der Nicht-Edelmetall- Thermoelemente umfasst die Typen E, J, K, N und T, die Gruppe der Edelmetall-Thermoelemente die Typen S, R und B.

6.1. Nicht-Edelmetall-Thermoelemente gem. DIN EN 60 584-1

Kennbuchstabe	Bezeichnung	Messbereich in °C	Thermospannung in μV
C	W5%Re-W26%Re	0 bis 2315	0 bis 36931
A	W5%Re-W20%Re	0 bis 2500	0 bis 33640
E	NiCr-CuNi	-200 bis 1000	-8825 bis 76373
J	Fe-CuNi	-210 bis 1200	-8095 bis 69553
K	NiCr-Ni	-200 bis 1372	-5891 bis 54886
N	NiCrSi-NiSi	-200 bis 1300	-3990 bis 47513
T	Cu-CuNi	-200 bis 400	-5603 bis 20872

Tabelle 1: Nicht-Edelmetall-Thermoelemente

6.2. Edelmetall-Thermoelemente gem. DIN EN 60 584-1

Kennbuchstabe	Bezeichnung	Messbereich in °C	Thermospannung in μV
S	Pt10%Rh-Pt	-50 bis 1768	-235 bis 18694
R	Pt13%Rh-Pt	-50 bis 1768	-226 bis 21103
B	Pt30%Rh-Pt6%Rh	250 bis 1820	291 bis 13820

Tabelle 2: Edelmetall-Thermoelemente

6.3. Thermoelemente Typ L und U

Im Bereich des Deutschen Instituts für Normung (DIN) hat es für Thermoelemente eine Vorläufernorm gegeben, in der zwei Typen definiert waren:

DIN 43 710: Typ L (Fe-CuNi)
und Typ U (Cu-CuNi)

Von der nominellen Legierung her waren sie mit den Typen J und T der DIN EN 60 584 identisch, allerdings waren die Grundwertreihen unterschiedlich. Die genannte Norm wurde im Oktober 1997 zurückgezogen. Der Typ L war gerade im Anlagenbau (speziell Kraftwerke) in großen Stückzahlen im Einsatz, so dass heute immer noch ein erheblicher Bedarf an diesem Thermoelementtyp besteht. Der Typ U ist mit Rückziehung der DIN-Norm vollkommen bedeutungslos geworden und spielt heute keine Rolle mehr.

Zur Information ist die folgende Tabelle gedacht:

6.4. Thermoelement Typ L gem. DIN 43 710 (10/97 zurückgezogen)

Kennbuchstabe	Bezeichnung	Messbereich in °C	Thermospannung in μV
L	Fe-CuNi	-200 bis 760	-8166 bis 53147

Tabelle 3: Thermoelement Typ L

In der folgenden Graphik (Diagramm 1) ist die erzeugte Thermospannung der Thermoelemente gemäß den Tabellen 1 bis 4 über der Temperatur aufgetragen. Darin ist zu sehen, dass der Zusammenhang zwischen Temperatur und Thermospannung nicht linear ist. Besonders fällt dies im Bereich negativer Temperaturen auf. Zur Linearisierung und Berechnung der Tabellenwerte werden Polynome höherer Ordnung verwendet. Die

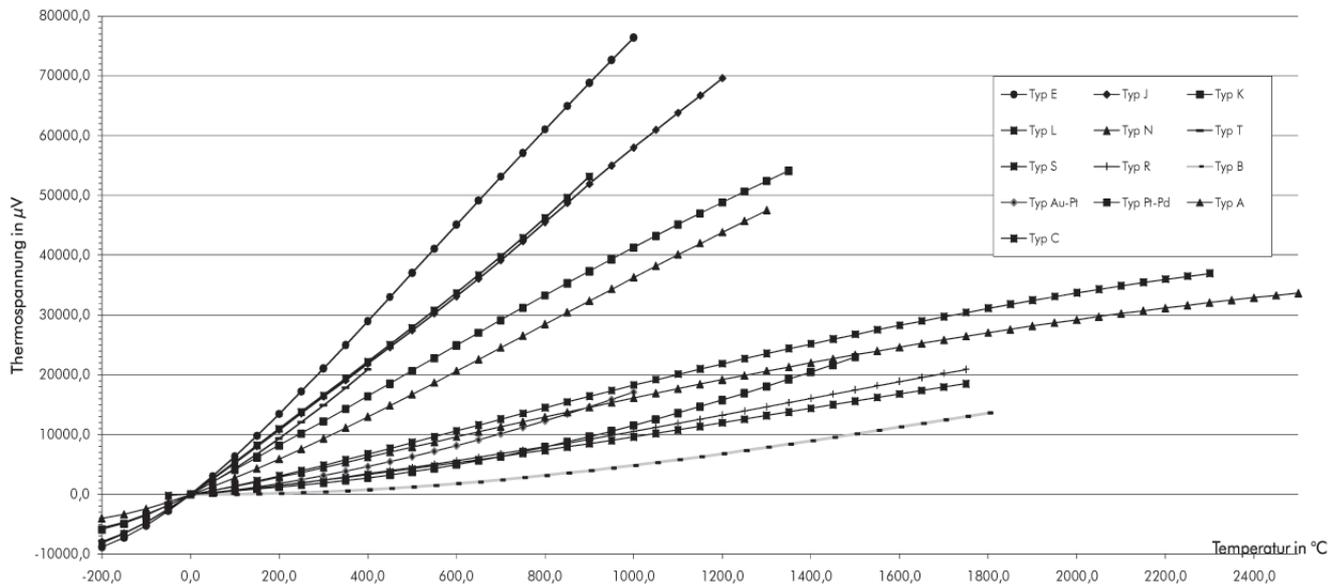


Diagramm 1: Thermospannung als Funktion der Temperatur

Polynomkoeffizienten sind in den angegebenen Normen enthalten. In der Graphik gemäß Diagramm 2 ist die spezifische Thermospannung (Seebeck-Koeffizient) der Thermoelemente gemäß den Tabellen 1 bis 4 als Funktion der Temperatur aufgetragen. Darin ist sehr gut zu sehen, dass der Zusammenhang zwischen Temperatur und Thermospannung

nicht linear ist. Besonders die Thermoelemente der Typen J, K und L können nur durch geteilte Polynome beschrieben werden. Der Typ N – ein im Prinzip modifizierter und auf Stabilität getrimmter Typ K – ist mit einem ungeteilten Polynom zu berechnen.

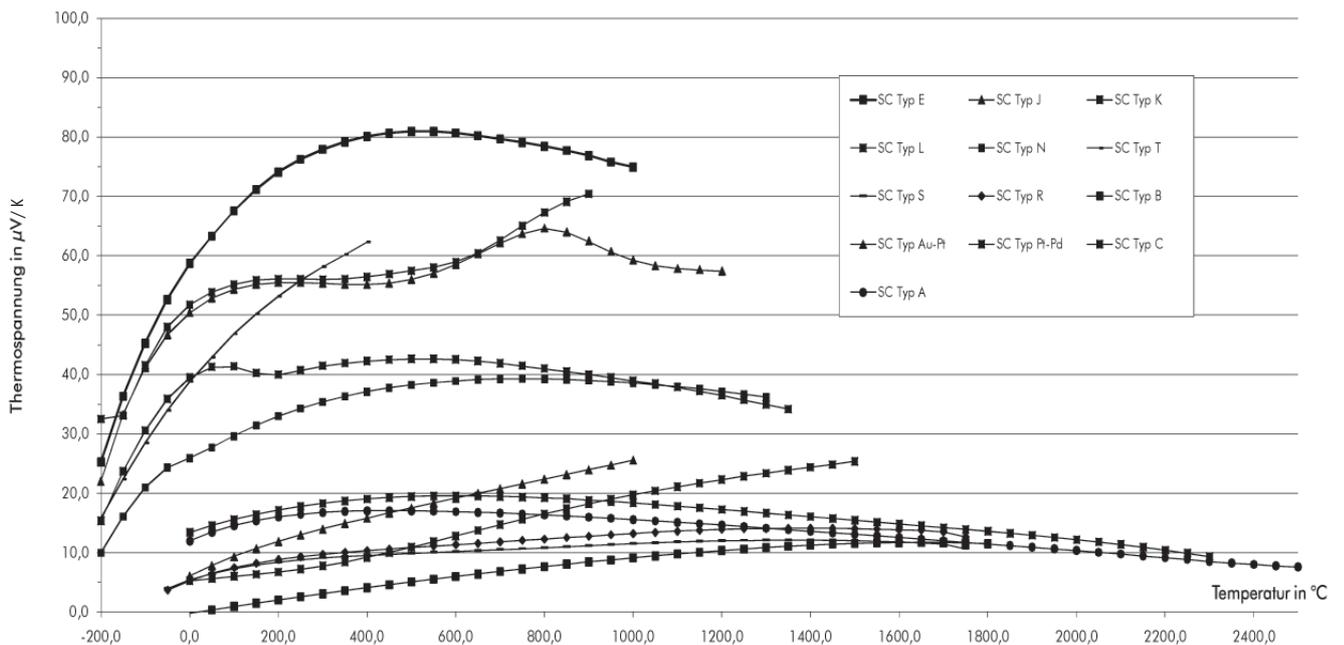


Diagramm 2: Seebeck-Koeffizient als Funktion der Temperatur

7. DIE IEC 60584-1 (DIN EN 60584-1) GRENZABWEICHUNGEN

Auch die Messunsicherheiten – vielfach Grenzabweichung oder Toleranz genannt – sind international und national genormt. Es sind drei Klassen definiert, für die jeweils die Grenzabweichung und der Temperaturbereich (Gültigkeitsbereich) angegeben sind. In der industriellen Praxis haben sich die Klassen 1 und 2 als „quasi“ Standards durchgesetzt. Die Klasse 3 ist den relativ seltenen Tieftemperatur-Applikationen vorbehalten.

Im Zuge der anstehenden Revision der IEC 60 584 werden diese Werte überprüft und ggf. revidiert. Das normalerweise verfügbare

Thermomaterial hält die geforderten Klassengenauigkeiten (Klasse 1 oder 2) ein, aber nicht notwendigerweise auch die Klasse 3. Sind Thermomaterialien der Typen E, J, K, N und T gefordert, die sowohl die Toleranzen der Klasse 2 als auch die der Klasse 3 einhalten, müssen speziell selektierte Materialien verwendet werden.

	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Grenzabweichung	(±) 0,5 °C oder 0,004 * [t]	1 °C oder 0,0075 * [t]	1 °C oder 0,015 * [t]
Typ T (Cu-CuNi)	-40 bis 350 °C	-40 bis 350 °C	-200 bis +40 °C
Grenzabweichung	(±) 1,5 °C oder 0,004 * [t]	2,5 °C oder 0,0075 * [t]	2,5 °C oder 0,015 * [t]
Typ E (NiCr-CuNi)	-40 bis 800 °C	-40 bis 900 °C	-200 bis +40 °C
Typ J (Fe-CuNi)	-40 bis 750 °C	-40 bis 750 °C	---
Typ K (NiCr-Ni)	-40 bis 1000 °C	-40 bis 1200 °C	-200 bis +40 °C
Typ N (NiCrSi-NiSi)	-40 bis 1000 °C	-40 bis 1200 °C	-200 bis +40 °C
Grenzabweichung	(±) 1 °C < 1100 [1 + 0,003(t-1100)] > 1100	1,5 °C oder 0,0025 * [t]	4 °C oder 0,005 * [t]
Typ S (Pt10%Rh-Pt)	0 bis 1600 °C	0 bis 1600 °C	---
Typ R (Pt13%Rh-Pt)	0 bis 1600 °C	0 bis 1600 °C	---
Typ B (Pt30%Rh-Pt6%Rh)	---	600 bis 1700 °C	600 bis 1700 °C
Grenzabweichung	---	(±) 0,01 * (t)	---
Typ C (W5%Re-W26%Re)	---	426 bis 2315 °C	---
Grenzabweichung	(±) 0,005 * (t)	(±) 0,007 * (t)	---
Typ A (W5%Re-W20%Re)	1000 bis 2500 °C	1000 bis 2500 °C	---

Die Grenzabweichung ist in °C angegeben oder als Funktion des Absolutwertes der Temperatur in °C. Es gilt der jeweils größere Wert.
Tabelle 5: Grenzabweichungen der Thermoelemente

8. GRENZABWEICHUNG DER ANSCHLUSSLEITUNG

In der überwiegenden Mehrzahl der Fälle ist das Thermoelement nicht lang genug, um die Entfernung zwischen Installationsort und Auswertegerät zu überbrücken. Daher und auch aus praktischen Gründen sind flexible Anschlussleitungen notwendig. Zwei grundsätzliche Ausführungen sind verfügbar:

Thermoleitungen: Flexible Leitungen, die Thermoelement – Material enthalten. Diese Leitungen haben ein „X“ nach dem Kennbuchstaben des Thermoelementes; z. B. KX oder NX. Das „X“ stammt vom engl. Ausdruck Extension Cable --> Verlängerungsleitung. Manchmal entfällt das „X“ auch in der Typenbezeichnung.

Ausgleichsleitungen: Flexible Leitungen, die Thermoelement – ähnliches Material enthalten. Diese Leitungen haben ein „C“ nach dem Kennbuchstaben des Thermoelementes; z. B. KC oder NC. Ausgleichsleitungen haben nur in einem eng begrenzten Temperaturbereich die gleichen thermoelektrischen Eigenschaften wie das Thermoelement selbst und zudem größere Grenzabweichungen. Das „C“ stammt vom engl. Ausdruck Compensating Cable --> Ausgleichsleitung.

Anmerkungen:

- Ausgleichsleitungen sind nur in Klasse 2 verfügbar - siehe nachfolgende Tabelle.
- Für die Typen J, T, E und L sind nur Thermoleitungen handelsüblich.
- Für die Edelmetalltypen S und R sind Thermoleitungen wegen des extrem hohen Materialpreises nur in Ausnahmefällen gebräuchlich.
- Ausgleichsleitungen für die Typen S und R enthalten das gleiche Leitermaterial.
- Für den Typ B ist keine Ausgleichsleitung spezifiziert - es wird Cu-Leitung verwendet.
- Thermoelemente der Klasse 1, die mit Thermoleitung der Klasse 1 versehen sind, halten normalerweise insgesamt die Klasse 1 ein.

Thermoelemente, die mit Ausgleichsleitung versehen sind, müssen nicht zwangsläufig die Klasse 1 einhalten. Dieser Hinweis ist in der ANSI MC 96 – 1 enthalten. In der IEC 60 584-1 (DIN EN 60 584–1) fehlt dieser Hinweis. Die nachfolgende Tabelle 6 gibt einen Überblick.

Grenzabweichungen

Typ	Klasse 1	Klasse 2	Temperaturbezogener Gültigkeitsbereich	Temperatur der Messstelle
JX	±85 µV (±1,5 °C)	±140 µV (±2,5 °C)	-25 °C bis +200 °C	500 °C
TX	±30 µV (±0,5 °C)	±60 µV (±1,0 °C)	-25 °C bis +100 °C	300 °C
EX	±120 µV (±1,5 °C)	±200 µV (±2,5 °C)	-25 °C bis +200 °C	500 °C
KX	±60 µV (±1,5 °C)	±100 µV (±2,5 °C)	-25 °C bis +200 °C	900 °C
NX	±60 µV (±1,5 °C)	±100 µV (±2,5 °C)	-25 °C bis +200 °C	900 °C
KCA	±60 µV (±1,5 °C)	±100 µV (±2,5 °C)	0°C bis +200 °C	900 °C
KCB	±60 µV (±1,5 °C)	±100 µV (±2,5 °C)	0°C bis +100 °C	900 °C
NC	±60 µV (±1,5 °C)	±100 µV (±2,5 °C)	0°C bis +200 °C	900 °C
RCA	±20 µV (±1,5 °C)	±30 µV (±2,5 °C)	0°C bis +100 °C	1.000 °C
RCB	±30 µV (±2,5 °C)	±60 µV (±5,0 °C)	0°C bis +200 °C	1.000 °C
SCA	±20 µV (±1,5 °C)	±30 µV (±2,5 °C)	0°C bis +100 °C	1.000 °C
SCB	±30 µV (±2,5 °C)	±60 µV (±5,0 °C)	0°C bis +200 °C	1.000 °C
BC		±40 µV (±3,5 °C)	0°C bis +100 °C	1.400 °C
CC		±110 µV (±8,0 °C)	0°C bis +200 °C	1.800 °C
ACA	±40 µV (±3,5 °C)		0 °C bis +100 °C	1.800 °C
ACB		±70 µV (±5,0 °C)	0 °C bis +200 °C	1.800 °C

Anmerkung: Grenzabweichungen sind in Mikrovolt festgelegt. Die Tabelle enthält ebenfalls, in Klammern, die angenäherten Grenzabweichungen in Grad Celsius. Da Temperatur und Thermospannung von Thermo-paaren keinen linearen Zusammenhang haben, hängt die Grenzabweichung in Grad Celsius von der Temperatur der Messstelle des Thermopaars ab, an der die Vergleichsstelle 0 °C ist. Die für die Grenzabweichung in Grad Celsius angegebenen Zahlen in dieser Tabelle gelten für die Messtemperaturen, die in der letzten Spalte der Tabelle angegeben sind. In allen Fällen unterscheiden sich die Abweichungen (ausgedrückt in Grad Celsius) bei niedrigeren Temperaturen.

Tabelle 6: Grenzabweichungen für Anschlussleitungen

Anmerkungen:

- Die angegebene Umgebungstemperatur bezieht sich auf das verwendete Leitermaterial. Der Temperaturbereich der Isoliermaterialien des Kabels kann ggf. abweichend sein!
- Für den Typ B wird im Umgebungstemperaturbereich 0 bis 50 °C Kupferleitung verwendet. Der zu erwartende zusätzliche Messunsicherheitsanteil beträgt max. $\pm 10 \mu\text{V}$ ($\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$) bei einer Mess-temperatur von 1400 °C. Im Bereich 0 bis 100 °C beträgt der Anteil $\pm 40 \mu\text{V}$ ($\pm 3,5 \text{ }^\circ\text{C}$) bei der gleichen Mess-temperatur.
- Die Toleranzen werden in μV angegeben. Die Temperaturangaben in Klammern gelten auf Grund des unlinearen Zusammenhangs zwischen Temperatur und Thermospannung nur bei der angegebenen Messtemperatur. In den meisten Fällen ist der Fehler bei wesentlich niedrigeren oder höheren Messtemperaturen größer.

8.1. IEC 60 584-3 Farbkennzeichnung

Zum Abschluss dieses doch recht trockenen Kapitels über Temperaturskalen, Thermopaare und Normen noch einige Sätze über die Farbkennzeichnung der Thermoelemente, speziell der Thermo- und Ausgleichsleitungen. Da die Thermospannung eine Gleichspannung ist, muss die Polarität der Leitungen eindeutig gekennzeichnet werden.

Kennbuchstabe	+ Pol	- Pol	Mantel
E	violett	weiß	violett
J	schwarz	weiß	schwarz
K	grün	weiß	grün
L*	rot	blau	blau
N	pink	weiß	pink
T	braun	weiß	braun
B	grau	weiß	grau
R	orange	weiß	orange
S	orange	weiß	orange
A	dunkelblau	weiß	dunkelblau
C	rot	weiß	rot

* nicht genormt

Tabelle 7: Farbkennzeichnung

Anmerkungen:

- Die Farbkennzeichnung für den Typ L stammt aus der zurückgezogenen Norm DIN 43 714. Sie wird teilweise jedoch noch immer verwendet.

9. BEISPIELE INDUSTRIELLER BAUFORMEN

Bei den industriellen Bauformen haben sich im Wesentlichen zwei Formen durchgesetzt:

- Gerade Thermoelemente DIN EN 50 446
- Mantelthermoelemente DIN EN 61 515

9.1. Gerade Thermoelemente mit Metall- oder Keramikschutzrohr

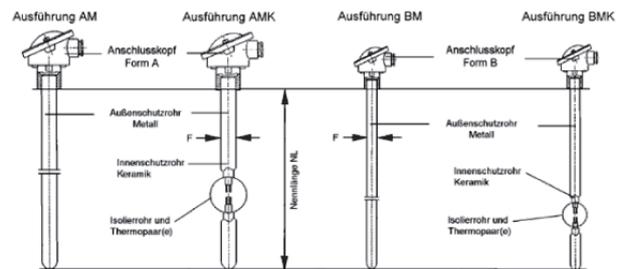


Abb. 14: Gerade Thermoelemente mit Metallschutzrohr

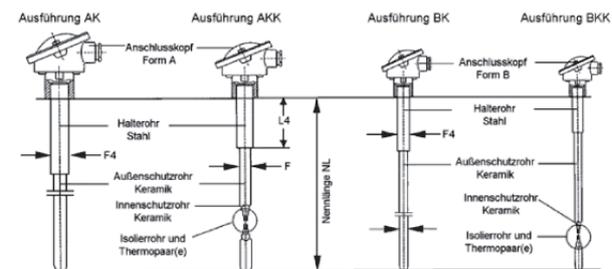


Abb. 15: Gerade Thermoelemente mit Keramiksenschutzrohr

Gerade Thermoelemente bestehen im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- Anschlusskopf zum Anschluss der Thermo- oder Ausgleichsleitung.
- Metallisches oder keramisches Schutzrohr, ggf. mit keramischem Innenschutzrohr.
- Metallisches Halterrohr - nur bei Bauformen mit keramischem Schutzrohr.
- Keramischer Mehrloch-Isolierstab mit Thermopaar.

Die Anschlussköpfe bestehen vorzugsweise aus Aluminium, seltener aus Kunststoff (Polyamid), Edelstahl oder Grauguss. Es sind zwei Größen (Form A und B) verfügbar. In vielen Fällen wird ein Messumformer in den Anschlusskopf eingebaut.

Die metallischen oder keramischen Schutzrohre bilden den „Schutzwahl“ für die Thermopaare gegen die großenteils harschen Betriebsbedingungen bzw. Prozessatmosphären. Als Schutzrohrmaterialien stehen mehrere verschiedene Werkstoffe zur Verfügung.

Tabelle 8 gibt eine kurze Übersicht über die gebräuchlichsten Werkstoffe. Darüber hinaus gibt es eine breite Palette an Sonderwerkstoffen für meist sehr spezielle Anwendungsfälle.

Bei Einsatz von Edelmetall-Thermopaaren in metallischen Schutzrohren wird im Allgemeinen ein keramisches Innenschutzrohr als Schutz vor Kontamination mit Metallionen verwendet. Besonders für Applikationen im höheren Temperaturbereich ist ein keramisches Innenschutzrohr generell zu empfehlen. In die Halterohre aus Metall (Edelstahl Werkstoff Nr.: 1.4571) wird das keramische Schutzrohr mit einem speziellen Keramik Kitt eingekittet. Als Material stehen mehrere verschiedene Werkstoffe zur Verfügung. Tabelle 9 gibt eine kurze Übersicht über die gebräuchlichsten Werkstoffe.

In die keramischen Isolierstäbe – auch Kapillarrohre genannt – werden die Thermopaare (Tabelle 10) eingezogen. Alle genormten Typen sind in Gebrauch. Aus Gründen der Verzunderung und Lebensdauer werden für Nicht-Edelmetall-Thermopaare meist größere Drahtdurchmesser (1,0 – 1,38 – 2,0 und 3,0 mm) verwendet. Bei den Edelmetalltypen werden aus Preisgründen kleinere Drahtdurchmesser (0,5 bzw. 0,35 mm) eingesetzt. Im Anschlusskopf wird ein ebenfalls keramischer Anschlusssockel angebracht. Er trägt die Klemmen zum Anschluss der Thermo- oder Ausgleichsleitung. Isolierstäbe mit 2 bis 16 Kapillaren für 1 bis 8 Thermopaare sind gebräuchlich. Als Keramikmaterialien für Isolierstäbe werden die Typen C 610 für Nicht-Edelmetall-Thermopaare und C 799 für Edelmetall-Thermopaare verwendet.

Die nachfolgende Tabelle bietet einen Überblick über ausgewählte Schutzrohre und Applikationen.

Kennbuchstabe	Name oder Kurzname	Werkstoff Nr.
BF	St 35.8	1.0305
DU	X 18 CrNi 28	1.4749
R	X 10 CrAl 24	1.4762
D	X 15 CrNiSi 2520	1.4841
Y ¹⁾	Incoloy 800	1.4876
CS ¹⁾	Kanthal Super	---
B	X 6 CrNiMoTi 17-12-2	1.4571
N ¹⁾	Molybdän	---
O ¹⁾	Tantal	---

¹⁾ Abweichende Durchmesser

Tabelle 8: Kennbuchstaben für Metallschutzrohre

Kennbuchstabe	Werkstoff nach DIN 40 685 Teil 1 VDE 0335 Teil 1
CX	C 530 (Ker 530)
CY	C 610 (Ker 610)
CZ	C 799 (Ker 710)
RSiC ¹⁾	Siliziumcarbid, rekristallisiert
SiSiC ¹⁾	Siliziumcarbid, reaktionsgebunden

¹⁾ Abweichende Durchmesser

Tabelle 9: Kennbuchstaben für Keramik-Schutzrohre

Kennbuchstabe	Thermopaare DIN EN 60 584
E	NiCr - CuNi
J	Fe - CuNi
K	NiCr - Ni
N	NiCrSi - NiSi
S	Pt10%Rh - Pt
R	Pt13%Rh - Pt
B	Pt30%Rh - Pt6%Rh
C (W5)	W5%Re - W26%Re
A (A)	W5%Re - W20%Re

Tabelle 10: Kennbuchstaben für Thermopaare

10. MANTELHERMOELEMENTE

Mantel - Thermoelemente sind bereits seit vielen Jahren erfolgreich in der Temperaturmesstechnik eingeführt. Die Standardausführungen finden Anwendung in den Bereichen zwischen -270 °C bis $+1200\text{ °C}$ und vereinen in sich die Vorteile der leichten Biegebarkeit mit guter Handhabung und extrem großem Temperaturbereich. Ergänzt werden sie durch Hochtemperatur-Thermoelemente mit Anwendungstemperaturen bis deutlich über 2000 °C .

Als Mantelwerkstoff wird überwiegend Inconel 600 (Werkstoff-Nr.: 2.4816) eingesetzt, eine Nickel-Basis-Legierung. Dieser Werkstoff ist gut schweiß- und lötlbar, hat beste Festigkeitseigenschaften auch bei höheren Temperaturen und widersteht den meisten Umgebungsbedingungen.

Das Thermopaar ist vielfach der Typ K (NiCr – Ni) nach DIN EN 60 584 (IEC 60584). Weit verbreitet ist auch der Typ J (Fe - CuNi) und im höheren Temperaturbereich die Edelmetalltypen S, R und B, basierend jeweils auf Platin-Rhodium-Legierungen.

Die Thermodrähte sind in einer Kompaktisolation aus hochreinem MgO eingebettet und mit einem Metallmantel aus einer Nickel-Chrom-Eisen Legierung oder nichtrostendem Stahl umgeben. Die Kompaktisolation fixiert die Drähte vollständig, so dass weder durch starke Erschütterung noch durch Biegebeanspruchung eine Beschädigung eintreten kann. Auch Kurzschlüsse zwischen den Leitern oder zwischen Leiter und Mantel sind so gut wie ausgeschlossen.

Mantelthermoelemente werden in sehr großen Stückzahlen produziert. Sie decken nahezu alle denkbaren Einsatzbereiche ab. Als Messeinsätze (DIN 43 735) für Schutzrohre (DIN 43 772) in der che-

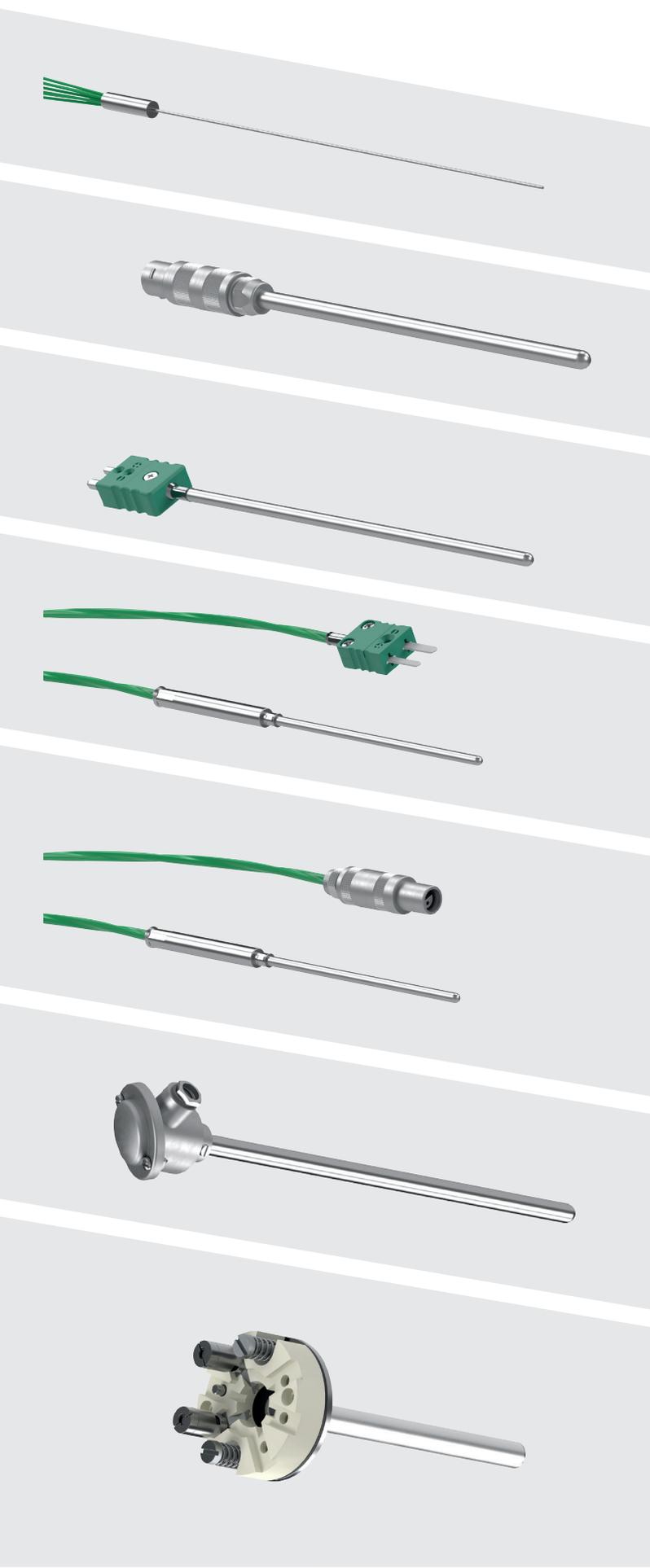
mischen Industrie und im Kraftwerksbau werden sie ebenso eingesetzt wie in den obigen geraden Thermoelementen. Die wesentliche Stärke liegt darin, dass Mantel-thermoelemente (MTE) fein abgestuft den Außendurchmesserbereich von $0,15\text{ mm}$ bis $10,0\text{ mm}$ überdecken. Die Länge eines MTE kann, je nach Außendurchmesser, von einigen Millimetern bis zu einigen 10 Metern reichen. Neben MTE mit nur einem Thermopaar sind auch Ausführungen mit 2 und 3 Thermopaaren verfügbar.

Alle genormten Thermoelementtypen (Tabelle 1 – 4) und Anschlussleitungen (Tabelle 6) sind verfügbar. Mantelthermoelemente sind äußerst robuste Temperatursensoren. Sie sind einfach zu handhaben, leicht biegebar und nahezu unempfindlich gegen Vibrationen.

MTE werden eingesetzt in der Automotive-Industrie, in Kraftwerken, Raffinerien, Hüttenwerken, im Schiffsbau, in der chemischen Industrie, an und in Verbrennungsmotoren, Motorenprüfständen, Gas- und Dampfturbinen, in der Medizintechnik, an Kessel- und Feuerungsanlagen, in der Hüttenindustrie, in der Luftfahrtindustrie, in Vakuum- und Hochvakuumanlagen, in Drucksinteranlagen für Hartmetalle, usw.

Ein guter Wärmeübergang zwischen Metall-Mantel und Thermopaar garantiert kurze Ansprechzeiten ($t_{0,5}$ ab $0,15\text{ s}$) und eine geringe Messunsicherheit. Der kleinste Biegeradius beträgt 5 bis 7 x äußerer Durchmesser. Die Mindest-Einbaulänge sollte den Wert von 20 x Außendurchmesser, mindestens jedoch 50 mm, nicht unterschreiten. Eine Vielzahl unterschiedlicher Bauformen steht zur Verfügung. Nachfolgend eine Übersicht über die gebräuchlichsten Modelle. Darüber hinaus sind spezielle Ausführungen fast immer realisierbar.

11. ANSPRECHVERHALTENUND EINBAULÄNGEN



Bei der **Bauform AL** ist die Anschlussleitung fest angeschlossen. Die Übergangshülse hat 6 mm Ø. Die Standardlänge beträgt 50 mm. Der Leitungstyp (Aderquerschnitt, Isolationsaufbau, Abschirmung) ist in weiten Grenzen variierbar.

Bei **Bauform S** ist das Steckersystem direkt mit dem Mantelthermoelement verbunden. Die Größe der Kupplung ist Typ RLK Gr. 0 (bis 1,6 mm Mantel-Ø), darüber Größe 1. Der Plus-Pol liegt an dem Stift auf. Die Kontakte sind aus Messing und galvanisch vergoldet.

Bei **Bauform STE** ist der Stecker direkt mit dem Mantelthermoelement verbunden. Standard ist ein Mini-stecker (TE-Ø ≤/≠ 1,6 mm) bzw. Standardstecker. Die Kontakte sind aus Thermoelementmaterial gefertigt, der Außenkörper aus temperaturbeständigem Kunststoff.

Der **Typ ALSTE** ist die Erweiterung der Bauform AL um einen Thermo-elementstecker. Diese Ausführung wird je nach Spezifikation mit einem Mini- bzw. Standardstecker versehen. Die Kontakte sind aus Thermoelementmaterial gefertigt, der Außenkörper aus temperaturbeständigem Kunststoff.

Die **Bauform ALS** ist die Erweiterung der Bauform AL um eine Rundkupplung. Diese Ausführung wird je nach Spezifikation bzw. Kabeldurchmesser mit einer Rundkupplung Gr. 0 oder 1 versehen. Andere Größen sind ebenfalls möglich. Die Kontakte sind aus Messing, vergoldet, gefertigt. Der Außenkörper ist ebenfalls aus Messing und matt verchromt.

Diese **Bauform (z.B B-KB)** besteht aus einem Messeinsatz mit Anschlusssockel und Mantelklemmen, eingebaut in einen Aluminium-Anschlusskopf der Form B nach EN 50 446. Eine spezielle Rohrhalteverschraubung fixiert den Messeinsatz. Angegeben ist die Nennlänge ab Unterkante Halteverschraubung. Andere Köpfe sind auf Wunsch lieferbar.

Messeinsatz mit Anschlusssockel, Mantelklemmen und Andrückvorrichtung. Geeignet zum Einbau in Anschlussköpfe Form B

- A. Manteldurchmesser 3,0 mm, durchgehend
- B. Manteldurchmesser 6,0 mm, durchgehend
- C. Manteldurchmesser 6,0 mm, Messspitze auf 8 mm Ø x 50 mm Länge verstärkt
- D. Manteldurchmesser 8,0 mm, durchgehend

Die Ansprechzeit eines Berührungsthermometers gibt an, wie schnell das Thermometer einer sprunghaften Temperaturänderung folgt. Die VDI/VDE/VDE Richtlinie Empfehlung 3522 „Dynamisches Verhalten von Berührungsthermometern“ beschäftigt sich intensiv mit diesem Thema und zeigt den schematischen Aufbau von Geräten zur Messung der Sprungantwort.

Das Zeitverhalten eines Temperatursensors wird durch eine Exponential-Funktion 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 %, die sogenannte Halbwertszeit, bzw. 90 % seines Endwertes erreicht. In Abbildung 15 ist diese Funktion aufgetragen.

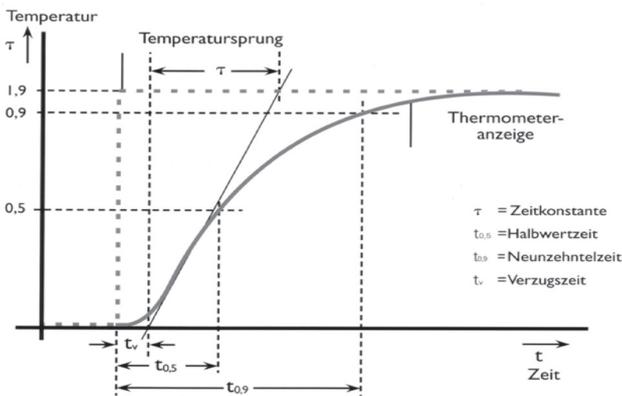


Abb. 16: Ansprechverhalten

Zu Grunde gelegt sind folgende Parameter:

- █ Laminare Luftströmung mit 2 m/s; 10 bis 15 °C
- █ Temperatursprung ab Raumtemperatur
- █ Laminare Wasserströmung mit 0,2 m/s
- █ Temperatursprung von ca. 25 °C auf ca. 35 °C
- █ Normalluftdruck 1013 hPa

Richtwerte der Ansprechzeit von Mantelthermoelementen in Sekunden (-5 % / + 15 %)

Messbedingung	Wertezeit	Messstelle vom Mantel isoliert Manteldurchmesser in mm						
		0,5	1,0	1,5	3,0	4,5	6,0	8,0
Wasser 0,2 m/s	50 %	0,06	0,15	0,21	1,2	2,5	4,0	7
	90 %	0,13	0,5	0,6	2,9	5,9	9,6	17
Luft	50 %	1,8	3	8	23	37	60	100
	90 %	5,9	15	25	80	120	200	360

Tabelle 11: Ansprechzeit

Hinweise:

Die Ansprechzeiten für Thermoelemente, bei denen die Messstelle mit dem Boden verschweißt ist, sind ca. 10 bis 15 % kürzer. Widerstandsthermometer haben eine ca. 15 bis 25 % längere Ansprechzeit als gleichartig aufgebaute Thermoelemente.

11.1. Einbaulänge und Wärmeableitfehler

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

In Tabelle 12 sind die empfohlenen minimalen Einbaulängen für Temperatursensoren mit und ohne Schutzrohr aufgeführt. Einbaulänge = Medienberührte Länge

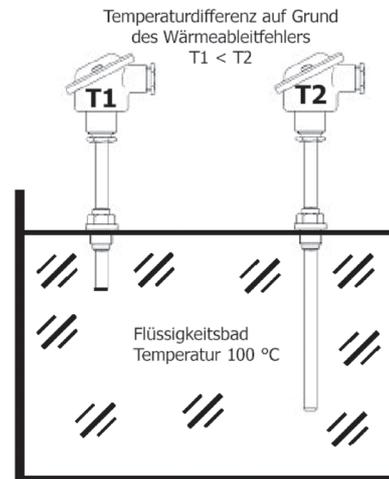


Abb. 17: Wärmeableitfehler

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 Einbaubedingungen, 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 nachfolgende Tabelle bietet Anhaltspunkte für die empfohlene Eintauchtiefe von Mantelthermoelementen.

	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 bis 30	45 bis 60	75 bis 120
flüssig ²⁾	8 bis 15	15 bis 30	25 bis 50
fest ³⁾	8 bis 12	15 bis 20	20 bis 30

Tabelle 12: Eintauchtiefe

Als generelle Richtwerte können folgende Faustformeln angewendet werden:

**Bei Einsatz in Gasen Mindesteinbaulänge
15 bis 20 x Außendurchmesser**

**Bei Einsatz in Flüssigkeiten min. Einbaulänge
5 bis 10 x Außendurchmesser**

12. ALTERUNG, DRIFT UND INHOMOGENITÄTEN

Temperaturfühler unterliegen während ihrer bestimmungsgemäßen Anwendung einer betriebsbedingten, unvermeidbaren Veränderung! Diese Änderung ist nicht reversierbar.

Dieser äußerst komplexe Vorgang wird weithin unter dem Begriff „Drift“ oder auch „Alterung“ zusammengefasst. Das Langzeitverhalten (die Langzeitstabilität) eines Temperaturfühlers unter Einsatzbedingungen ist das Ergebnis einer ganzen Reihe von Einflussfaktoren.

Diese Faktoren können metallurgischer, chemischer oder physikalischer Art oder einer Kombination daraus sein. Den Driftprozess eines Temperaturfühlers unter gegebenen Betriebsverhältnissen vorherzusagen ist praktisch nicht möglich.

Grob gerastert gibt es drei wesentliche Ursachenbereiche für eine Drift:

- Mechanische Veränderungen des Thermometers oder Sensorelements
- Metallurgische Veränderungen des Sensorwerkstoffes durch Änderungen der Kristallstruktur
- Metallurgische Veränderungen des Sensorwerkstoffes durch Kontamination.

Die wichtigsten Formen der mechanischen Veränderungen sind scharfe Biegungen unterhalb des zulässigen Mindestbiegeradius, hohe Prozessdrücke sowie schnelle Temperaturwechsel – speziell schnelle Abkühlgeschwindigkeiten.

Metallurgische Veränderungen der Sensorwerkstoffe durch Veränderungen der Kristallstruktur finden in praktisch allen Zwei- und Mehrstofflegierungen statt. Bekannt ist der sogenannte K-Effekt (Short range ordering effect) beim Thermoelement Typ K. Er bewirkt eine Inhomogenität des Thermoelements. Aber auch alle anderen nicht Edelmetall-haltigen Thermoelemente, bei denen ein Schenkel aus einer NiCr-Legierung besteht, weisen diesen Effekt mehr oder weniger stark auf. Selbst bei den PtRh-Thermoelementen ist dieser Effekt vorhanden – sehr klein, aber nachweisbar.

Bei den W-Re-Thermoelementen ist ein Rekristallisations-Prozess in dem niedriger legierten Schenkel bei den ersten Heizperioden über ca. 1280 °C recht ausgeprägt. Er führt zu einer permanenten Veränderung und kann bis zu 0,4 % vom Messwert ausmachen.

Die metallurgische Veränderung des Sensorwerkstoffes durch Kontamination ist eine der häufigsten Ursachen für eine Drift. Damit die Thermospannungen der Thermopaare den normativen Vorgaben entsprechen, müssen die Legierungen bzw. die Reinheit der Thermodrähte ziemlich exakt eingehalten werden. Die Thermopaare reagieren durchweg sehr empfindlich auf metallische Verunreinigungen, die die Legierungen in ihrer Zusammensetzung verändern.

Verunreinigungen im Bereich weniger ppm können je nach Thermopaar bereits erhebliche Abweichungen von der Grundwertreihe erzeugen. Thermopaare, bei denen ein Schenkel aus einem reinen Metall besteht, reagieren besonders empfindlich auf Verunreinigungen. Diese Fremdmaterialien können aus dem Mantelmaterial, dem Schutzrohrwerkstoff, der Isolierkeramik oder dem Prozessmedium stammen.

Aber auch die beiden Schenkel eines Thermopaares beeinflussen sich bei höheren Temperaturen gegenseitig durch Diffusionsmechanismen – z.B. an der Verbindungsstelle (Schweißstelle, auch Thermoknoten genannt). Bekannt ist die Rhodiumdiffusion in Pt-Rh-Thermoelementen über die Schweißstelle hinweg.

Die folgende Tabelle 13 zeigt den Einfluss verschiedener typischer Verunreinigungen auf die Thermospannung eines Drahtes aus reinem Platin (Reinheit > 99,99 %)

Element	dU_{th} in $\mu V/ppm$	Element	dU_{th} in $\mu V/ppm$
Fe (Eisen)	2,30	Cu (Kupfer)	0,07
Ni (Nickel)	0,50	Pd (Palladium)	0,03
Ir (Iridium)	0,35	Ag (Silber)	-0,07
Mn (Mangan)	0,32	Au (Gold)	3,00
Rh (Rhodium)	0,20	Pb (Blei)	4,04
Cr (Chrom)	0,12	Si (Silizium)	- 20

Tabelle 13: Kontamination

12.1. Häufige Fälle von Kontamination

- | Reine Materialien wie Fe, Cu und Pt driften durch Eindiffundieren von Fremdatomen. Edelmetalle reagieren stärker als unedle Metalle.
- | Starke Pt – Gifte sind Si und P. Si legiert Pt zu einer spröden Legierung mit einem Schmelzpunkt von 1340 °C. P bewirkt eine extreme Versprödung und den Zerfall des Drahtes bei Temperaturwechsel.
- | Bei Pt – Thermopaaren findet Rhodiumdiffusion über die Messstelle hinweg statt → Messfehler bei Temperaturgradienten.
- | Zweistofflegierungen neigen zu Anfangsdriften auf Grund des Ausheilens von produktionsbedingten Gitterspannungen und –defekten.
- | NiCr – Schenkel reagieren empfindlich auf eindiffundierten Schwefel und Wasserstoff.
- | Typ K und N Thermoelemente zeigen eine vergleichsweise geringe Drift bezüglich Verunreinigung, da beide Schenkel in die gleiche Richtung driften und sich in Summe daher thermoelektrisch weitgehend aufheben.

Abschließend sei hier beispielhaft die sogenannte Grünfäule (selektive Chrom-Oxidation) genannt. Grünfäule tritt vorzugsweise in NiCr – Legierungen unter sauerstoffarmer oder reduzierender Atmosphäre in Verbindung mit Feuchtigkeit im Temperaturbereich ab ca. 800 – 1000 °C auf.

Die Feuchtigkeit kann sich aus eindiffundiertem Wasserstoff und dadurch reduziertem Metalloxid – dem Isolierstoff im Innern des Mantelthermoelements - bilden. Das Wasser wird an den heißen Metalloberflächen in Wasserstoff und Sauerstoff dissoziiert.

Der Leiter verarmt an Chrom durch Bildung von Chromoxid, da eine stabilisierende „Haut“ aus Nickeloxid zu Nickelhydrid reduziert wird. Nickelhydrid kann je nach Temperatur-Druck-Verhältnis gasförmig sein. Es diffundiert in Richtung kaltes Ende des Thermoelements und zerfällt dort zu metallischem Nickel. Die Messstelle „wandert“ quasi zum kalten Ende hin, was zu einem Messfehler von bis zu einigen 100 K führen kann.

12.2. Zusammenfassung

Drift: Eine Änderung der Anzeige oder eines Sollwertes über eine lange Zeitspanne auf Grund verschiedener Faktoren, wie z.B. Änderung der Umgebungsbedingungen, Änderung der Einsatzbedingungen, Alterung von Bauteilen, Alterung des Sensors, Kontamination, etc.

Fazit: Das Messergebnis wird im Laufe der Zeit zunehmend unsicherer, da der Verlauf der Drift nicht vorhersehbar und damit nicht bekannt ist. Speziell die Alterung von Thermoelementen ist nicht kalkulierbar!

Wesentliche Einflussfaktoren, die zu Drift (Alterung) bei elektrischen Berührungsthermometern führen:

- | Hohe Dauergebrauchstemperatur
- | Rapide Temperaturwechsel
- | Hohe Abkühlgeschwindigkeiten
- | Kontamination durch Prozessmedien
- | Zersetzung durch Prozessmedien
- | Kontamination durch Metall - Ionen - Diffusion
- | Weitere durch Herstellung und Bauform bedingte Einflüsse

Drift ist auch bei bestimmungsgemäßigem Gebrauch des Sensors grundsätzlich vermeidbar.

13. SCHLUSSBEMERKUNG

Wie schon in Kapitel 5 dargestellt, war die Entwicklung der berührenden Temperatursensoren mit Ausgang des 19. Jahrhunderts prinzipiell abgeschlossen. Die kontaktlose (berührungslose) Temperaturmessung begann dagegen erst um 1890. Heute nimmt sie gegenüber den Berührungsthermometern einen stetig zunehmenden Raum ein.

Schon zu 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.

Die reine Entwicklung der Temperatursensoren hat rund 250 Jahre gedauert. In den nachfolgenden ca. 110 Jahren bis heute hat sich die Temperatur zu der meist gemessenen Messgröße überhaupt entwickelt. Thermoelemente spielen dabei eine entscheidende Rolle – sie sind mit einem Anteil von ca. 60 % an den Produktions- und Einsatzzahlen beteiligt.

Am Funktionsprinzip der Temperatursensoren hat sich seit den Anfängen im 17. Jahrhundert nichts Grundlegendes geändert. Der scheinbare Nachteil, dass der elektrische Messwert der Thermoelemente im Bereich weniger Millivolt liegt, ist durch die moderne Gerätetechnik mehr als ausgeglichen.

Die Möglichkeit, speziell Thermoelemente fast problemlos an praktisch jede industrielle Messaufgabe anpassen zu können, machen sie zu einem nahezu idealen Sensor.

Die nachfolgende Tabelle bietet einen Überblick über ausgewählte Schutzrohre und Applikationen.

Werkstoff	Max. Einsatz-Temp. °C	Eigenschaft/Anwendung	Bemerkung
Titan	600	Härtebäder	An Luft stark oxidierend
Reineisen 1.1003	900	Salpeter-, Chlorid-, zyanidhaltige Salzbäder	
Stahl, emailliert	600	Zinkschmelzen	
1.0305	900	Anlassöfen, Salpeterbäder bis 500 °C, Lagermetall-, Blei- und Zinnschmelzen bis 650 °C	Bei Bleioxidbildung mit Hartchrombeschichtung
1.4571	800	Gute chemische Beständigkeit	Weitgehend säurebeständig
1.4762	1200	Hohe Resistenz gegen schwefelhaltige Gase (oxidierend und reduzierend), mittlere Beständigkeit gegen Aufkohlung	
1.4749	1100	Blei- und Zinnschmelzen, Glüh- und Härteprozesse mit schwefel- und kohlenstoffhaltigen Gasen	
1.4772	1250	Kupfer- und Messingschmelzen	
1.4821	1350	Salpeter-, Chlorid-, zyanidhaltige Salzbäder	
1.4841	1200	Zyanbäder bis 950 °C, Bleischmelzen bis 700 °C, Öfen mit stickstoffhaltigen, sauerstoffarmen Gasen	
Grauguss (GG 22)	700	Lagermetall-, Blei-, Aluminium- und Zinkschmelzen	
GG mit keram. Besch.	800	Aluminium- und Zinkschmelzen	
Cr-Al-Oxid CrAl ₂ O ₃ 77/23	1200	Gasdicht, oxidationsbeständig, thermoschockbeständig, Kupfer-, Zinn-, Zink-, Magnesium-, Bleischmelzen, Zementöfen, SO ₂ -, SO ₃ -Gas, H ₂ SO ₄ -Säure	Nicht für Al- und Glasschmelzen sowie Salzbäder
Molybdändisilizid MoSi ₂	1700	Abriebfest, schlagfest, sehr thermoschockbeständig, verglast an der Oberfläche, chemisch resistent, Müllverbrennung, Wirbelschichtfeuerung	Spröde bei niedriger Temperatur, ab ca. 1400 °C zäh
Molybdän-Zirkonoxid MoZrO 60/40	1700	Thermoschockbeständig, hart schlagfest, Gusseisen-, Kupfer-, Zinkschmelzen + Schlacken, BaCl - Härtebäder	Oxidiert in Luft ab 500 °C
C 530	1500	Gase aller Art bei Ausführung AKK, thermoschockbeständig,	Gasdichtes Innenrohr in geraden Thermoelementen
C 610	1600	Gase aller Art bei Ausführung AKK, weniger thermoschockbeständig als C 530	Gasdichtes Innenrohr in geraden Thermoelementen
C 799	1600	Gase aller Art, Berührung mit Flusssäure-, Metalloxid- Alkalidämpfen, Glaswannen	Glasschmelzen mit Platin-Überzug
Siliziumcarbid SiC, rekristallisiert	1300	Gasdicht, mechanisch hoch belastbar, sehr thermoschockbeständig, hohe thermische Leitfähigkeit, 8 – 12 % freies Silizium	Nicht für Al- und Cu-Schmelzen
Siliziumcarbid SiC, reaktionsgebunden	1600	Porös, mechanisch hoch belastbar, hohe thermische Leitfähigkeit, unter Schutzgas oder im Vakuum bis 2000 °C einsetzbar	Nicht für Al-, Cu-, Ni-, Fe-Schmelzen, mittlere Thermoschockbeständigkeit
Siliziumnitrid Si ₃ N ₄	1000	Thermoschockbeständig, keine Benetzung in Aluminium- und Messingschmelzen	Schlagempfindlich
Siliziumnitrid/Aluminiumoxid Si ₃ N ₄ + Al ₂ O ₃	1300	Thermoschockbeständig, Kupfer-, Aluminiumschmelzen	
Graphit	1250	Sauerstofffreie Kupfer-, Messing-, Aluminiumschmelzen	Hohe Oxidation an Luft
Aluminiumtitanat Al ₂ TiO ₅	1000	Gasdicht, Aluminiumschmelzen	Schlagempfindlich
Saphir	2000	Monokristallines Aluminiumoxid, gasdicht, durchsichtig, Halbleiterindustrie	Schlagempfindlich, mittlere Thermoschockempfindlichkeit

Die vorstehende Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Alle Hinweise sind unverbindlich und stellen keine zugesagte Eigenschaft dar. Sie sind unter dem Gesichtspunkt des jeweiligen Einsatzfalles genauestens zu überprüfen

14. 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 „Forschungschemikalien, Metalle und Materialien 1999-2000“

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

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

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

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

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

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

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

Die vorstehende Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. 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

Achim Küppers

Experte Stahlindustrie

Frank Elsenbach

Experte Automotive

Jörg Reichelt

Geschäftsführer / Experte Halbleiter

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

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.



CENTROC  L
Kalibrierlabor DAkkS D-K-17734-01-00

