

ABB MEASUREMENT & ANALYTICS

Industrielle Temperatur-Messtechnik

Grundlagen und Praxis



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.

Die Übersetzung sowie die Vervielfältigung und Verbreitung in jeglicher Form – auch als Bearbeitung oder in Auszügen – insbesondere als Nachdruck, photomechanische oder elektronische Wiedergabe oder in Form der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen oder Datennetzen ohne Genehmigung des Rechteinhabers sind untersagt und werden zivil- und strafrechtlich verfolgt.

Der Herausgeber und das Autorenteam bitten um Verständnis, dass bei der großen Menge der aufgeführten Daten keine Gewähr für die Richtigkeit übernommen werden kann.

Im Zweifelsfall gelten die angegebenen Originaldokumente, Richtlinien und Normen.

© 2013 ABB Automation Products GmbH

Industrielle Temperatur-Messtechnik

Grundlagen und Praxis

Vorwort

Automatisierungstechnik ist eine weltweit wachsende Schlüsseltechnologie. Die Triebfedern des Wachstums sind unterschiedlich ausgeprägt und reichen vom Bedürfnis nach Basisversorgung für Nahrung und Energie, über wirtschaftliche und ökologische Anforderungen zur effizienten und emissionsarmen Nutzung von Ressourcen und Energie bis hin zur Steigerung der Produktivität in allen Herstellungs- und Verteilungsprozessen.

Durch enorm wachsende Märkte in einigen Regionen der Welt und die zunehmende Vernetzung zwischen diesen, entstehen neue Herausforderungen und auch ungeahnte Chancen.

Das immer engere Zusammenwirken der eigentlichen Messtechnik in verfahrenstechnischen Prozessen, die Informationsübertragung und deren qualifizierte Bewertung ist eine traditionelle Kernaufgabe und zugleich fundamentale Stärke der kompetenten ABB-Ingenieure im weltweit operierenden Automatisierungsbereich.

Die Temperatur ist dabei für viele Prozesse in den unterschiedlichsten Anlagen die wichtigste Messgröße. Die Bandbreite der Applikationen der meist direkt im Prozessmedium befindlichen Messstellen bedeutet oft eine große Herausforderung für den Messtechniker in der Praxis.

Mit diesem Handbuch der industriellen Temperaturmessung möchten wir den Praktiker bei der Lösung seiner vielfältigen Aufgaben unterstützen. Gleichzeitig soll es dem interessierten Neueinsteiger die wichtigsten Grundlagen der Messprinzipien und deren Einsatzgrenzen in anschaulicher Form vermitteln.

Die Inhalte umfassen Basisthemen der Materialkunde und Messtechnik sowie Applikationen, Signalaufbereitung und Feldbus-Kommunikation. Praxisorientiert wird die Auswahl geeigneter Temperaturfühler für die Prozesswelt sowie die gewünschte Kommunikationsfähigkeit der Messstellen behandelt.

Der Standort Alzenau ist innerhalb der ABB das globale Kompetenzzentrum für Temperatur und mit zahlreichen vor Ort agierenden Experten in den wichtigsten Industrie-Regionen der Welt verantwortlich für die weltweiten Aktivitäten in diesem Bereich.

125 Jahre Temperatur-Messtechnik bedeuten Erfahrung und Kompetenz. Sie sind gleichzeitig eine wichtige Grundlage für zukünftige Innovationen. In enger Zusammenarbeit mit unseren Kunden und Anwendern erarbeiten unsere Applikationsingenieure Konzepte für die anstehenden Messaufgaben. Unsere Branchen-Teams unterstützen die Planer, Anwender und Verbraucher bei der Erarbeitung professioneller Lösungen.

Modernste Entwicklungen, unterstützt durch ein Netzwerk von global organisierten ABB-Forschungszentren, stellen innovative Produkte und Lösungen sicher. Leistungsfähige Werke und engagierte Mitarbeiter produzieren nach neuesten Methoden und Fertigungsverfahren. Kompetente und freundliche Beratung in Verkauf und Service runden das ABB-Angebot ab.

Wir wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen und viel Erfolg bei der praktischen Nutzung des Handbuchs. Bedanken wollen wir uns bei allen Autoren, die zur Erstellung dieses Buches beigetragen haben. Außerdem freuen wir uns auf Ihre Anregungen und Kommentare, die wir gerne entgegennehmen und in neue technologische Lösungen einfließen lassen.

„Power and Productivity for a better world“

Formelzeichen

p	Druck (Pa, bar)
V	Volumen (l, m ³)
n	Stoffmenge (mol)
R	Gaskonstante
t	Temperatur (°C, °F, K, °N, °R)
t ₉₀	Temperatur nach ITS-90 in °C
T ₉₀	Temperatur nach ITS-90 in K
Q	Wärmemenge (J, Nm, Ws)
LI	spektrale Strahlungsdichte (W m ⁻² l ⁻¹)
en	elementare Thermospannung (mV)
R _t	Widerstandswert an der Temperatur t (Ω)
R ₀	Widerstandswert an der Temperatur 0 °C (Ω)
α	Steigungskoeffizient eines Pt100 zwischen 0 °C und 100 °C (K ⁻¹)
δ	Kennwert aus der Callendar-Gleichung (K ⁻²)
β	Kennwert nach van Dusen für t < 0 °C (K ⁻⁴)

Abkürzungen

AISI	American Iron and Steel Institute
ANSI	American National Standards Institute
DKD	Deutscher Kalibrier Dienst
JIS	Japanese Industrial Standards
NF	Normalisation Francaise
NAMUR	Normungs-Ausschuss der Mess- und Regelungstechnik
NACE	National Association of Corrosion Engineers
ASME	American Society of Mechanical Engineers
MIL	Military Standard

1	125 Jahre Kompetenz in Temperatur-Messtechnik bei ABB	11
2	Einführung in die Temperatur-Messtechnik	17
2.1	Historische Entwicklung	17
2.1.1	Wärme und Temperatur	17
2.1.2	Die historische Entwicklung der Thermometer	18
2.1.3	Die thermodynamische Temperaturskala	22
2.1.4	Die Internationale Temperaturskala von 1990 (ITS 90)	23
2.2	Grundlagen der Temperaturmessung	25
2.2.1	Zum physikalischen Begriff der Temperatur	25
2.2.2	Zur technischen Bedeutung der Temperatur	25
2.2.3	Der Thermoelektrische Effekt	26
2.2.4	Der temperaturabhängige Ohmsche Widerstand	29
2.3	Messprinzipien zur Temperaturmessung	33
2.3.1	Mechanische Berührungsthermometer	35
2.3.2	Elektrische Berührungsthermometer	36
2.3.3	Weitere berührende Messprinzipien	37
2.3.4	Berührungslose Temperaturmessung	38
3	Industrielle Temperaturmessung mit elektrischen Berührungsthermometern	40
3.1	Sensoren	40
3.1.1	Thermopaare	40
3.1.2	Mineralisierte Mantelthermoelement-Leitungen	51
3.1.3	Thermo- und Ausgleichsleitungen	55
3.1.4	Ältere nationale Normen	58
3.1.5	Messwiderstände	62
3.2	Temperaturfühlerkonstruktionen für die Industrie	76
3.2.1	Konstruktiver Aufbau	76
3.2.2	Einbaubedingungen	81
3.2.3	Prozessanschlussarten	85
3.2.4	Prozessbeanspruchung	87
3.2.5	Auslegung von Schutzrohren	89
3.2.6	Korrosion	96
3.2.7	Werkstoffauswahl	106
3.2.8	Keramische Schutzrohre	108
3.3	Anwendungsspezifische Temperaturfühlerausführungen	111
3.4	Dynamisches Verhalten von Temperaturfühlern	127
3.4.1	Einführung	127
3.4.2	Sprungantwort und Übergangsfunktion, Einstellzeit und Zeitprozentkennwerte	128
3.4.3	Ermittlung dynamischer Kennwerte	129
3.4.4	Einflussfaktoren	129

3.5	Alterungsmechanismen technischer Temperaturfühler	131
3.5.1	Driftmechanismen bei Thermoelementen	131
3.5.2	Driftmechanismen bei Widerstandsthermometern	143
3.6	Fehlermöglichkeiten und Fehlerbeseitigung	148
4	Berührungslose Temperaturmessung im Feldeinsatz	154
4.1	Vorteile und Nutzen beim Einsatz der Infrarotmesstechnik	154
4.2	Grundlagen und Wirkungsweise	155
4.2.1	Ermittlung des Emissionsgrades	159
4.2.2	Messung von Metallen	160
4.2.3	Temperaturmessung an Kunststoffen	161
4.2.4	Messung an Glas	162
4.2.5	Die Übertragungsstrecke	163
4.2.6	Fremdstrahlung und hohe Umgebungstemperaturen	165
4.2.7	Optischer Strahlengang, Schutzgläser und Fenstermaterial	166
4.3	Anzeige und Schnittstellen	169
4.4	Applikationsbeispiele	170
5	Messsignalumsetzung und -auswertung	171
5.1	Einsatz von Messumformern in der Temperaturmesstechnik	171
5.2	Thermospannungs- und Widerstandsmessung	174
5.3	Energieversorgung von Temperatur-Messumformern	177
5.4	Prinzipieller Aufbau von Temperaturmessumformern	178
5.5	Parametrierbare Temperatur-Messumformer	184
5.6	Kommunikationsschnittstellen	188
5.7	Temperatur-Messumformer in explosionsgefährdeten Bereichen	194
5.8	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	201
5.9	Temperatur-Messumformer in der Interface-Technik	203
5.10	Hochgenaue Temperaturmessungen mit parametrierbaren Messumformern	206
6	Genauigkeit, Kalibrierung, Eichung, Qualitätssicherung	209
6.1	Genauigkeit	209
6.1.1	Allgemeine Grundlagen	209
6.1.2	Ermittlung (Abschätzung) von Messunsicherheiten	210
6.1.3	Messunsicherheitsabschätzung an einem praktischen Beispiel	213
6.1.4	Fehlereinflüsse bei der Temperaturmessung	215
6.2	Kalibrierung und Eichung	224
6.2.1	Begriffsbestimmungen	224
6.2.2	Kalibriermethoden für Temperaturfühler	225
6.2.3	Die Rückführung von Kalibrierergebnissen	226
6.2.4	Geeignete Normale	227
6.2.5	Der Wasser-Tripelpunkt	228

6.2.6	Die Dokumentation von Kalibrierergebnissen	229
6.2.7	Der Deutsche Kalibrierdienst (DKD)	231
6.2.8	DKD-Laboratorien bei ABB	232
6.2.9	Durchführung einer Kalibrierung	234
6.2.10	Kundenvorteile durch den DKD	235
6.3	Qualitätssichernde Maßnahmen	239
7	Explosionsschutz	244
7.1	Einleitung	244
7.2	Begriffsdefinitionen	245
7.3	Zündschutzarten in Europa und in Nordamerika	252
7.4	Kennzeichnung von Betriebsmitteln	256
7.5	Nachweis der Eigensicherheit	259
8	SIL - Funktionale Sicherheit in der Prozessautomatisierung	261
9	Normen und Regelwerke für die Temperatur-Messtechnik	263
10	Anhang 1	267
11	Anhang 2	271
12	Literaturverzeichnis	276
13	Grundwerte für Thermoelemente und Widerstandsthermometer	280

1 125 Jahre Kompetenz in Temperatur-Messtechnik bei ABB

Die wesentlichen Aktivitäten der heutigen industriellen Temperaturmessung bei ABB reichen zurück bis ins Jahr **1881**.

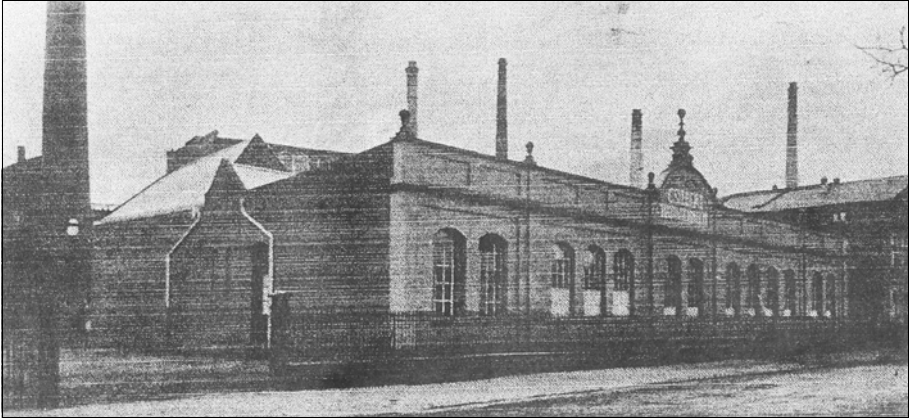


Bild 1-1: Fabrik G. Siebert

Wilhelm Siebert begann in Hanau in der väterlichen Zigarrenwickelformenfabrik G. Siebert mit einer Platinschmelze und der mechanischen Bearbeitung des Platins zu Drähten. Er lernte die „Probierkunst“ in Pforzheim bei der Firma Dr. Richter & Co. An der Firma G. Siebert beteiligte sich 1905 die Degussa. Hier wurde später die Bearbeitung der Platin- und Platin-/Rhodiumdrähte für Thermolemente weiterentwickelt.

Zwischen **1860** und **1900** wurden die Anfänge der elektrischen Temperaturmessung erarbeitet. Dies ermöglichte überhaupt erst die spätere Fernübertragung von Messwerten in Verbindung mit der heutigen Prozessautomatisierung. Hier entstand eine weitere Wurzel der langjährigen Tradition der Temperatur-Messtechnik. **1883...1891** wird das Braun'sche Pyrometer von Prof. Ferdinand Braun erfunden (1850...1918/ Nobelpreis in Physik 1909).

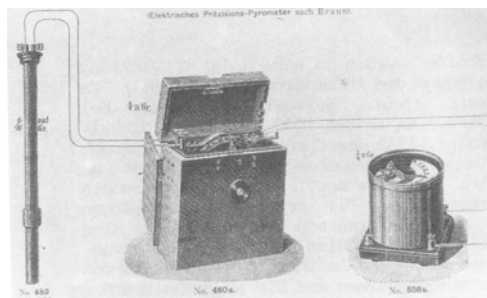


Bild 1-2: Elektrisches Präzisions-Pyrometer nach Braun

Als Sensor diente ein geschützter Platindraht, der über eine Wheatston'sche Brücke mit einem Nullgalvanometer zusammengeschaltet war. Über die in °C kalibrierte Skala des veränderlichen Brückenwiderstandes konnte der Messwert ohne Zwischenrechnung abgelesen werden. Das Gerät wurde zur Temperaturmessung bis 1500 °C an Öfen und Kesseln eingesetzt.

1893 erschien das Telethermometer z. B. „zur Kontrolle der Heizer vom Bureau aus“... Es wurde unter anderem für die Temperaturmessung in Räumen, Gewächshäusern, Malzdarren, Trockenräumen, oder an Öfen der Keramischen Industrie verwendet.

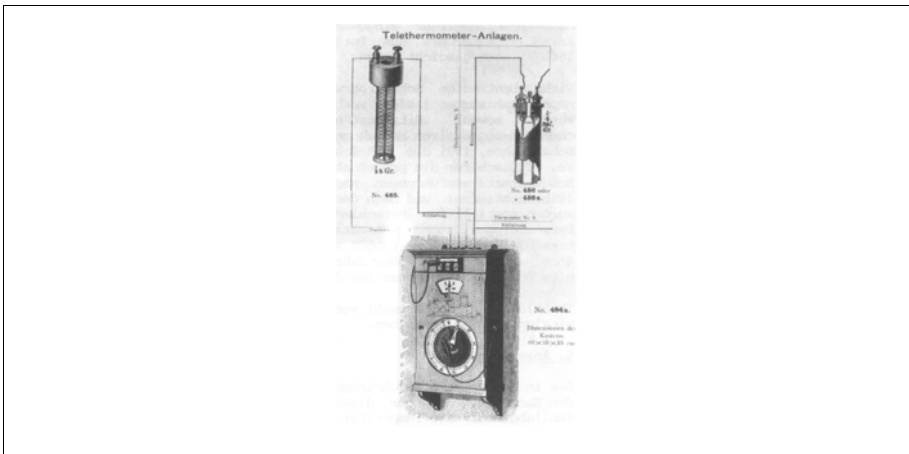


Bild 1-3: Telethermometer

Weitere Entwicklungsstufen der Temperturaufnehmer im Zeitraum von **1894...1974:**

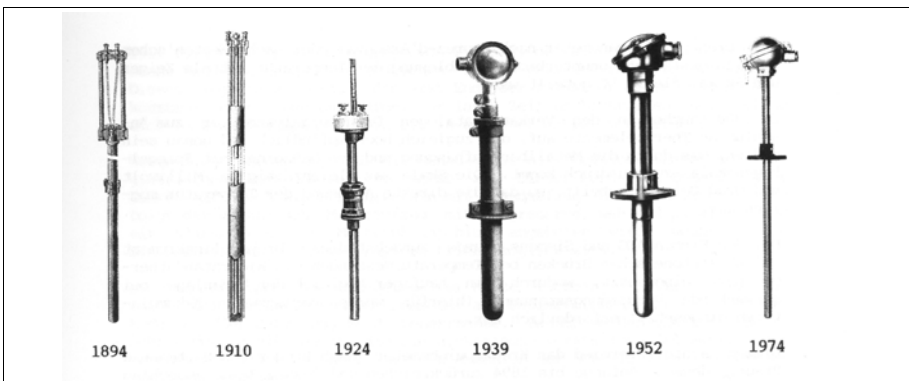


Bild 1-4: Temperturaufnehmer-Historie bis 1974

Zur besseren Übertragungsmöglichkeit der gemessenen Temperaturen entstanden im Zuge der technischen Weiterentwicklung entsprechende Messumformer.

Entwicklungsstufen der Temperatur-Messumformer im Zeitraum von **1939...1985**:

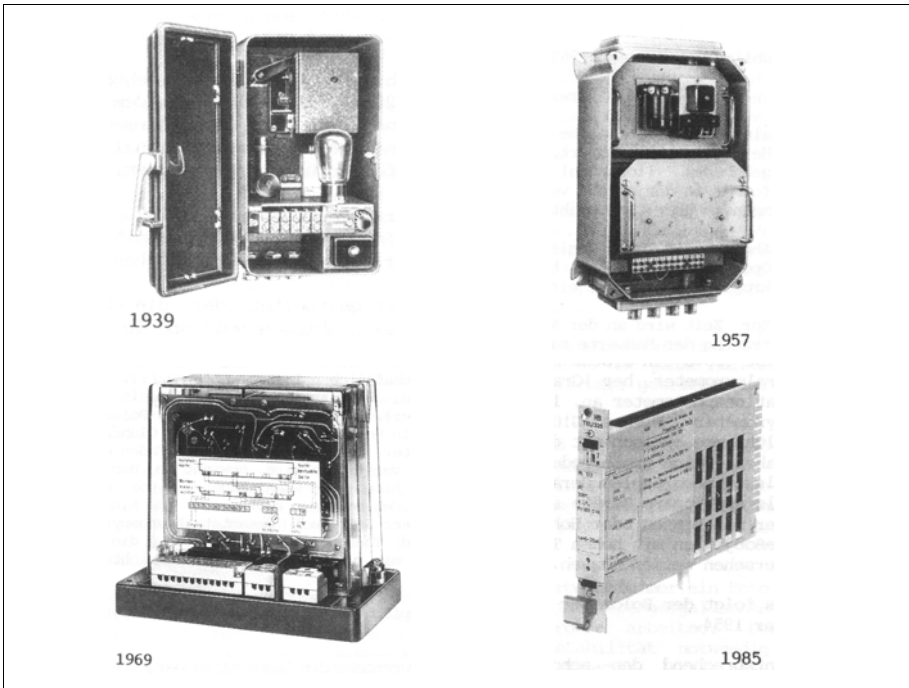


Bild 1-5: Temperatur-Messumformer-Historie bis 1985

Von **1950...1954** entwickelt die Firma Degussa ein hochtemperaturfähiges, langzeitstabilen „PtRh18“ Thermoelement, das später, 1967...1974, von der American Standards Association Comitte C96 (ISA) als „PtRh18“ Thermoelement Typ B bestätigt wurde.

Um **1960** erfolgte die Entwicklung und Serienfertigung neuartiger Drahtwiderstände ebenfalls bei der Firma Degussa in Hanau.

1962 bestimmten Obrowski und Prinz von Degussa die Referenzfunktion und die Grundwertreihe des „PtRh18“ Thermoelements.

1960 begann die Herstellung von Thermoelementdrähten und mineralisierten Kabeln („Mantelleitungen“) bei der Firma Degussa. Diese wurden **1970** weiterentwickelt.

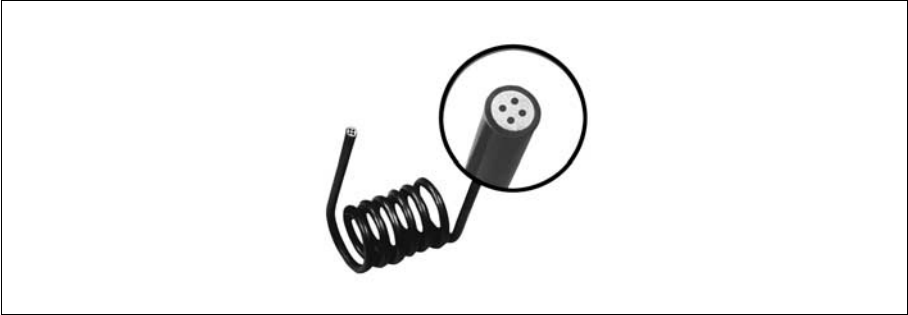


Bild 1-6: Querschnitt einer mineralisierten Mantelleitung

1977 erweitert die Firma Degussa ihre Temperatur-Messtechnik-Aktivitäten durch Übernahme der Bush Beach Engineering Ltd. in England, die einen großen Applikationshintergrund auf dem Gebiet der Öl- und Gasindustrie einbrachte.

1978 wurde einer der weltweit ersten elektronischen Messumformer für den Einbau im Temperaturfühlerkopf entwickelt. Er ist in explosionsgefährdeten Anlagen einsetzbar und wurde nach intensiven Tests im Hause Degussa und mit Leitkunden aus der Prozessindustrie auf den Markt gebracht. Nach anfänglichen Zweifeln erfuhr das Produkt eine immense Akzeptanz und verdrängte bisherige Technologien mehr und mehr.



Bild 1-7: Erster Messumformer für den Einbau im Fühlerkopf (TR01)

1988 erfolgte die Vorstellung eines industrietauglichen, faseroptischen Temperaturmessgerätes, das z. B. die Temperaturmessung in Mikrowellenanlagen ermöglichte.

1989 gründete die Firma Degussa die neue Tochterfirma und Marke SENSYCON in Hanau.

1991 übernahm die Firma Hartmann & Braun die Firma SENSYCON.

1994 verlegte SENSYCON Temperaturmesstechnik seine Produktion von Hanau in das 15 km entfernte bayerische Alzenau.

1995 wurde der erste HART-Fühlerkopfmessumformer entwickelt.

1996 erwarb Eltag Bailey die Firma Hartmann & Braun mit der Temperaturmesstechnik von SENSYCON.

1998 wurde der erste feldbusfähige Temperatur-Messumformer entwickelt.

1999 übernahm die Firma ABB Eltag Bailey, wobei SENSYCON Temperatur-Mess-technik innerhalb des Bereiches Instrumentierung eine globale Führungsrolle erhielt.

2006 wurden neue leistungsfähige und zukunftsweisende Temperatur-Messumformer mit der Bezeichnung TTH300 für Fühlerkopfmontage und TTF300 für Feldmontage auf den Markt gebracht.



Bild 1-8: Messumformer TTH300 und TTF300

Die Temperaturfühler-Reihen SensyTemp TSP100 und SensyTemp TSP300 für die Prozessindustrie, stellen den vorläufig letzten Stand der Technik dar.



Bild 1-9: Temperaturfühler der Reihe SensyTemp TSP

„Mit Tradition zur Innovation“ war und ist die Temperaturmesstechnik von ABB in den letzten 125 Jahren stets wegweisend aktiv, mit dem Ziel, messtechnischen Herausforderungen und Effizienzsteigerungen, gemäß den globalen Kundenforderungen, gerecht zu werden.

2 Einführung in die Temperatur-Messtechnik

2.1 Historische Entwicklung

2.1.1 Wärme und Temperatur

Erst in der Neuzeit wurde das Phänomen der Wärme systematisch studiert. Davor begnügte sich der Mensch mit einigen qualitativen, praxisorientierten Erkenntnissen über die Wärme. Mit der Erfindung der Dampfmaschine verstärkte sich das Interesse der Wissenschaftler an den Phänomenen der Wärme. *Joseph Black* arbeitete als erster den Unterschied zwischen Wärme und Temperatur heraus. 1760 erklärte er, unterschiedliche Stoffe würden durch die Zufuhr der jeweils gleichen Wärmemenge um unterschiedliche Temperaturbeträge erwärmt.

In den ersten Theorien wurde die Wärme als materielle Substanz betrachtet, die sich einem Stoff entnehmen oder zuführen ließ oder von einem auf einen anderen Stoff übertragbar war. Diese Substanz wurde **Calor** genannt. Wenn man Holz verbrannte, so wanderte dieser Anschauung nach das darin enthaltene Calor in die Flamme, von dort dann gegebenenfalls weiter in den auf die Flamme gestellten Wasserkessel und seinen Inhalt. Wenn das Wasser im Kessel mit Calorien gesättigt war, verwandelte es sich in Dampf.

Erst gegen Ende des 18. Jahrhunderts führten Beobachtungen von *Benjamin Thompson* (Graf Rumford) und *Humphry Davy* zu einer alternativen Theorie, die die Wärme erstmals als Schwingungsphänomen beschrieb.

Die Theorie von Wärme als eine Form der Energie, geht u. a. auf die Arbeiten des Physikers *Sadi Carnot* zurück, der heute als der Begründer der wissenschaftlichen Thermodynamik gilt. Er untersuchte Anfang des 19. Jahrhunderts das Bewegungsverhalten von Wärme unter dem Aspekt, wie man die im Dampf gespeicherte Energie in mechanische Arbeit umsetzen kann. Die Untersuchung des umgekehrten Vorgangs, nämlich wie lässt sich Arbeit in Wärme umsetzen, führte zu dem Grundgedanken, dass Energie erhalten bleibt, und weder aus dem Nichts geschaffen werden kann, noch sich in Nichts auflösen kann. Dieser Ansatz führte zum Gesetz von der Erhaltung der Energie (1. Hauptsatz der Thermodynamik).

Die Voraussetzungen für ein klares Verständnis von Wärme wurde erst mit der Erforschung der atomaren Struktur der Materie geschaffen. Mitte des 18. Jahrhunderts erarbeiteten *Maxwell* und *Boltzmann* die mathematischen Grundlagen und formulierten die kinetische Gastheorie. Darin wird Wärme mit Molekülbewegungen gleichgesetzt. Die thermische Bewegung der Moleküle erfolgt dabei völlig zufällig und unabhängig voneinander, ihre Geschwindigkeitsverteilung hingegen unterliegt strengen mathematischen Gesetzen.

Die Frage nach dem Begriff der Temperatur ist aber damit immer noch nicht endgültig beantwortet.

Maxwell definierte die Temperatur eines Körpers als die thermische Eigenschaft, die ihn zur Abgabe oder Übernahme von Wärme(-energie) an andere bzw. von anderen Körpern befähigt. Vom messtechnischen Standpunkt aus gesehen, ist die Temperatur also die physikalische Messgröße, die Auskunft über den thermischen Energieinhalt eines Systems gibt und so dessen Wärmeenergieinhalt (Wärmegrad, Wärmezustand) beschreibt. Für *Maxwell* war die Temperatur das Maß für die durchschnittliche Bewegungsenergie der Moleküle, aus denen sich eine Substanz zusammensetzt, und die Messung der Temperatur also geeignet, den (Wärme-)energieinhalt einer Substanz zu bestimmen.

Das Wort Temperatur hat seinen Ursprung vermutlich im lateinischen Wort „temperatura“, was soviel wie „angenehm empfundene (Eigenschaft)“ bedeutet.

Will man die Temperatur eines Systems bestimmen, so wäre es folgerichtig, die Geschwindigkeit der Moleküle als Messgröße zu wählen. Ein System hätte demnach gar keinen Wärmeinhalt, wenn alle Moleküle ihre Bewegungsenergie vollständig verloren hätten, also in Ruhe verharren. Dieser Zustand ließe sich als der mit der „absoluten Wärmelosigkeit“ bezeichnen. Die Bewegung der Moleküle ist unserer Wahrnehmung und Messung aber verschlossen, und somit für die Praxis unbrauchbar. Zur praktischen Temperaturmessung müssen daher andere Wege eingeschlagen werden. Ausgenutzt werden die Auswirkungen, die die Wärme(-energie) auf andere Eigenschaften eines Systems ausübt, z. B. die geometrische Ausdehnung von Körpern durch Wärmeenergiezufuhr.

Die menschlichen Sinnesorgane vermögen die Temperatur eines Körpers nur recht subjektiv zu bewerten. Trotzdem sind Begriffe wie „heiß“, „warm“, „kalt“ oder „eiskalt“ über Erfahrungswerte jedem geläufig und ausreichend gut untereinander vergleichbar. Dies gilt auch für visuelle Eindrücke wie „rotglühend“ oder „weißglühend“. Die exakte Zuordnung eines Temperaturwertes (Quantifizierung) entzieht sich jedoch den subjektiven Möglichkeiten des Menschen.

Zur objektiven und reproduzierbaren Messung der Temperatur eines Körpers benötigt man also ein geeignetes Messgerät.

2.1.2 Die historische Entwicklung der Thermometer

Geräte zur Messung der Temperatur heißen im allgemeinen Thermometer. Welches Verhältnis die Alten Ägypter zur Temperatur hatten ist nicht überliefert. Es ist auf keiner altägyptischen Zeichnung jemals ein Instrument entdeckt worden, von dem man vermuten könnte, dass es zur Temperaturmessung herangezogen wurde. Sehr wohl wissen wir aber, dass es die Alten Ägypter bereits verstanden, Eis herzustellen (Verdunstungskälte).

Das älteste bekannte Instrument zur Temperatur-„messung“ beruht auf der Ausdehnung der Luft und wird dem Griechen *Heron von Alexandria* (um 120 v. Chr.) zugeschrieben. Es war kein Thermo„meter“ im eigentlichen Sinne, denn es hatte keine

Skala. Thermometer nach dem gleichen Prinzip (sog. Thermoskope) tauchen erst wieder zu Beginn des 17. Jahrhunderts in Europa auf.

Personen, die sich nachweislich mit der systematischen Weiterentwicklung von Thermometern befassten, waren *Satorio Santorre*, *Giovanfrancesco Sagredo*, *Galileo Galilei*, *Benedetto Castelli* und *Vicencio Viviani*. Dass alle diese Namen aus dem italienischen Sprachraum kommen, ist vermutlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Glasbläserkunst dort zu dieser Zeit am weitesten entwickelt war.

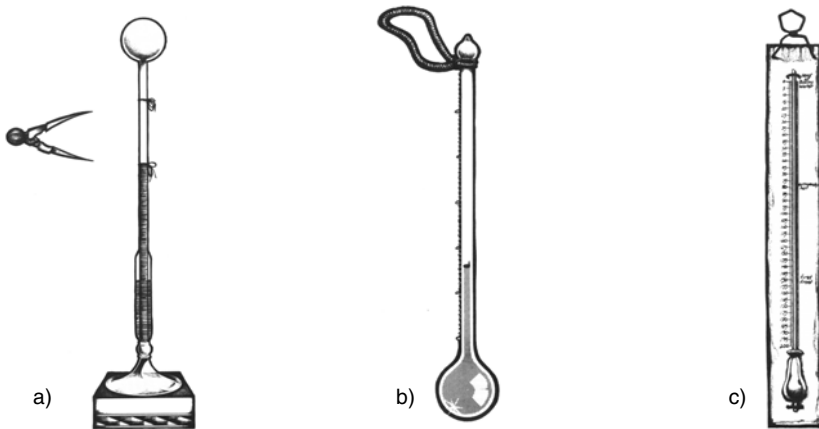


Bild 2-1: a) frühes Lufthermometer (Thermoskop) mit Kompass um die Veränderung zu messen; b) frühes Florentiner Thermometer; c) typisches Thermometer um 1750

Der Schritt vom Thermoskop zum Flüssigkeitsthermometer wird Großherzog *Ferdinand II von Toskana* zugeschrieben, einem Schüler Galileis. Dieser ließ um 1654 mit Weingeist gefüllte Flüssigkeitsthermometer (sog. Florentiner Thermometer) mit Gefäß und Kapillare herstellen (mit Skala zu 50 Einheiten). Die Skalen wurden durch Vergleichen der Geräte untereinander abgestimmt.

Antonio Alemanni baute um 1660 ein Thermometer mit einer Länge von 108 cm, dessen Skala in 520 Einheiten unterteilt war. Die Kapillare dieses Thermometers ist wie eine Spule aufgewickelt. Das Gerät ist noch heute erhalten.

Sir Isaac Newton beschrieb 1701 ein ölgefülltes Flüssigkeitsthermometer und eine Kalibriermethode an der Temperatur des frierenden Wassers (0°N) und der Temperatur des Blutes (12°N).

Zu Beginn des 18. Jahrhunderts konzipierte der Niederländer *van Musschenbroek* wahrscheinlich als erster den Gedanken, die Wärmeausdehnung von Metallen zur Messung von Temperaturen auszunutzen.

Um 1703 konstruierte der Franzose *Amontons* ein Gasthermometer konstanten Volumens und postulierte, dass Wärme eine Art Bewegung ist. Er erwähnte erstmals den Begriff des natürlichen Nullpunktes der Temperatur, der dann erreicht sei, wenn jede Bewegung völlig zur Ruhe gekommen sei.

1714 verbesserte der Danziger Glasbläser *Fahrenheit* die bekannten Flüssigkeitsthermometer wesentlich und realisierte den eigentlichen Schritt zum Messgerät. Die Thermometer füllte er anfangs mit Weingeist, später mit Quecksilber, was den Vorteil hatte, die Glaskapillare nicht zu benetzen und bis zum Siedepunkt des Wassers einsetzbar zu sein. Diese „Fahrenheit-Thermometer“ besaßen eine Skala, die dadurch reproduzierbar war, dass Fahrenheit drei Fixpunkte einführte:

- 0 für die Temperatur einer Salmiak-Gefrieremischung,
- 4 für die Temperatur schmelzenden Eises und
- 12 für die Temperatur des menschlichen Körpers.

Es lag damals nah, den Abstand der Fixpunkte entsprechend dem Duodezimalsystem durch die Zahl 12 zu charakterisieren. Da nun aber die einzelnen Grade unzureichend groß waren, wurden sie mehrfach halbiert, so dass jedem der ursprünglichen Grade später 8 Grad entsprachen. Damit erhielt der Eispunkt den Zahlenwert 32 und die Körpertemperatur des Menschen den Wert 96. Später führte Fahrenheit den Siedepunkt des Wassers als oberen Fixpunkt ein und ordnete diesem durch Extrapolation der Skala von 0 °F bis 32 °F den Wert 212 °F zu. Diese beiden Zahlen, deren Abstand 180 °F beträgt, wurden von ihm für alle späteren Messungen beibehalten. Sie lieferten nach genaueren Beobachtungen für die Körpertemperatur des gesunden Menschen den Wert 98 °F. In verschiedenen Ländern ist diese Skala heute noch vorzufinden.

Um 1715 definierte der Franzose *Réaumur* eine nach ihm benannte Temperaturskala. In dieser benannte er den Eispunkt mit 0 °R und die Temperaturerhöhung, welche ein Alkohol-Wasser-Gemisch (20 % Wasser) um 0,1 % seines Volumens ausdehnte als 1 °R. Die Übertragung dieser Skala auf das Quecksilberthermometer ergab den Siedepunkt des Wassers zu 80 °R.

1740 führte der Schwede *A. Celsius* eine Skala mit 100 Intervallen ein und legte 0 als Siedepunkt des Wassers und 100 als Gefrierpunkt des Wassers fest. Drei Jahre später wurde die Celsius-Skala durch seinen Schüler *Carl von Linné* mit der noch heute gültigen Zuordnung von **0 °C für den Eispunkt** und **100 °C für den Siedepunkt** eingeführt.

Mitte des 18. Jahrhunderts galt die Temperaturmessung (Thermometrie) als eine allgemein in die Wissenschaft eingeführte Messtechnik. Die mit den damaligen Geräten messbaren maximalen Temperaturen lagen bei ca. 300 °C. Der aufkommende Wunsch nach Messung der Temperaturen von Schmelzen (Metallurgie), führte zur Entwicklung weiterer Messmethoden.

Die wesentlichen Meilensteine der weiteren Entwicklung:

- 1800** Aufbau einfacher Bimetall-Thermometer durch *A. L. Brèguet*.
- 1818** Entdeckung der Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines Ohmschen Leiters von der Temperatur durch *H. Cr. Oersted*.
- 1820** Beschreibung des Effektes der Thermoelektrizität durch *Seebeck*.
- 1821** Konstruktion des ersten Thermoelementes durch *H. Davy*.
- 1840** Entwicklung eines Thermoelementes aus Neusilber und Eisen zur Messung der Körpertemperatur durch *Chr. Poggendorf*.
- 1852** Aufstellung einer thermodynamischen Temperaturskala, die von allen Stoffeigenschaften unabhängig ist und auf dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik basiert durch *William Thompson (später Lord Kelvin)*.
- 1871** Konstruktion eines Platin-Widerstandsthermometers durch *Werner von Siemens*
- 1885** Weiterentwicklung des Platin-Widerstandsthermometers zu einem Präzisions-Thermometer, auch für höhere Temperaturen, durch *H.L. Callendar*
- 1887-1889** Herstellung von Thermoelementen zur technischen Temperaturmessung durch *H. le Chatelier* und *C. Barus*
- 1892** Entwicklung des ersten brauchbaren Spektralpyrometers durch *H. le Chatelier*.

Welche Probleme die Naturwissenschaftler des 18. Jahrhunderts mit der Handhabung ihrer Geräte und der Übertragbarkeit der Messergebnisse hatten, verdeutlicht eine Überlieferung von René-Antoine Ferchault de Réaumur aus dem Jahr 1730:

„Die Thermometer sind ohne Zweifel eine der hübschesten Erfindungen der modernen Physik, welche zugleich am meisten zu deren Fortschritt beigetragen haben. Man liebt es sehr, das Thermometer zu beobachten, um die Temperaturen der Luft zu erfahren; namentlich wenn die Kälte und die Wärme unbequem wird, benutzt man das Instrument.

Weiß man einerseits, wie amüsant und nützlich dieses Instrument ist, so kennt man andererseits seine Unvollkommenheit. Der Gang fast aller Thermometer ist verschieden. So versteht man schließlich nur das Thermometer, das man mehrere Jahre lang selbst verfolgt hat. Jedes andere bleibt unverständlich.“

2.1.3 Die thermodynamische Temperaturskala

Der entscheidende Ansatz für eine allgemeingültige Temperaturskala ist die unabdingbare Forderung nach Reproduzierbarkeit der Skala, unabhängig von den speziellen Eigenschaften verwendeter Materialien. Darüber hinaus muss sie im gesamten Temperaturbereich uneingeschränkte Gültigkeit besitzen, und zwar von den tiefsten bis zu den höchsten Temperaturen. Nur dadurch ist die Übertragbarkeit von Messergebnissen sichergestellt.

Der Weg zu diesem Ziel führt über die Grundlagen der Thermodynamik und wurde zum erstenmal von *Lord Kelvin* im Jahre 1852 beschritten. Die Thermodynamik beschreibt die Verknüpfung verschiedener Zustandsänderungen der Materie mit der Temperatur, so dass die Temperatur bestimmt werden kann, wenn irgendeine dieser Zustandsänderungen messend verfolgt wird.

Die Definition der thermodynamischen Temperaturskala ist aus dem 2. Hauptsatz der Wärmelehre über den Kreisprozess nach *Carnot* abgeleitet. Es wird hierin davon ausgegangen, dass die Temperaturänderung eines idealen Gases bei konstantem Volumen und konstantem Druck, nur von der zu- oder abgeführten Wärmemenge Q abhängt und zu dieser proportional ist.

Ein Gasvolumen, dem keine Wärmeenergie mehr innewohnt, hat somit seinen thermodynamisch niedrigsten Energiezustand eingenommen. Kelvin postulierte aus dieser Betrachtungsweise die Existenz einer tiefsten möglichen Temperatur, den **absoluten Nullpunkt**, und wies ihm den Wert 0 zu. Da der Nullpunkt der Skala somit definiert ist, negative Temperaturen nicht auftreten können, besitzt die durch Kelvin vorgeschlagene Temperaturskala auch absoluten Charakter, daher auch **absolute Temperaturskala**. Thermodynamische Temperaturzustände werden deshalb durch die absolute Temperatur T in der Einheit „Kelvin“ (K) angegeben. Das Kelvin ist heute eine der Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems (SI).

Zur praktischen Bestimmung der Temperatur, müssen die zu- oder abgeführten Wärmemengen des Kreisprozesses experimentell bestimmt werden. Diese Aufgabenstellung ist technisch sehr aufwändig zu lösen.

Unter Zugrundelegung der allgemeinen Gasgleichung

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

die die thermodynamische Zustandsgrößen Druck (p), Volumen (V) und Temperatur (T) einer Gasmenge (n) über die Gaskonstante (R) miteinander verknüpft, lässt sich leicht erkennen, dass sich die thermodynamische Temperatur T über die Messung einer anderen Zustandsgröße (Druck oder Volumen) ersatzweise bestimmen lässt, sofern die weiteren Zustandsgrößen konstant gehalten werden. Die wissenschaftliche Bedeutung der thermodynamischen Temperaturskala ist umso größer, als es *L. Boltzmann* und *M. Planck* gelang, auch die Wärme- und Lichtstrahlung sehr hoch erhitzter Substanzen mit den Grundgleichungen der Thermodynamik in Beziehung zu setzen.

2.1.4 Die Internationale Temperaturskala von 1990 (ITS 90)

In der metrologischen Praxis werden thermodynamische Temperaturen mit dem Gasthermometer, oder bei höheren Temperaturen, mittels Strahlungspyrometern gemessen.

Die erste allgemein gültige Festlegung einer Temperaturskala, war die des Normal-Wasserstoffs aus dem Jahr 1889. Sie basierte auf dem Gasthermometer als Messinstrument.

Diese Messmethode stellt aber für praktische Messungen einen kaum vertretbaren Aufwand dar. Deshalb wurden zu Beginn des letzten Jahrhunderts erste Versuche unternommen, eine einfacher darstellbare und somit praktikablere Temperaturskala zu definieren, die aber mit der thermodynamischen Temperaturskala weitgehend übereinstimmen sollte.

Die erste Fassung dieser Skala war die „Internationale Temperaturskala von 1927“ (ITS-27). Über die Skalen ITS 48 und IPTS-68 veröffentlichte man 1975 die EPT-76.

Weitere theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zur thermodynamischen Temperaturskala in den darauffolgenden Jahren, führte zu einer verbesserten Neufassung, die seit 1990 als „**Internationale Temperaturskala von 1990**“ (ITS-90) Gültigkeit hat.

Temperaturen, gemessen nach ITS-90, werden gekennzeichnet durch **T_{90} für Temperaturwerte in K** und **t_{90} für Temperaturwerte in °C**.

Die ITS-90 definiert die Temperaturskala im Bereich von 0,65 K bis in Bereiche weit oberhalb 3000 K. Sie ist in einzelne, sich teilweise überlappende Bereiche, unterteilt, für die die definierenden Temperaturpunkte, die „Normalgeräte“ (zur Darstellung der Bereiche zwischen den Fixpunkten) und die Definitionsgleichungen zur Interpolation vorgegeben sind.

Im Temperaturbereich bis 1357 K (1084 °C) verwendet sie zur Definition 16 Fixpunkte für die thermometerischen Messungen und gibt mathematische Beziehungen an, nach denen, jeweils im Bereich zwischen zwei solchen Fixpunkten, Zwischenwerte der Temperatur ermittelt werden können. Dabei sind die definierenden Fixpunkte die Phasengleichgewichte hochreiner Substanzen, bei deren Phasenumwandlung (flüssig zu gasförmig oder flüssig zu fest) sich konstante Temperaturen einstellen. Diesen Temperaturen sind per Definition Zahlenwerte zugeordnet, die mit den Ergebnissen thermodynamischer Messungen bestmöglich übereinstimmen. Der wichtigste Fixpunkt der ITS-90 ist der **Trippelpunkt des Wassers**, an dem alle drei möglichen Aggregatzustände des Stoffes im Gleichgewicht vorliegen und zwar bei einer Temperatur von $T_{90} = 273,16$ K bzw. $t_{90} = +0,01$ °C.

Gleichgewichtszustand	T_{90} / K	$t_{90} / ^\circ\text{C}$
Dampfdruck des Heliums	3...5	-270,15...-268,15
Tripelpunkt des Gleichgewichtswasserstoffs	13,8033	-259,3467
Dampfdruck des Gleichgewichtswasserstoffs (329 hPa) (1022 hPa)	~ 17 ~ 20,3	~ -256,15 ~ -252,85
Tripelpunkt des Neons	24,5561	-248,5939
Tripelpunkt des Sauerstoffs	54,3584	-218,7916
Tripelpunkt des Argons	83,8058	-189,3442
Tripelpunkt des Quecksilbers	234,3156	-38,8344
Tripelpunkt des Wassers	273,16	0,01
Schmelzpunkt des Galliums	302,9146	29,7646
Erstarrungspunkt des Indiums	429,7485	156,5985
Erstarrungspunkt des Zinns	505,078	231,928
Erstarrungspunkt des Zinks	692,677	419,527
Erstarrungspunkt des Aluminiums	933,473	660,323
Erstarrungspunkt des Silbers	1234,93	961,78
Erstarrungspunkt des Goldes	1337,33	1064,18
Erstarrungspunkt des Kupfers	1357,77	1084,62

Tab. 2-1: Definierende Fixpunkte der ITS-90

Im Temperaturbereich oberhalb 1357 K ist die ITS-90 über das **Planck'sche Strahlungsgesetz** (Schwarzer Strahler) definiert.

Je nach Art der Normalgeräte (Interpolationsinstrumente), unterscheidet die ITS-90 drei Temperaturbereiche:

Im Bereich von 0,65 K bis 24,55 K dienen Dampf-, bzw. Gasdruckthermometer unterschiedlicher Bauart als Normalgerät.

Im Bereich von 13,8 K bis 1234,93 K werden Platin-Widerstandsthermometer als Normalgeräte verwendet. Platin-Normalwiderstandsthermometer (sog. ITS-90-Thermometer) müssen sehr hohen messtechnischen Anforderungen genügen und sind ausgesprochene Präzisionsmessgeräte. Für den praktischen Einsatz im Kalibrierlabor existieren sog. Sekundärthermometer, mit geringerer Genauigkeit, aber besserer mechanischer Stabilität.

Im Bereich oberhalb 1234,93 K (Erstarrungspunkt des Silbers) dienen Strahlungspyrometer als Normalgeräte.

2.2 Grundlagen der Temperaturmessung

2.2.1 Zum physikalischen Begriff der Temperatur

Die Temperatur ist als ein Maß für die statistisch gemittelte Geschwindigkeit und damit die kinetische Energie der Moleküle eines Körpers anzusehen. Um einen Körper von der Temperatur T_1 auf T_2 zu erwärmen, muss man ihm Energie zuführen. Wieviel, hängt u. a. von der Anzahl der Moleküle im Körper (der Stoffmenge) und deren Größe ab. Um den thermodynamischen Energiezustand des Körpers über die Temperatur beschreiben zu können, muss die Geschwindigkeitsverteilung seiner Moleküle nach statistischen Gesetzmäßigkeiten beschrieben sein. Die Gesetze der Thermodynamik gelten somit nur da, wo eine ausreichend große Anzahl von Molekülen vorhanden ist.

In der modernen Thermodynamik wird die Temperatur eines Körpers als eine Art Wärmepotenzial beschrieben mit der Eigenschaft Wärme abzugeben oder aufzunehmen (Wärmequellen und -senken). Der Gradient der Temperatur (die Richtung des stärksten Temperaturunterschiedes) beschreibt also die Richtung des größten Wärmefflusses innerhalb eines Körpers. Dabei verläuft die Richtung des Wärmefflusses immer von der höheren zur niedrigeren Temperatur.

Diese Aussage erscheint trivial, sie ist aber für den Einsatz von Berührungsthermometern von fundamentaler Bedeutung.

2.2.2 Zur technischen Bedeutung der Temperatur

Die Temperatur ist eine der sieben Basisgrößen des gültigen SI-Einheitensystems und gleichzeitig wohl die wichtigste Bestimmungsgröße der Messtechnik.

Temperaturmessungen lassen sich grob in drei Aufgabenbereiche unterteilen:

- Präzisionstemperaturmessung für Wissenschaft und Grundlagenforschung
- Technische Temperaturmessung für die Mess- und Regeltechnik
- Temperaturüberwachung mittels Temperaturindikatoren.

Die Aufgabe der technischen Temperaturmessung ist es, für jede Aufgabenstellung eine anwendungsgerechte Lösung anzustreben, die ein Optimum aus erforderlicher Messgenauigkeit und vertretbaren Kosten sein soll.

Von den vielen Methoden, die zur Temperaturmessung angewendet, und die in diesem Handbuch umfassend beschrieben werden, haben im Bereich der Mess- und Regeltechnik die elektrischen Temperatursensoren eine dominierende Stellung eingenommen. Sie wandeln die Messgröße Temperatur in ein elektrisches Signal um.

2.2.3 Der Thermoelektrische Effekt

Der **Seebeck-Effekt** gehört zusammen mit dem Peltier- und dem Thomson-Effekt zur Gruppe der Thermoelektrischen Effekte. Seine Entdeckung wird *T. J. Seebeck* zugeschrieben. Dieser veröffentlichte im Jahr 1822 eine Beobachtung, dass in einem elektrischen Stromkreis, gebildet aus 2 unterschiedlichen metallischen Leitern, dann ein Stromfluss zu erkennen ist, wenn sich die beiden Verbindungsstellen der Leiter auf unterschiedlichem Temperaturniveau befinden. Verursacher dieses Thermostromes war die sich ausbildende Thermospannung (Thermokraft), deren Größe der Temperaturdifferenz zwischen dem heißen und dem kalten Ende proportional war und darüberhinaus von der eingesetzten Materialkombination abhing.

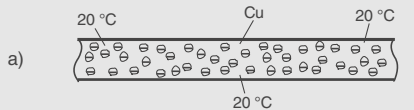
Schon 1826 empfahl *A. Becquerel* ein Platin-Palldium-Thermopaar zur Temperaturmessung.

Theorie des Thermoelektrischen Effektes

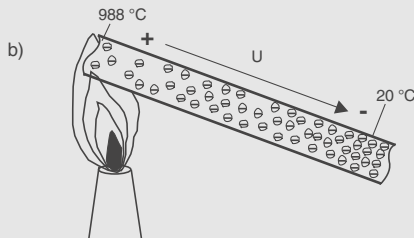
Die Temperaturabhängigkeit der Elektronenpotenziale, die in einem elektrischen Leiter eine Ladungsverschiebung verursacht, wenn dieser sich in einem inhomogenen Temperaturfeld befindet, wird heute als Auslöser der thermoelektrischen Effekte angesehen.

Einfach ausgedrückt: die freien Ladungsträger (Elektronen) in einem einseitig erwärmten Leiter verteilen sich inhomogen, wodurch eine Potenzialdifferenz (Thermospannung) entsteht. Es findet am kalten Ende eine Anreicherung von Elektronen statt, am heißen Ende setzt dagegen eine Verarmung ein. Somit ist plausibel, dass auch in einem einzigen elektrischer Leiter im Temperaturfeld eine Thermospannung erzeugt wird.

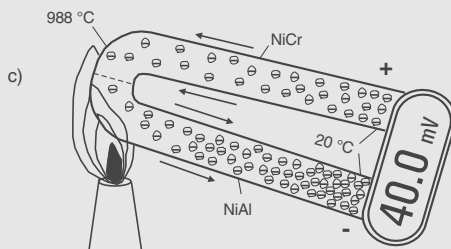
Diese Thermospannung lässt sich aber nur unter Hinzuziehung eines zweiten Leiters (Thermopaares) messen, vorausgesetzt die Temperaturabhängigkeit dieses Effektes ist beim 2. Leiter unterschiedlich zum 1. Leiter ausgeprägt (siehe Bild 2-2).



gleichmäßige Elektronenverteilung bei homogener Temperatur in einem Leiter



Elektronenverarmung am heißen Ende



unterschiedliche Elektronenkonzentration im Messkreis aus zwei unterschiedlichen Leitern

Bild 2-2: Zur Entstehung der Thermospannung

Sind die Thermospannungseffekte in beiden Leitern gleich (z. B. bei identischen Leitermaterialien), so heben sich die Effekte gegenseitig auf, und es kann keine Thermospannung gemessen werden.

Wichtig dabei ist, dass es sich bei den genannten Effekten um einen Volumendiffusionseffekt der Ladungsträger handelt und nicht um ein Kontaktspannungsphänomen zwischen zwei Werkstoffen. Somit ist nachvollziehbar, dass in einem Thermopaar die Thermospannung über der gesamten Länge des Thermopaars erzeugt wird und nicht nur in der „heißen“ Verbindungsstelle der beiden Schenkel.

Gesetzmäßigkeiten

Das **Gesetz der linearen Superposition** (Überlagerungssatz) gilt für Thermopaare, wobei man sich ein Thermopaar als Reihenschaltung (unendlich) vieler Einzелеlemente vorstellen kann. Das Thermoelement liefert dann die gleiche Thermospannung wie die Summe der einzelnen Elemente. Ein zusätzlich eingebrachter Heißbereich, der sich zwischen heißem und kaltem Ende befindet, hat demnach keinen Einfluss auf die resultierende Thermospannung, da sich die zusätzlich eingebrachten Thermospannungen gegenseitig aufheben.

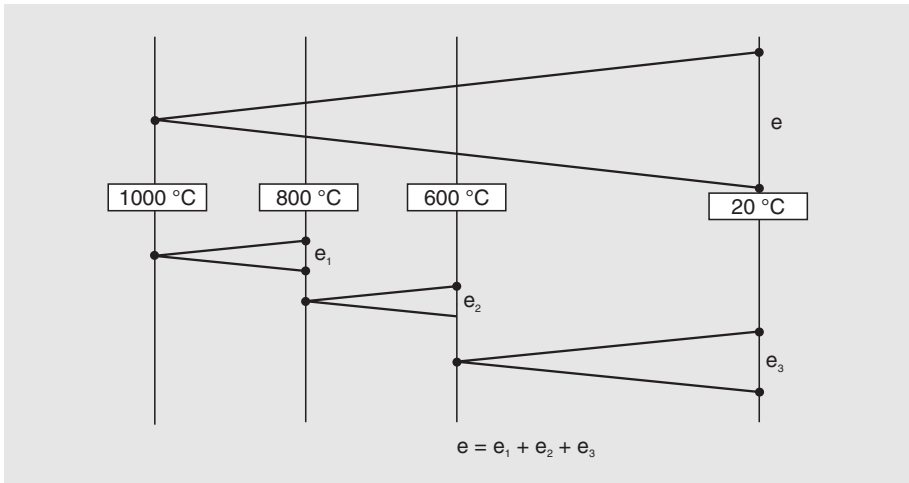


Bild 2-3: Superposition von Thermospannungen

Das **Gesetz der homogenen Temperatur** besagt, dass die Thermospannung eines Leiters im homogenen Temperaturfeld gleich Null ist. Somit ist auch die Thermospannung in einem Thermokreis (Reihenschaltung) mit beliebig vielen Werkstoffkombinationen gleich Null, wenn sich alle Komponenten auf gleicher Temperatur befinden. Für die Praxis bedeutet dies, dass auch inhomogene Thermodrähte oder Steckverbindungen aus verschiedenen Werkstoffen, im Ergebnis ohne Auswirkung bleiben, solange dort kein Temperaturunterschied vorhanden ist. Darauf ist vor allem im Stecker-Übergangsbereich konstruktiv Rücksicht zu nehmen. So sorgt z. B. eine massive thermische Isolierung (isothermer Block) für eine Temperaturhomogenisierung.

Das **Gesetz des homogenen Stromkreises** besagt, dass die Temperatur der homogenen Leiter zwischen den Messstellen keinen Einfluss auf die resultierende Thermospannung hat. Wichtiger ist der Umkehrschluss: verändert sich die resultierende Thermospannung durch Bereiche inhomogener Temperatur (bei konstanter Heiß- und Kaltstelle) so ist das Leitermaterial nicht homogen. Inhomogenitäten können bereits bei der Herstellung, oder der Anwendung (mechanische oder thermische Überbeanspru-

chung) von Thermopaaren entstehen. Allerdings bleiben diese Inhomogenitäten dann ohne Auswirkung, wenn sie sich in einem homogenen Temperaturfeld befinden.

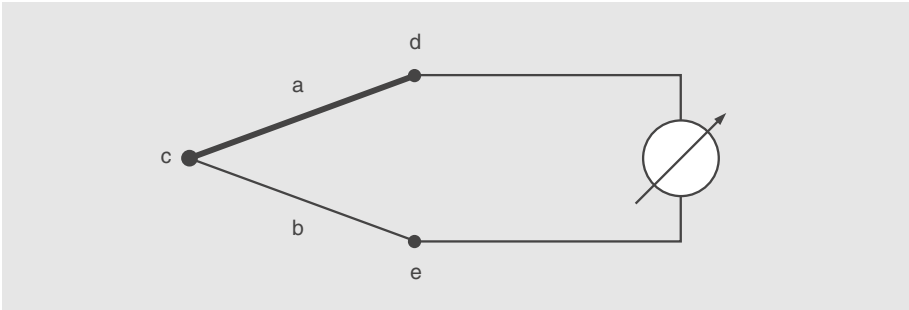


Bild 2-4: Thermokreis: c = Messstelle; a, b = Thermoschenkel; d, e = Vergleichsstelle

Abgeleitete fundamentale Aussagen für den Einsatz von Thermopaaren:

- In einem homogenen Temperaturfeld wird keine Thermospannung erzeugt
- In einem homogenen Leiter hängt die Größe der Thermospannung nur von der Temperaturdifferenz zwischen den Enden des Leiters ab
- Die Verbindungsstelle eines Thermopaars erzeugt keine Thermospannung.

2.2.4 Der temperaturabhängige Ohmsche Widerstand

Alle Metalle haben eine große, mit abnehmender Temperatur steigende elektrische Leitfähigkeit. Die elektrische Leitfähigkeit eines Metalls beruht auf der freien Beweglichkeit seiner Leitungselektronen, dem sogenannten Elektronengas. Es besteht aus den äußeren Elektronen der Metallatome. Die Atome des Metalls bilden ein Ionengitter dichter Packung. Die Gitteratome schwingen. Mit steigender Temperatur vergrößert sich die Schwingungsamplitude. Dadurch behindern sie die Bewegung der Leitungselektronen, woraus eine temperaturabhängige Zunahme des elektrischen Widerstandes resultiert.

Man beschreibt diesen Effekt als positiven Temperaturkoeffizienten (T_k) des elektrischen Widerstandes. Er wird als Messeffekt ausgenutzt. Darüber hinaus stören Fehler in der Kristallstruktur des Metalles ebenfalls den Elektronenfluss. Hierzu zählen fremde oder fehlende Gitteratome, Gitterstörungen an Korngrenzen und Atome auf Zwischengitterplätzen. Da diese Störfaktoren temperaturunabhängig sind, ergeben sie einen zusätzlichen konstanten Widerstandswert.

Somit ist der Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischem Widerstand nicht mehr linear, sondern wird näherungsweise durch ein Polynom beschrieben. Metalle, die sich für die Verwendung als Widerstandsthermometer eignen, sollten einen möglichst großen T_k besitzen, damit die temperaturabhängige Veränderung des Widerstandswertes deutlich ausgeprägt ist. Darüber hinaus müssen die Werkstoffe aber noch weitere Forderungen, wie hohe chemische Beständigkeit, leichte Verarbeitbarkeit, die Möglichkeit der hochreinen Darstellung und eine gute Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften, erfüllen. Auch dürfen Widerstandsmaterialien ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften im zu messenden Temperaturbereich nicht ändern. Hysteresefreiheit und weitgehende Druckunempfindlichkeit sind weitere Forderungen.

Als Widerstandsmaterial hat sich für industrielle Anwendungen das Platin, trotz seines hohen Preises, durchgesetzt. Ersatzwerkstoffe wie Nickel, Molybdän oder Kupfer werden auch verwendet, spielen aber bisher nur eine untergeordnete Rolle.

Kennlinien von Platin-Widerstandsthermometern

Für den Werkstoff Platin lässt sich die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Temperatur besonders einfach darstellen. Hier genügt die Beschreibung durch Polynome der Form:

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad \text{für } t \geq 0 \text{ °C} \quad (1)$$

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3) \quad \text{für } t < 0 \text{ °C} \quad (2)$$

Dabei stellt der Wert R_0 den Widerstandswert des Thermometers bei 0 °C dar. Die Koeffizienten A, B und C, sowie alle wichtigen weiteren Eigenschaften, die Platin-Widerstandsthermometer erfüllen müssen, sind Inhalt der Norm EN 60751.

Bereits Callendar stellte 1886 für den Temperaturbereich $> 0 \text{ °C}$ die Abhängigkeit in Form einer quadratischen Gleichung dar. Dabei definierte er zunächst über einen rein linearen Ansatz, ähnlich wie beim Gasthermometer, die sogenannte Platin-Temperatur t_p durch die Beziehung:

$$t_p = 100 \times \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} = \frac{1}{\alpha} \times \frac{R}{R_0} - \frac{1}{\alpha} \quad (3)$$

Wenn man für α den mittleren Temperaturkoeffizienten zwischen 0 °C und 100 °C einsetzt, stellt die Gleichung eine lineare Abhängigkeit zwischen Widerstandswert R_t und der Temperatur t_p dar, bei der t_p sowohl bei 0 °C als auch bei 100 °C mit der wahren Temperatur t übereinstimmt. Für alle anderen Temperaturen unterscheidet sich t_p von der wahren Temperatur t .

Durch die Einführung einer zweiten Konstanten δ wird der Unterschied zwischen der wahren Temperatur t und der Platintemperatur t_p berücksichtigt:

$$R_t = R_0 \times \left(1 + \alpha + \alpha \delta \times \left(\frac{t}{100} \right) \times \left(1 - \frac{t}{100} \right) \right) \quad (4)$$

Somit ergibt sich die „historische“ Schreibweise zu:

$$t - t_p = \delta \times \left[\left(\frac{t}{100} \right)^2 - \left(\frac{t}{100} \right) \right] \quad (5)$$

Diese Formel ist als **Callendar-Gleichung** bekannt. Die reine Callendar-Gleichung führt jedoch bei Temperaturen $< 0 \text{ °C}$ schnell zu nicht vernachlässigbaren Abweichungen. Sie wurde von van Dusen 1925 um einen zusätzlichen Korrekturterm mit der Konstanten β erweitert (β ist für Temperaturen $\geq 0 \text{ °C}$ gleich Null). Diese erweiterte Gleichung, ist bekannt als **Callendar-van Dusen-Gleichung**.

Vom mathematischen Standpunkt aus gesehen, unterscheiden sich die Kennliniendarstellungen nach DIN EN und Callendar-van Dusen-Gleichung nicht. In beiden Fällen wird der Kennlinienverlauf über drei bzw. vier (bei $t < 0\text{ °C}$) Koeffizienten festgelegt. So ist es ohne großen Aufwand möglich, die Konstanten A, B, C in a, d und b umzurechnen.

Die Darstellung nach Callendar-van Dusen erfreute sich über viele Jahre deshalb so großer Beliebtheit, weil die darin verwendeten Konstanten sich leicht durch Kalibrierung an verschiedenen Temperaturen (0 °C , 100 °C etc.) direkt bestimmen lassen. Darüber hinaus besitzen die Kenngrößen α und δ quasi die Bedeutung von Materialkennwerten. So gibt der α -Wert Auskunft über die Reinheit des verwendeten Platins, der δ -Wert macht eine Aussage über die gelungene mechanische Konstruktion des Thermometers (Spannungsfreiheit).

Da seit Einführung der ITS-90 der Siedepunkt des Wassers (100 °C) kein definierender Punkt der Temperaturskala mehr ist, diese Temperatur aber zur Bestimmung des α -Wertes zwingend erforderlich ist, hat die Kennliniendarstellung nach Callendar-van Dusen in den letzten Jahren an Bedeutung verloren.

Üblicherweise erfolgt die Kennliniendarstellung heute nach den Gleichungen (1) und (2), mit den in der Norm EN 60751 festgelegten Koeffizienten:

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ K}^{-2}$$

$$C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ K}^{-4}$$

2.3 Messprinzipien zur Temperaturmessung

Die Entwicklung der Temperaturmessung verlief und verläuft parallel zur Erschließung verfügbarer Technologien. Dabei lösten neue Messmethoden nur zum Teil ältere ab. Sie ergänzten sie vielmehr und ermöglichten Temperaturmessungen, wo sie vorher nicht oder nur eingeschränkt möglich waren.

Im folgenden werden einige Messmethoden kurz dargestellt und deren Einsatzbereiche und Bedeutung erläutert. Hierzu eine Tabelle mit den Temperaturmessverfahren nach VDI/VDE 3511 Blatt1)

Messmethoden	Bereich		Fehlergrenzen
	von bis °C		
Mechanische Thermometer			
Flüssigkeits-Glasthermometer			
nicht benetzende Flüssigkeit	-38	630	nach DIN 16178 Blatt 1
benetzende Flüssigkeit	-200	210	
Zeigerthermometer			
Bimetallthermometer	-50	400	1...3 % des Anzeigebereiches
Stabausdehnungsthermometer	0	1000	1...2 % des Anzeigebereiches
Flüssigkeits-Federthermometer	-30	500	1...2 % des Anzeigebereiches
Dampfdruck-Federthermometer	-200	700	1...2 % der Skalenlänge
Thermoelemente			
Cu-CuNi, Typ U, T	-200	600	0,75 % des Sollwertes der Temperatur, mindestens nach EN 60584
Fe-CuNi, Typ L, J	-200	900	
NiCr-Ni, Typ K, NiCrSi-NiSi, Typ N	0	1300	
PtRh-Pt, Typ R, S 10 % Rh (S); 13 % Rh (R)	0	1600	0,5 % des Sollwertes der Temperatur, mindestens nach EN 60584
Pt Rh30-PtRh6, Typ B	0	1800	
Widerstandsthermometer mit Metallmesswiderständen			
Pt-Widerstandsthermometer	-200	1000	0,3...4,6 °C je nach Temperatur (EN 60751)
Ni-Widerstandsthermometer	-60	250	0,4...2,1 °C je nach Temperatur (nach DIN 43760)

Tab. 2-2: Messmethoden

Messmethoden	Bereich		Fehlergrenzen
	von bis °C		
Widerstandsthermometer mit Halbleiter-Messwiderständen			
Heißleiter-Widerstandsthermometer, Thermistoren	-40 -60 -100	180 200 400	0,1...1 °C; 0,5...2,5 °C je nach Temperatur
Kaltleiter-Widerstandsthermometer		200	2...10 °C
Silizium-Messwiderstände	-70	175	0,2...1 °C
Halbleiter-Dioden/integrierte Temperaturaufnehmer		160	0,1...3 °C je nach Temperatur
Strahlungsthermometer			
Spektralpyrometer	20	5000	0,5...1,5 % der Temperatur, mindestens jedoch 0,5...2 °C im Bereich von -100...400 °C
Bandstrahlungs-pyrometer	-100	2000	0,5...1,5 % der Temperatur, mindestens jedoch 0,5...2 °C im Bereich von -100...400 °C
Gesamtstrahlungs-pyrometer	-100	2000	0,5...1,5 % der Temperatur, mindestens jedoch 0,5...2 °C im Bereich von -100...400 °C
Verhltnispyrometer	150	3000	0,5...1,5 % der Temperatur, mindestens jedoch 0,5...2 °C im Bereich von -100...400 °C
Thermografie-Geräte	-50	1500	0,5...1,5 % der Temperatur, mindestens jedoch 0,5...2 °C im Bereich von -100...400 °C
Quarzthermometer	-80	250	Auflösung 0,1 °C
Rauschthermometer	-269	970	0,1 %
Ultraschallthermometer		3300	ca. 1 %
Gasthermometer	-268	1130	abhängig von der Bauart
Optische Messverfahren			
Faseroptische Lumineszenzthermometer		400	0,5 °C
Faseroptisches Messsystem auf Basis der Raman-Streuung		600	1 °C

Tab. 2-3: Fortsetzung Messmethoden

Man unterscheidet zwischen den berührenden Temperaturmessmethoden und den berührungslosen Messmethoden. Die berührenden Messmethoden, die in der industriellen Temperatur-Messtechnik dominieren, lassen sich dabei in mechanische und elektrische Berührungsthermometer unterteilen.

2.3.1 Mechanische Berührungsthermometer

Die Ausdehnung von Gasen, Flüssigkeiten und festen Stoffen bei Temperaturerhöhung gehört zur täglichen Erfahrung. Im praktischen Einsatz zur Temperaturmessung, müssen aber spezifische Stoffeigenschaften berücksichtigt werden.

Betrachtet man einen festen Körper, so ist die Längenänderung (dL) eines Stabes unter dem Einfluss einer Temperaturänderung (dt) in erster Näherung dieser und der Stablänge (L) proportional:

$$dL = a \times L \times dt$$

Der Proportionalitätsfaktor a (linearer thermischer Längenausdehnungskoeffizient) ist eine stoffspezifische Größe. Die Integration dieser Gleichung führt, wenn von einer bei einer bestimmten Temperatur gegebenen Länge ausgegangen wird, auf die Länge des Stabes bei der Temperatur t . Da der Proportionalitätsfaktor a aber nur über geringe Temperaturbereiche als konstant angesehen werden kann, müssen bei einer größeren Temperaturdifferenz Glieder höherer Ordnung bei der Berechnung mit berücksichtigt werden.

Die technische Nutzung des beschriebenen Sensorprinzips führt zu den Stab- und Bimetallthermometern. Sie werden in der Industrie dort angewendet, wo vor Ort eine Anzeige ausreicht.

Die Abhängigkeit des Volumens einer Flüssigkeit von der Temperatur ist in analoger Weise anzugeben. Hier gilt jedoch der kubische Ausdehnungskoeffizient β . Er ist ebenfalls eine Größe, die von der Art der verwendeten Flüssigkeit abhängt.

Flüssigkeitsthermometern begegnet man im Alltag in Glasthermometern (Fieberthermometer, Fadenthermometer) oder als Direktanzeige bei Maschinen-Glasthermometern. Sie dienen vor Ort zur Temperaturüberwachung von Flüssigkeiten, Dämpfen und Gasen, in Rohrleitungen und Behältern.

Eine Variante stellt das Flüssigkeitsfederthermometer dar. Hier ist das metallische Thermometergefäß mit einem Kappillarrohr vollständig mit Flüssigkeit gefüllt. Änderungen der Temperatur führen zu einem Anstieg oder Abfall des Druckes, der über eine Membran auf eine elastische, verformbare Messfeder übertragen wird. Neuere Verfahren messen die Druckunterschiede und stellen diese über Drucktransmitter als Temperaturwerte dar.

Ersetzt man die Flüssigkeit durch ein Gas, so lassen sich prinzipiell gleiche Konstruktionsprinzipien wie bei Flüssigkeitsfederthermometern verwenden. Bei Gasdruckthermometern ist die Temperaturabhängigkeit des Gases aus der idealen Gasgleichung abzuleiten. Sie kann dann sowohl bei konstantem Druck als auch bei konstantem Volumen betrachtet werden. Auch Gasdruckthermometer werden für Vor-Ort-Messung und Darstellung der Temperatur, etwa in Maschinen, eingesetzt. Sowohl

bei Flüssigkeits- als auch bei Gasdruckthermometern ist zu beachten, dass eine vollständige Umspülung des Messkörpers mit dem Medium erfolgt, dessen Temperatur bestimmt werden soll.

2.3.2 Elektrische Berührungsthermometer

Thermoelemente

Werden zwei unterschiedliche Metalle miteinander verbunden, so entsteht eine Spannung. Diese Spannung ist zum einen von den kombinierten Metallen, zum anderen von der Änderung der Temperatur abhängig (Thermospannung).

Widerstandsthermometer

Metalle als elektrischer Leiter setzen dem Strom einen Widerstand entgegen, der durch die Schwingung der Gitteratome bedingt ist. Die Größe des Widerstandes ist abhängig von der Temperatur.

Halbleiter-Sensoren

Auch Halbleiter weisen eine charakteristische Änderung des elektrischen Widerstands bei Temperaturveränderung auf. Man unterscheidet hier Kaltleiter (PTC-Widerstände), und Heißleiter (NTC-Widerstände oder Thermistoren).

Halbleiter-PTC's sind polykristalline Keramiken auf Basis Bariumtitanat. Diese Zusammensetzung bedingt, dass neben dem Halbleitereffekt zusätzlich eine Ferroelektrizität auftritt. Das führt in einem engen Temperaturbereich zu einem sehr stark zunehmenden elektrischen Widerstand. Der ideale Einsatzbereich liegt zwischen $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zusätzlich weisen PTC's eine Sprungtemperatur auf, bei der sich der Anstieg des Widerstandes drastisch ändert. Aus diesem Grunde werden sie speziell für Grenztemperaturschalter in Maschinen und Anlagen eingesetzt.

Anders verhalten sich NTC's, die aus polykristalliner Mischoxidkeramik bestehen, mit Zusätzen von NiO , CaO , Li_2O . Die Herstellung erfolgt in einem Hochtemperatursinterverfahren. Sie werden standardmäßig in einem Temperaturbereich von $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingesetzt. Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur ist bei den NTC's annähernd exponentiell. Wegen der nichtlinearen Kennlinie und einer Drift bei Temperaturwechselbelastungen, ist der Einsatz von NTC's in der industriellen Messtechnik beschränkt. Aufgrund ihres günstigen Preises werden sie vornehmlich im Bereich der weißen Ware, in der Kfz-Industrie und in anderen Massenprodukten der Konsumgüterindustrie eingesetzt.

Silizium-Messwiderstände

Auch Silizium weist einen ausgeprägten positiven Temperaturkoeffizienten auf und kann deshalb zur Messung der Temperatur verwendet werden. Im Bereich zwischen $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeichnet sich die Kennlinie durch eine geringe Nichtlinearität aus. Silizium-Messwiderstände besitzen einen hohen Temperaturkoeffizienten und eine hohe Langzeitstabilität. Bisher haben sie keinen breiten Einsatz gefunden.

2.3.3 Weitere berührende Messprinzipien

Schwingquarz-Temperatursensoren

Schwingquarze, die in einem bestimmten Winkel geschnitten sind, weisen einen hohen Temperaturkoeffizienten der Resonanzfrequenz auf (ca. 100 ppm/K). Diese Quarze lassen sich zur Temperaturmessung verwenden. Ihre Frequenz-Temperatur-Charakteristik ist nicht linear, aber sehr gut reproduzierbar. Sie lässt sich über ein Polynom 5. Ordnung beschreiben. Der Einsatzbereich dieser Sensoren liegt typischerweise zwischen $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der prognostizierte breite industrielle Einsatz des 1986 vorgestellten Schwingquarzthermometers konnte nicht realisiert werden.

Rauschthermometer

Zur Ermittlung thermodynamischer Temperaturen ist das hochgenaue Rauschthermometer geeignet. Im Temperaturbereich $300\ldots 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht es eine Messunsicherheit von $0,1\text{ }\%$. Das Messprinzip beruht auf der Temperaturabhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit der Elektronen in einem unbelasteten Widerstand.

Im praktischen Einsatz ergeben sich allerdings Probleme, da das thermische Rauschen von Verstärkerbausteinen, Zuleitungen und anderen Komponenten aufwändig eliminiert werden muss. Der Einsatz des Rauschthermometers ist aufgrund seines hohen Preises auf Bereiche beschränkt, in denen übliche Thermometer ihre Eigenschaften ändern, aber nicht für eine Nachkalibrierung einfach entnommen werden können. Rauschthermometer werden z. B. durch Kernstrahlung in Reaktoren nicht beeinflusst. Sie werden oft in Kombination mit anderen elektrischen Thermometern eingesetzt.

Faseroptisches Temperaturmesssystem

Hierbei handelt es sich um ein spezielles Messsystem, bei dem Temperaturen lokal in einer Glasfaserleitung gemessen werden können. Es besteht aus einem Messgerät (Laserquelle, optisches Modul, Empfänger- und Auswerteeinheit) und aus einer Quarzglasfaser (Lichtwellenleiter). Thermische Molekülschwingungen des Quarzglasmaterials bewirken eine Raman-Streuung innerhalb des Lichtwellenleiters. Der Anti-Stokes-Anteil des Raman-Streulichtes ist von der Temperatur abhängig. Durch Auswertung der Intensität wird die lokale Fasertemperatur bestimmt. Auf diesem Wege kann die

Temperaturverteilung in Kabeln, Leitungen, Rohren etc. mit Hilfe von Lichtleitfasern gemessen werden. Es dient zur Ermittlung lokaler Temperaturunterschiede (Temperaturerhöhungen), die auf Fehler, Schäden in Kabeln, Leitungen, Rohren etc., hindeuten.

Faseroptisches Thermometer

Das faseroptische Thermometer besteht aus einer Glasfaser, an deren Spitze ein Kristall, z. B. ein Cr-YAG-Kristall, befestigt ist. Dieser wird pulsformig durch Lumineszenzstrahlung angeregt. Die Anregungsdauer der Anregungszustände und damit die Abklingzeit der Lumineszenzstrahlung nimmt mit steigender Temperatur ab. Der Anwendungstemperaturbereich liegt zwischen $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vorteile bieten die faseroptischen Thermometer in Bereichen, in denen hohe elektromagnetische Felder zu erwarten sind sowie in explosionsgefährdeten Bereichen. Hier ist besonders die Anwendung in industriellen Mikrowellenanlagen, etwa Trocknern, zu nennen.

2.3.4 Berührungslose Temperaturmessung

Infrarot-Messtechnik, Pyrometrie

Die Wahrnehmung der Strahlungswärme eines heißen Körpers gehört zu den Grunderfahrungen der Menschheit. Die Messung der Temperaturstrahlung (Infrarotstrahlung) zur Feststellung der Temperatur eines Körpers zählt zu den neueren Temperaturmessmethoden im industriellen Bereich.

Beim Pyrometer wird die von einem Körper emittierte Wärmestrahlung über eine Optik auf einen Strahlungsempfänger geleitet. Dieser kann aus Thermoelementen, Fotomultipliern, Fotowiderständen, Fotodioden etc. bestehen. Die „Wärmestrahlung“ erzeugt ein elektrisches Signal, das zur Darstellung der Temperatur verwendet wird.

Unterschieden werden verschiedene Typen von Pyrometern, etwa Gesamtstrahlpyrometer, Spektralpyrometer, Bandstrahlpyrometer, Strahldichtepyrometer, Verhältnisspyrometer, Verteilungspyrometer und Glühfadenpyrometer.

Pyrometer können berührende Thermometer nur in wenigen Fällen ersetzen. Vielmehr ergänzen sie diese in Bereichen, in denen die berührende Messung keine oder nur unzureichende Ergebnisse erbringt. Grundsätzlich kann die Pyrometrie im Gegensatz zu berührenden Methoden nur die Wärme der Oberfläche erfassen.

Einsatzschwerpunkte sind Temperaturmessungen an Oberflächen, an schnell bewegten Teilen, an Objekten mit geringer Wärmekapazität oder Wärmeleitfähigkeit, an Objekten mit schneller Temperaturänderung und an Objekten, die schwer zugänglich sind. Auch Produkte, die aus Sterilitätsgründen oder Verarbeitungsgründen nicht berührt werden dürfen (z. B. in der Nahrungsmittelindustrie) eignen sich zur Temperaturmessung mit Pyrometern.

Wärmebildkamera

Prinzipiell nutzt die Wärmebildkamera die gleichen physikalischen Effekte wie ein Pyrometer. Während aber bei den Pyrometern die gesamte vom Objektiv betrachtete Fläche als Durchschnittstemperatur wiedergegeben wird, gibt die Wärmebildkamera vom betrachteten Objekt ein Wärmebild wieder. Dies erfolgt über Flächensensoren. Die Anzahl der vorhandenen Detektorelemente bestimmt die Bildgüte.

Wärmebildkameras werden heute vor allem im Bereich der Überwachung und Kontrolle von Maschinen, elektrischen und mechanischen Anlagen und Objekten eingesetzt, bei denen lokale Erhitzungen zu Ausfällen oder Schäden führen können bzw. wo Wärmeverluste festzustellen sind.

Akustische Messverfahren

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in verschiedenen Stoffen ist von der Temperatur abhängig (die absolute Temperatur ist dem Quadrat der Schallgeschwindigkeit proportional). Sie kann daher als Temperaturmessverfahren genutzt werden. Unterschieden wird nach den resonanten Verfahren (z. B. Quarzresonatoren) und nichtresonanten Verfahren, bei denen z. B. Schall-Laufzeitmessungen erfolgen.

Messfühler nichtresonanter Festkörpersensoren bestehen aus einem Rheniumdraht, der nach dem Puls-Echo-Prinzip arbeitet. Akustische Messverfahren sind besonders für hohe Temperaturen geeignet. Sie werden zur Messung von Temperaturprofilen in Verbrennungsräumen, etwa von Müllverbrennungsanlagen, genutzt. Ein Nachteil der akustischen Verfahren liegt in den relativ hohen Kosten.

3 Industrielle Temperaturmessung mit elektrischen Berührungsthermometern

3.1 Sensoren

3.1.1 Thermopaare

Die einfachste Form der Thermoelemente stellen Thermopaare aus isolierten Thermo-drähten dar. Als Isolationswerkstoffe werden üblicherweise Glasseide, Mineralfasern, PVC, Silikongummi, PFA oder Keramik verwendet. Sie müssen die gestellten Anforderungen am Einsatzort, wie zum Beispiel chemische Beständigkeit, Temperaturbeständigkeit, Feuchtigkeitsschutz etc., erfüllen.

Eine besondere Bauform der isolierten Thermo-drähte sind mineralisierte Mantel-thermoelement-Leitungen.

Thermopaare nach EN 60584 / IEC 584

Die in dieser Norm beschriebenen Thermoelemente werden allgemein in zwei Gruppen unterteilt. In die Edelmetall-Thermopaare Typ S, R und B, und die Unedelmetall-Thermopaare Typ E, J, K, N und T.

Diese standardisierten Typen sind Inhalt vieler nationaler Normen und bezüglich der Thermospannungsgrundwerte kompatibel. So ist es zum Beispiel möglich einen Typ K nach EN 60584 als Typ K nach ANSI-MC 96.1, oder auch als Typ K nach JIS C 1602 zu verwenden. Lediglich in den Grenzübereichungen bzw. Toleranzklassen kann es Unterschiede geben. Näheres regelt dann die jeweilige Norm.

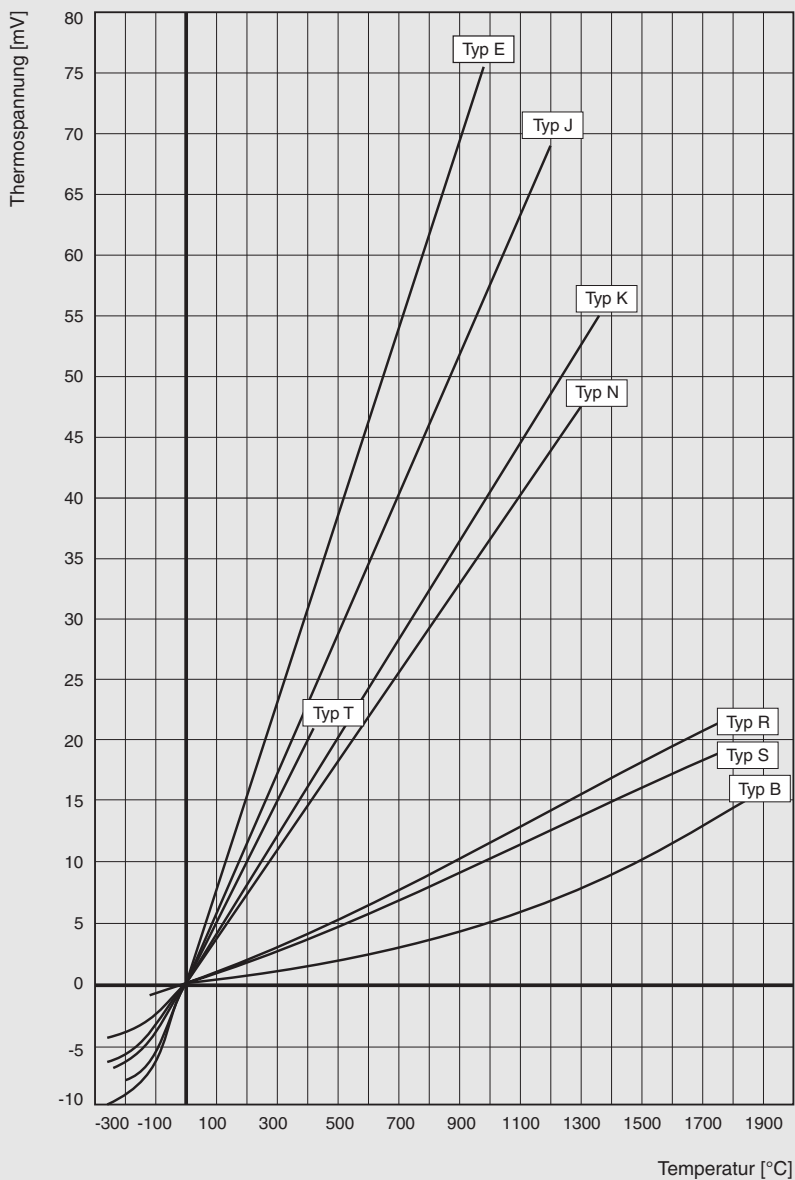


Bild 3-1: Grundwertdiagramm für Thermopaare nach EN 60584

Typ S (Pt10%Rh-Pt):

Definierter Temperaturbereich -50...1768 °C.

Das Typ S Thermopaar wurde schon vor über 100 Jahren von H. LeChatelier entwickelt und getestet. Bereits diese frühen Forschungen zeigten, dass die Hauptvorteile des Typ S in der Reproduzierbarkeit der Messwerte, seiner Stabilität und seiner Brauchbarkeit bei mittelhohen Temperaturen lag. Dies war in erster Linie der Grund warum es als Standardthermoelement für die internationale Temperaturskala, seit 1927 (ITS 27) bis zum 1. Januar 1990 (Einführung der ITS 90), ausgewählt wurde.

Der Typ S besteht in seiner nominellen Zusammensetzung aus Platin-10%Rhodium gegen Platin. Der positive Leiter (SP) enthält $10,00 \pm 0,05$ % Rhodium. Zur Legierung sollte ein Rhodium mit $\geq 99,98$ %, und ein Platin mit $\geq 99,99$ % Reinheit verwendet werden. Der negative Leiter (SN) besteht aus einem Platin mit $\geq 99,99$ % Reinheit. Das Typ S Thermoelement kann in einem Temperaturbereich von -50 °C bis fast zum Schmelzpunkt des Platins (1769 °C) betrieben werden. Dabei ist zu beachten, dass bei Dauerbetrieb die Ausgangsthermospannungswerte nur bis etwa 1300 °C stabil bleiben.

Die Lebensdauer des Thermopaars ist bei höheren Temperaturen begrenzt durch die physikalischen Probleme des Kornwachstums in den Leitern. Dadurch wird die mechanische Festigkeit verringert, Verunreinigungen können eindiffundieren und somit verändert sich die Thermospannung. Das Thermoelement ist am stabilsten wenn es in sauberer oxidierender Umgebung (zum Beispiel Luft) betrieben wird, aber auch kurzzeitiger Einsatz in reaktionsträger, gasförmiger Atmosphäre oder im Vakuum sind möglich. Ohne geeigneten Schutz sollte man es jedoch nicht anwenden in reduzierender Umgebung, in metallischen und nichtmetallischen Dämpfen, die zum Beispiel Blei, Zink, Arsen, Phosphor oder Schwefel enthalten, oder in leicht reduzierenden Oxiden.

Entscheidend für die Stabilität bei hohen Temperaturen ist außerdem die Qualität des verwendeten Schutzrohr- bzw. Isolationsmaterials. Keramiken, insbesondere Aluminiumoxid (Al_2O_3) mit einer Reinheit von ≥ 99 %, eignen sich für diesen Zweck am besten. Metallische Schutzrohre sollten dagegen niemals bei hohen Temperaturen (> 1200 °C) Verwendung finden.

Typ R (Pt13%Rh-Pt)

Definierter Temperaturbereich -50...1768 °C.

Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts bemerkte man, dass die in den USA und in Europa verwendeten Typ S Thermopaare große Thermospannungsdifferenzen zueinander aufweisen. In manchen Temperaturbereichen waren es bis zu 5 °C Unterschied. Grund war, dass das in Europa zur Legierung verwendete Rhodium mit 0,34 % Eisen kontaminiert war. Da aber schon viele Instrumente und Systeme auf diesen „verunreinigten Typ S“ kalibriert waren, entwickelte man als Kompromiss den Typ R, da dieser in seinen Thermospannungswerten vergleichbar ist.

Der Typ R besteht in seiner nominellen Zusammensetzung aus Platin-13%Rhodium gegen Platin. Der positive Leiter (RP) enthält $13,00 \pm 0,05$ % Rhodium. Zur Legierung

sollte ein Rhodium mit $\geq 99,98 \%$, und ein Platin mit $\geq 99,99 \%$ Reinheit verwendet werden. Der negative Leiter (RN) besteht aus einem Platin mit $\geq 99,99 \%$ Reinheit.

Typ R Thermopaare haben über den größten Teil des definierten Temperaturbereiches einen um etwa 12 % größeren Temperaturgradienten (Seebeck-Koeffizient) als Typ S Thermopaare. Die weiteren Materialeigenschaften sind identisch mit denen des Typs S.

Typ B (Pt30%Rh-Pt6%Rh)

Definierter Temperaturbereich $0^{\circ}\text{C} \dots 1820^{\circ}\text{C}$.

Das Typ B Thermopaar wurde Anfang der 50er Jahre von der Firma Degussa/Hanau auf den Markt gebracht, und erhielt zunächst den Markennamen PtRh18, unter dem es zum Teil heute noch bekannt ist. Es soll den Anforderungen an eine Temperaturmessung im Bereich $1200 \dots 1800^{\circ}\text{C}$ gerecht werden.

Der Typ B besteht in seiner nominellen Zusammensetzung aus Platin-30%Rhodium gegen Platin-6%Rhodium. Der positive Leiter (BP) enthält $29,60 \pm 0,2 \%$ und der negative (BN) $6,12 \pm 0,2 \%$ Rhodium. Zur Legierung sollte ein Rhodium mit $\geq 99,98 \%$, und ein Platin mit $\geq 99,99 \%$ Reinheit verwendet werden. Daneben finden sich in beiden Leitern noch geringe Verunreinigungen an Palladium, Iridium, Eisen und Silizium.

Untersuchungen haben gezeigt, dass Thermoelemente, bei denen beide Leiter aus Pt-Rh-Legierungen bestehen, geeignet sind zuverlässig hohe Temperaturen zu messen. Sie zeigen deutliche Vorteile gegenüber den Typen R und S in den Bereichen verbesserter Stabilität, erhöhter mechanischer Festigkeit und höherer Betriebstemperaturen. Der maximale Anwendungstemperaturbereich des Typ B wird in erster Linie begrenzt durch den Schmelzpunkt des Pt6%Rh-Leiters (BN) bei ca. 1820°C .

Ein Typ B Thermopaar kann, sachgerecht gehandhabt, für einige Stunden bei Temperaturen bis 1790°C , und einige hundert Stunden bei Temperaturen bis 1700°C betrieben werden, ohne dass sich die Ausgangsthermospannungswerte wesentlich ändern. Das Thermopaar arbeitet am verlässlichsten wenn es in sauberer, oxidierender Umgebung (zum Beispiel Luft), neutraler Atmosphäre oder im Vakuum betrieben wird. Dagegen sollte man es ohne geeigneten Schutz nicht in reduzierender Umgebung einsetzen. Auch für Umgebungen, die schädliche Dämpfe oder andere Verunreinigungen enthalten, die mit den Metallen der Platingruppe reagieren können, ist ein Schutz unumgänglich.

Zur Auswahl geeigneter Schutzrohr- und Isolationswerkstoffe gilt das gleiche wie bei Typ S.

Typ J (Fe-CuNi)

Definierter Temperaturbereich $-210 \dots 1200^{\circ}\text{C}$.

Wegen seines relativ großen Temperaturgradienten (Seebeck-Koeffizient) und der geringen Materialkosten ist der Typ J, neben dem Typ K, heute einer der gebräuchlichsten industriellen Thermoelemente.

Der Typ J besteht nominell aus Eisen gegen eine Kupfer-Nickel-Legierung. Der positive Leiter (JP) enthält handelsübliches Eisen mit einer Reinheit von ca. 99,5 %, ca. 0,25 % Mangan, ca. 0,12 % Kupfer, sowie geringere Anteile an Kohlenstoff, Chrom, Nickel, Phosphor, Silizium und Schwefel.

Der negative Leiter (JN) besteht aus einer Kupfer-Nickel-Legierung, die auch als Constantan bezeichnet wird. Dabei ist aber zu beachten, dass die im Handel befindlichen, mit Constantan bezeichneten, Legierungen einen Kupferanteil zwischen 45 % und 60 % enthalten können. Für JN wird jedoch normalerweise eine Legierung aus ca. 55 % Kupfer, ca. 45 % Nickel, sowie jeweils ca. 0,1 % Kobalt, Eisen und Mangan, verwendet.

Es muss auch betont werden, dass JN-Leiter nicht generell austauschbar sind mit Leitern vom Typ TN oder EN, obwohl diese ebenfalls unter dem Namen Constantan gehandelt werden. Hersteller von Typ J Thermopaaren kombinieren meist eine ausgesuchte Schmelze Eisen mit einer dazu passenden Charge Kupfer-Nickel, um die Thermospannungsgrundwerte von Typ J zu erreichen.

Da die Zusammensetzung beider Leiter (JP und JN) dabei von Produzent zu Produzent variieren kann, ist es nicht ratsam Einzelleiter von verschiedenen Fabrikanten zu beziehen, da sonst geforderte Toleranzklassen unter Umständen nicht eingehalten werden.

Obwohl die Grundwerte für Typ J in der Norm im Temperaturbereich von -210...1200 °C definiert sind, sollte man das Thermoelement im Dauerbetrieb nur im Bereich zwischen 0...750 °C einsetzen. Bei Temperaturen über 750 °C steigt die Oxidationsrate in Luft bei beiden Leitern rapide an.

Weitere Gründe liegen in den besonderen Eigenschaften des positiven Leiters (JP). Da Eisen in feuchten Atmosphären rostet und brüchig werden kann, ist es, ohne geeignete Schutzmaßnahmen, nicht sinnvoll ein Typ J Thermopaar bei Temperaturen unter 0 °C einzusetzen. Weiterhin durchläuft Eisen bei 769 °C eine magnetische Umwandlung (Curiepunkt) und bei ca. 910 °C eine Alpha-Gamma-Kristallstrukturänderung.

Beide Effekte, insbesondere der Letztere, haben großen Einfluss auf die thermoelektrischen Eigenschaften des Eisens, und damit auch auf das Typ J Thermoelement. Wird ein Typ J dennoch über 910 °C betrieben, werden sich die Ausgangsthermospannungswerte nicht unerheblich ändern, insbesondere nach rascher Abkühlung auf niedrigere Temperaturen.

Im Temperaturbereich 0...760 °C ist der Typ J im Vakuum, in oxidierender, reduzierender oder reaktionsträger Atmosphäre verwendbar. Er sollte allerdings nicht ohne geeigneten Schutz in schwefelhaltiger Umgebung bei Temperaturen über 500 °C eingesetzt werden.

Typ K (NiCr-NiAl)

Definierter Temperaturbereich -270...1372 °C.

Da dieser Thermopaartyp bei mittleren Temperaturen widerstandsfähiger gegen Oxidation als die Typen J und E ist, findet er heute weite Verbreitung bei Anwendungen über 500 °C. Das Thermopaar besteht nominell aus einer Nickel-Chrom-Legierung gegen eine Nickel-Aluminium-Legierung. Der positive Leiter (KP) ist materialidentisch mit dem positiven Leiter von Typ E und besteht aus 89...90 % Nickel, 9...9,5 % Chrom, ca. 0,5 % Silizium, ca. 0,5 % Eisen und kleineren Mengen an Kohlenstoff, Mangan und Kobalt. Der negative Leiter (KN) besteht aus 95...96 % Nickel, 1...2,3 % Aluminium, 1...1,5 % Silizium, 1,6...3,2 % Magnesium, ca. 0,5 % Kobalt, sowie minimalen Spuren an Eisen Kupfer und Blei.

Die Grundwerte des Typ K Thermoelementes sind in dem Bereich von -270...1372 °C definiert. Es ist jedoch zu beachten, dass bei Temperaturen über 750 °C die Oxidationsrate in Luft bei beiden Leitern stark zunimmt. Auch sollte es, ohne geeigneten Schutz, nicht bei höheren Temperaturen in schwefelhaltigen, reduzierenden oder wechselweise oxidierenden und reduzierenden Atmosphären eingesetzt werden.

Es gibt auch hier Effekte, die die Ausgangsthermospannungswerte mitunter drastisch verändern.

Wird ein Typ K über längere Zeit bei hohen Temperaturen im Vakuum betrieben, so verflüchtigt sich langsam das Chrom aus der Legierung im KP-Leiter („Vakuumempfindlichkeit“). Ist dagegen in der Umgebung ein kleiner, aber nicht vernachlässigbarer Anteil an Sauerstoff oder Wasserdampf vorhanden, kann es im KP-Leiter zur sogenannten „Grünfäule“ kommen. Dabei erfasst die Oxidation nur das leichter oxidierbare Chrom, das Nickel wird nicht oxidiert. Bei Temperaturen zwischen 800 °C und 1050 °C ist dies am ausgeprägtesten. „Grünfäule“ und „Vakuumempfindlichkeit“ haben irreversible Auswirkungen auf die Zusammensetzung des Leiters und damit auch auf die Thermospannung. Fehlmessungen bis zu mehreren 100 °C sind möglich!

Weiterhin durchläuft der Nickelschenkel KN bei 353 °C eine magnetische Umwandlung (Curiepunkt). Die Nickel-Chrom-Legierung des KP-Leiters unterliegt im Bereich von 400...600 °C einem Übergang von der geordneten in die ungeordnete Atomverteilung, den sogenannten „K-Zustand“. Wird ein Typ K bei Temperaturen über 600 °C betrieben und anschließend zu schnell abgekühlt, können sich diese Umwandlungseffekte nicht zurückbilden und ändern die Ausgangsthermospannungswerte um bis zu 5 °C.

Da beide Effekte jedoch reversibel sind, können sie durch nochmaliges Aufheizen über 600 °C und langsames Abkühlen wieder rückgängig gemacht werden (weiteres siehe auch Kapitel 3.5 „Alterungsmechanismen technischer Temperaturfühler“).

Typ N (NiCrSi-NiSi)

Definierter Temperaturbereich -270...1300 °C.

Der Typ N ist das Neueste in dieser Norm definierte Thermopaar. Es wurde Ende der 60er Jahre entwickelt und bietet durch seine höhere thermoelektrische Stabilität bei Temperaturen über 870 °C und geringere Neigung zur Oxidation deutliche Vorteile gegenüber Thermoelementen der Typen J, K und E.

Das Thermopaar besteht nominell aus einer Nickel-Chrom-Silizium-Legierung gegen eine Nickel-Silizium-Legierung. Der positive Leiter (NP) besteht aus ca. 84 % Nickel, 13,7...14,7 % Chrom, 1,2...1,6 % Silizium, <0,15 % Eisen, <0,05 % Kohlenstoff, <0,01 % Magnesium, sowie minimalen Spuren von Kobalt. Der negative Leiter (NN) besteht aus ca. 95 % Nickel, 4,2...4,6 % Silizium, 0,05...0,2 % Magnesium, <0,15 % Eisen, <0,05 % Kohlenstoff, sowie kleinen Mengen an Mangan und Kobalt. Bekannt sind die Leiter auch unter den Handelsnamen Nicrosil (NP) und Nisil (NN).

Der Typ N ist von allen Unedelmetall-Thermopaaren am besten für den Einsatz in oxidierenden, feuchten oder reaktionsträgen Atmosphären geeignet. Durch den relativ hohen Siliziumgehalt findet die Oxidation an der Oberfläche der Leiter statt. Fest anhaftende und schützende Oxide minimieren eine weitere Korrosion.

In reduzierender Umgebung oder in Luft zeigt das Thermoelement im Temperaturbereich von 870...1180 °C eine deutlich höhere thermoelektrische Stabilität als ein Thermopaar Typ K unter gleichen Bedingungen. Auch der bei Typ K auftretende „K-Zustand“ wird durch den Siliziumanteil weitestgehend unterdrückt. Bei höheren Temperaturen sollte es dagegen in schwefelhaltigen, reduzierenden oder wechselweise oxidierenden und reduzierenden Medien nicht ohne geeigneten Schutz eingesetzt werden.

Auch die beim Thermoelement Typ K beschriebenen Effekte „Grünfäule“ und „Vakuumempfindlichkeit“ treten beim Typ N auf, wobei allerdings im Vakuum nicht nur das Chrom, sondern auch das Silizium verdampft.

Achtung: Typ K und N können **nicht** gegeneinander ausgetauscht werden!

Typ T (Cu-CuNi)

Definierter Temperaturbereich -270...400 °C.

Da es eines der ältesten Thermoelemente für Tieftemperaturmessung ist, wird es auch heute noch gerne im Temperaturbereich vom Tripelpunkt des Neons benutzt (-248,5939 °C)...370 °C.

Der Typ T besteht nominell aus Kupfer gegen eine Kupfer-Nickel Legierung. Der positive Leiter (TP) besteht aus ca. 99,95 % reinem Kupfer mit einem, vom Schwefelgehalt des Kupfers abhängigen, Sauerstoffgehalt von 0,02...0,07 %. Die restlichen Verunreinigungen betragen zusammen ca. 0,01 %. Der negative Leiter (TN) besteht aus einer, auch als Constantan bezeichneten Kupfer-Nickel Legierung mit ca. 55 % Kupfer,

ca. 45 % Nickel, sowie jeweils ca. 0,1 % Kobalt, Eisen und Mangan. Der TN-Leiter ist identisch mit dem EN-Leiter und kann mit diesem getauscht werden. Er ist jedoch nicht generell identisch mit Leitern vom Typ JN.

Das Thermopaar Typ T zeichnet sich durch gute thermoelektrische Homogenität aus. Durch die gute Wärmeleitfähigkeit der Leiter kann es allerdings bei Präzisionsmessungen durch Wärmeableitung zu Problemen kommen, insbesondere wenn der Leiterdurchmesser sehr groß ist. Der Typ T kann im Vakuum, in oxidierender, reduzierender oder reaktionsträger Atmosphäre eingesetzt werden.

Zu beachten ist, dass die Oxidationsrate des TP-Leiters oberhalb 370 °C drastisch zunimmt. Das Thermopaar in wasserstoffhaltiger Umgebung oberhalb 370 °C ohne geeigneten Schutz zu benutzen ist nicht ratsam, da der TP-Leiter sonst brüchig wird.

Typ E (NiCr-CuNi)

Definierter Temperaturbereich -270...1000 °C.

Das Thermopaar verfügt über eine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit, große Beständigkeit gegen feuchte Atmosphären, gute Homogenität, sowie einen relativ großen Temperaturgradienten (Seebeck-Koeffizient) bei extrem tiefen Temperaturen. Aus diesen Gründen ist es heute das am meisten gebrauchte Thermoelement für Tieftemperaturmessungen. Oberhalb von 0 °C hat es den größten Temperaturgradienten von allen in dieser Norm beschriebenen Thermopaaren.

Der Typ E besteht nominell aus einer Nickel-Chrom Legierung gegen eine Kupfer-Nickel-Legierung. Der positive Leiter (EP) ist materialidentisch mit dem bereits unter Typ K beschriebenen KP-Leiter, und der negative Leiter (EN) ist übereinstimmend mit dem unter Typ T beschriebenen TN-Leiter. Das Typ E Thermoelement kann in einem Temperaturbereich von -270...1000 °C betrieben werden. Bei Temperaturen über 750 °C nimmt die Oxidationsrate in Luft bei beiden Leitern stark zu. Da der EP-Leiter identisch mit dem KP-Leiter ist, treten auch hier die dort beschriebenen Effekte „Vakuumempfindlichkeit“, „K-Zustand“ und „Grünfäule“ auf.

Der Typ E ist weitgehend unempfindlich gegen oxidierende oder reaktionsträge Atmosphären. In schwefelhaltigen, reduzierenden oder wechselweise oxidierenden und reduzierenden Umgebungen sollte er dagegen ohne geeigneten Schutz nicht eingesetzt werden.

Typ	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Typ R, Typ S			
Temperaturbereich	0...1100 °C	0...600 °C	–
Grenzabweichung	± 1 °C	± 1,5 °C	–
Temperaturbereich	1100...1600 °C	600...1600 °C	–
Grenzabweichung	± [10,003 x (t - 1100)] °C	± 0,0025 x [t] °C	–
Typ B			
Temperaturbereich	–	–	600...800 °C
Grenzabweichung	–	–	± 4 °C
Temperaturbereich	–	600...1700 °C	800...1700 °C
Grenzabweichung	–	± 0,0025 x [t] °C	± 0,005 x [t] °C
Typ J			
Temperaturbereich	-40...375 °C	-40...333 °C	–
Grenzabweichung	± 1,5 °C	± 2,5 °C	–
Temperaturbereich	375...750 °C	333...700 °C	–
Grenzabweichung	± 0,004 x [t] °C	± 0,0075 x [t] °C	–
Typ K, Typ N			
Temperaturbereich	-40...375 °C	-40...333 °C	-167...40 °C
Grenzabweichung	± 1,5 °C	± 2,5 °C	± 2,5 °C
Temperaturbereich	375...1000 °C	333...1200 °C	-200...-167 °C
Grenzabweichung	± 0,004 x [t] °C	± 0,0075 x [t] °C	± 0,015 x [t] °C
Typ T			
Temperaturbereich	-40...125 °C	-40...133 °C	-67...40 °C
Grenzabweichung	± 0,5 °C	± 1 °C	± 1 °C
Temperaturbereich	125...350 °C	133...350 °C	-200...-67 °C
Grenzabweichung	± 0,005 x [t] °C	± 0,0075 x [t] °C	± 0,015 x [t] °C
Typ E			
Temperaturbereich	-40...375 °C	-40...333 °C	-167...40 °C
Grenzabweichung	± 1,5 °C	± 2,5 °C	± 2,5 °C
Temperaturbereich	375...800 °C	333...900 °C	-200...-167 °C
Grenzabweichung	± 0,004 x [t] °C	± 0,0075 x [t] °C	± 0,015 x [t] °C

Tab. 3-1: Klassen der Grenzabweichungen für Thermopaare nach EN 60584 bzw. IEC 584

Thermopaare nach DIN 43710

Für die in dieser Norm beschriebenen Thermoelemente Typ U (Cu-CuNi) und Typ L (Fe-CuNi) gibt es keine aktuellen nationalen oder internationalen Normengrundlagen mehr. Dennoch werden diese Thermopaare immer noch in vielen Anlagen eingesetzt. Sie wurden nicht in die EN 60584 bzw. IEC 584 übernommen, sondern sind durch die Typen J und T ersetzt worden. In der DIN 43710 wird daher empfohlen, diese Thermopaare für Neuanlagen und die Umrüstung bestehender Anlagen nicht mehr zu verwenden und auf die genannten Ersatzthermopaare (J, T) zu wechseln.

Achtung: Sie können nicht einfach gegeneinander ausgetauscht werden!

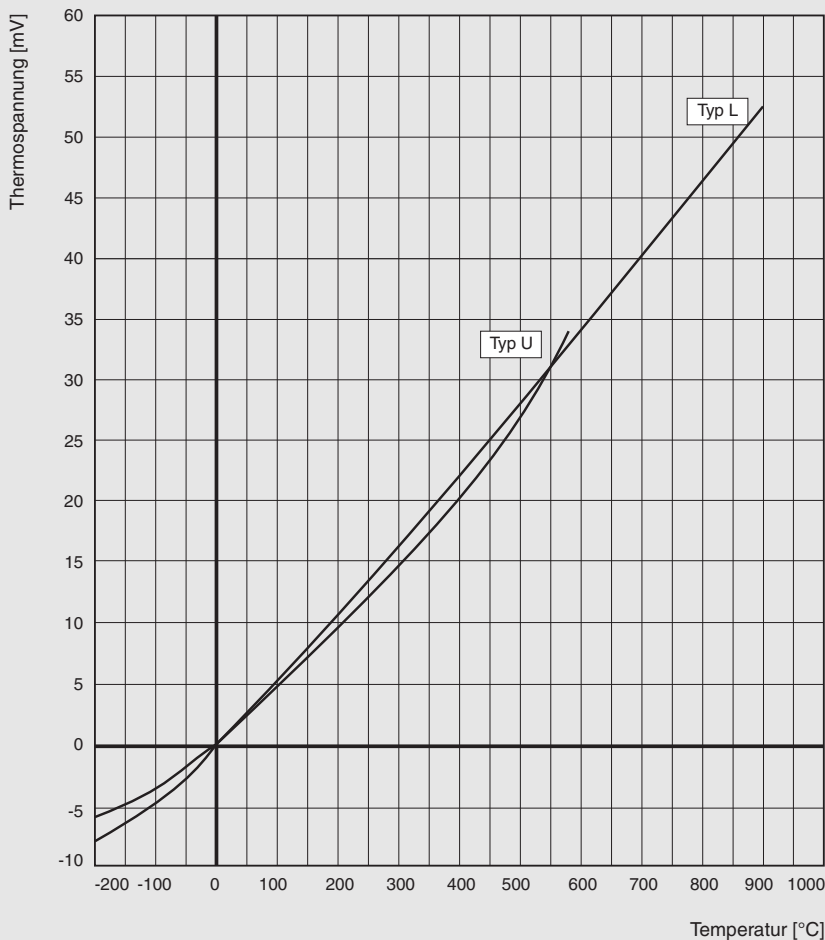


Bild 3-2: Grundwertdiagramm für Thermopaare nach DIN 43710

Typ U (Cu-CuNi)

Definierter Temperaturbereich -200...600 °C.

Der Typ U besteht nominell aus Kupfer gegen eine Kupfer-Nickel Legierung. Der positive Leiter (UP) besteht aus dem gleichen Kupfer wie der positive Leiter des in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Typ T. Der negative Leiter (UN) jedoch besteht aus einer Kupfer-Nickel Legierung (Constantan) mit ca. 55 % Kupfer, ca. 44 % Nickel und ca. 1 % Mangan.

Durch diesen geringen Unterschied in der Zusammensetzung sind die Grundwerte der Thermospannung des Typ U verschieden von denen des Typ T. Die weiteren Materialeigenschaften sind jedoch weitgehend identisch mit denen von Typ T.

Typ L (Fe-CuNi)

Definierter Temperaturbereich -200...900 °C.

Der Typ L besteht nominell aus Eisen gegen eine Kupfer-Nickel Legierung. Der positive Leiter (LP) besteht aus dem gleichen Eisen wie der positive Leiter des Typ J. Der negative Leiter (LN) besteht aus der gleichen Kupfer-Nickel Legierung (Constantan) wie der negative Leiter des Typ U. Deshalb sind die Grundwerte der Thermospannung des Typ L ebenfalls verschieden von denen des Typ J. Die weiteren Materialeigenschaften sind jedoch weitgehend identisch mit denen von Typ J.

Typ	DIN
Typ U	
Temperaturbereich	50...400 °C
Grenzabweichung	± 3 °C
Temperaturbereich	400...600 °C
Grenzabweichung	± 0,0075 x [t] °C
Typ L	
Temperaturbereich	50... 400 °C
Grenzabweichung	± 3 °C
Temperaturbereich	400...900 °C
Grenzabweichung	± 0,0075 x [t] °C

Tab. 3-2: Klasse der Grenzabweichungen für Thermopaare nach DIN 43710

Nicht genormte Thermopaare

Neben den genormten Thermoelementen gibt es eine ganze Reihe weiterer für spezielle Einsatzzwecke, die in keiner gültigen Norm standardisiert sind. Die Grundwertreihen dieser Thermopaare, müssen durch individuelle Kalibrierung vom Hersteller festgelegt werden.

Zu den Bekanntesten zählen:

Iridium-Iridiumrhodium (Ir-Ir40%Rh)

Für Labormessungen in neutraler oder schwach oxidierender Atmosphäre bei Temperaturen bis 2000 °C. Das Thermoelement besteht aus gewalzten, sehr spröden Drähten, die nicht gebogen werden können. Zur Isolation verwendet man Kapillarrohre aus reinstem Aluminiumoxid (Al₂O₃). Die Thermospannung beträgt ca. 10 mV bei 2000 °C.

*Wolfram-Wolframrhenium (W-W26%Rh),
Wolframrhenium-Wolframrhenium (W5%Rh-W26%Rh) und
Wolframrhenium-Wolframrhenium (W3%Rh-W25%Rh)*

Diese Thermopaare, die in den USA auch mit den Kennbuchstaben „G“, „C“ und „D“ gekennzeichnet werden, sind zum Gebrauch im Hochvakuum und in reaktionsträgen Gasen bis 2320 °C vorgesehen.

Die Thermospannung beträgt bei 2320 °C für W-W26%Rh ca. 38,6 mV, für W5%Rh-W26%Rh ca. 37,1 mV und für W3%Rh-W25%Rh ca. 39,5 mV, .

Pallaplat® (Pt5%Rh-Au46%Pd2%Pt)

Dieses Thermopaar kann bis 1200 °C in Luft eingesetzt werden, ist allerdings nicht geeignet in silizium- oder kohlenstoffhaltigen Umgebungen. Es verbindet die Stabilität eines Edelmetall- mit der hohen Thermospannung eines Unedelmetall-Thermoelementes. Die Thermospannung beträgt ca. 55,4 mV bei 1200 °C.

Goldeisen-Chrom (AuFe-Cr)

Dieses Thermoelement wird vor allem zur Tieftemperaturmessung im Bereich von -270...-200 °C genutzt. Bei -270 °C beträgt die Thermospannung ca. 4,7 mV.

3.1.2 Mineralisierte Mantelthermoelement-Leitungen

Mineralisierte Mantelthermoelement-Leitungen haben einen Außenmantel aus Metall und, je nach Ausführung, 2...6 Innendrähte aus Thermomaterial. Die Isolation besteht aus hochverdichtetem Metalloxidpulver, vorzugsweise Magnesiumoxid MgO, oder Aluminiumoxid Al₂O₃.

Sie werden überall dort eingesetzt, wo besonders hohe Anforderungen in Bezug auf mechanische, chemische und elektrische Stabilität gestellt werden. Wegen ihrer guten Biegebarkeit werden diese Leitungen bevorzugt auch dort eingesetzt, wo schwierige räumliche Verhältnisse bestehen und ein flexibler Einsatz gewünscht ist, wie z. B. im Maschinenbau, Labor oder in Versuchsanlagen.

Die minimalen Biegeradien liegen bei ca. 3 x Außendurchmesser der Leitung. Durch die Entwicklung rationeller Herstellungsverfahren sind Mantelleitungen heute ein immer häufiger eingesetztes Vormaterial zur Herstellung genormter Thermoelemente, insbesondere im Bereich der industriellen Mess- und Regeltechnik sowie in der Kfz-Sensorik.

Bedingt durch den metallischen Außenmantel sind diese Thermoelemente, fachgerechte Erdung vorausgesetzt, weitestgehend unempfindlich gegen feldinduzierte elektromagnetische Störungen (EMV).

Isolation und Isolationswiderstand

Die erreichbaren Isolationswiderstände sind von der Reinheit der verwendeten Isolations-Keramik abhängig. Neben dem Standardwerkstoff MgO mit einer Reinheit von > 97 % kann MgO mit einer Reinheit von 99,4% und Al₂O₃ geliefert werden. Da diese Oxide stark hygroskopisch sind, muss bei der Verarbeitung der Leitung streng darauf geachtet werden, dass nach Öffnen der Versiegelung oder dem Zuschneiden der Leitung diese wieder ausreichend getrocknet und unmittelbar nach dem Trocknen die offenen Enden feuchtigkeitsdicht verschlossen werden. Ein längeres Lagern mit offenen Enden sollte unbedingt vermieden werden.

Da der Isolationswerkstoff von mineralisierten Mantelthermoelement-Leitungen und mineralisierten Mantelthermoelementen eine geringe elektrische Rest-Leitfähigkeit hat, nimmt auch der Isolationswiderstand mit steigender Länge der Leitung oder des Thermoelementes ab. Deshalb wird er als längenbezogener Widerstand in der Dimension Ω x m bzw. MΩ x m angegeben.

Bei Längen unter 1 m wird der Isolationswiderstand längenunabhängig angegeben. Nach EN 61515 muss der Isolationswiderstand mit einer Prüfspannung von 75 ±25 V DC für Außendurchmesser ≤1,5 mm und mit 500 ±50 V DC für Außendurchmesser >1,5 mm gemessen werden.

	Eintauchtiefe auf Prüftemperatur min. m	Prüftemperatur °C	Isolationswiderstand min. MΩ x m
Umgebungs- temperatur	1	20 ±15	1000
Erhöhte Temperatur Typen J, K, N, E	0,5	500 ±15	5
Erhöhte Temperatur Typ T	0,5	300 ±15	500

Tab. 3-3: Mindestisolationswiderstand von mineralisierten Mantelthermoelement-Leitungen nach EN 61515

	Länge des Themo- elementes m	Eintauchtiefe auf Prüf- temperatur m	Prüf- temperatur °C	Isolations- widerstand min. MΩ x m	Isolations- widerstand min. MΩ
Umgebungs- temperatur	≥ 1	Gesamtlänge	20 ±15	1000	–
Umgebungs- temperatur	< 1	Gesamtlänge	20 ±15	–	1000
Erhöhte Temperatur Typen J, K, N, E	alle Längen	50 % der Gesamtlänge max. 0,3	500 ±15	–	5
Erhöhte Temperatur Typ T	alle Längen	50 % der Gesamtlänge max. 0,3	500 ±15	–	500

Tab. 3-4: Mindestisolationswiderstand von mineralisierten Mantelthermoelementen mit isolierter Messstelle nach EN 61515

Bei Einsatz von mineralisierten Mantelthermoelementen ist weiter zu beachten, dass der Isolationswiderstand der verwendeten Isolierkeramik bei höheren Temperaturen stark abfällt. Wenn größere Längen des Mantelmaterials hohen Temperaturen ausgesetzt sind, kann es zu Messfehlern durch Nebenschlüsse bzw. Bildung von Nebenssensstellen über die Einbaulänge kommen.

Mantelwerkstoffe

Grundsätzlich sind mineralisierte Mantelthermoelement-Leitungen aus allen hinreichend duktilen Mantelwerkstoffen herstellbar, bevorzugt aber aus der gesamten Palette der austenitischen nichtrostenden Stähle.

Auch Nickellegierungen kommen für spezielle Anwendungsfälle in Frage. Es sind allerdings nicht alle Mantelwerkstoff-/Thermopaarkombinationen möglich, da zum Beispiel bei hochwarmfesten Mantelwerkstoffen die für die Bearbeitung erforderlichen Zwischenglüh Temperaturen zum Teil wesentlich über den maximal zulässigen Temperaturen für die Thermopaarwerkstoffe liegen. Als Mantelwerkstoffe kommen im allgemeinen folgende Stähle und Legierungen zur Anwendung:

1.4541 (entspricht AISI 321)

Max. Einsatztemperatur: 800 °C.

Einsatzgebiete: Kernkraft- und Reaktorbau, chemischer Apparatebau, Glühöfen, Wärmetauscher, Papier- und Textilindustrie, Petrochemie, Erdölindustrie, Fett- und Seifenindustrie.

Werkstoffeigenschaften: Gute interkristalline Korrosionsbeständigkeit, auch nach dem Schweißen. Gute Beständigkeit gegen Schwerölprodukte, Dampf und Verbrennungsabgase. Gute Oxidationsbeständigkeit. Gute Schweiß Eigenschaften bei allen Standard-Schweißverfahren, keine Schweißnachbehandlung notwendig, gute Verformbarkeit.

1.4571 (entspricht AISI 316 Ti)

Max. Einsatztemperatur: 800 °C

Einsatzgebiete: Kernkraft- und Reaktorbau, chemischer Apparatebau, Ofenbau, chemische und pharmazeutische Industrie.

Werkstoffeigenschaften: Erhöhte Korrosionsbeständigkeit gegenüber bestimmten Säuren durch Zusatz von Molybdän. Resistent gegen Lochfraß, Salzwasser und aggressive Industrieinflüsse. Gute Schweiß Eigenschaften bei allen Standard-Schweißverfahren, keine Schweißnachbehandlung notwendig. Gute Duktilität.

1.4749 (entspricht AISI 446)

Max. Einsatztemperatur: 1150 °C

Einsatzgebiete: Petrochemie, Metallurgie, Energietechnik und für Rekuperatoren, Wärmebehandlungsöfen, Anlagen für Wirbelbettfeuerungen, Müllverbrennungsanlagen.

Werkstoffeigenschaften: Extrem gute Beständigkeit gegen reduzierende schwefelhaltige Atmosphäre. Sehr gute Beständigkeit gegen Oxidation und Luft. Gute Beständigkeit gegen Korrosion durch Verbrennungsasche, Kupfer-, Blei- und Zinnschmelzen. Gute Schweiß Eigenschaften bei Anwendungen von Lichtbogen-Schweißen und WIG-Schweißen. Vorwärmung auf 200...400 °C wird empfohlen. Eine Nachbehandlung ist nicht notwendig.

1.4841 (entspricht AISI 314)

Max. Einsatztemperatur: 1150 °C

Einsatzgebiete: Dampfkessel und Hochöfen, Zement und Ziegeleiöfen, Glasherstellung, Erdöl- und Petrochemie, Ofenbau, Kraftwerke.

Werkstoffeigenschaften: Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit, auch bei hohen Temperaturen. Auch in kohlenstoff- und schwefelhaltigen Atmosphären geeignet. An Luft Oxidationsbeständigkeit bis 1000 °C (unterbrochener Betrieb) bzw. 1150 °C (kontinuierlicher Betrieb). Gut geeignet bei hoher Temperaturwechselbelastung. Langzeitige kontinuierliche Verwendung im Temperaturbereich von 425...850 °C wird nicht empfohlen. Gute Schweiß Eigenschaften bei Anwendung von Lichtbogen-Schweißverfahren. Thermische Nachbehandlung ist nicht notwendig. Gute Verformbarkeit im Anlieferungszustand. Nach längerem Einsatz ist mit leichter Versprödung zu rechnen.

1.4845 (entspricht AISI 310 S)

Max. Einsatztemperatur: 1100 °C

Einsatzgebiete: Dampfkessel und Hochöfen, Zement und Ziegeleiöfen, Glasherstellung, Erdöl- und Petrochemie, Ofenbau, Kraftwerke.

Werkstoffeigenschaften: Gute Beständigkeit gegen Oxidation und Sulfidierung. Durch den hohen Chromgehalt beständig gegen wässrige Lösung oxidierender Art sowie gute Beständigkeit gegen chlorinduzierte Spannungsriss-Korrosion. Gute Beständigkeit in Cyanidschmelzen und neutralen Salzsäuremelzen bei hohen Temperaturen. Für Grünfäule nicht empfindlich. Gut schweißbar. Es wird empfohlen, mit Wärmeeinbringung zu schweißen. Bei Gefahr interkristalliner Korrosion nach dem Schweißen Lösungsglühen.

1.4876 (entspricht Incolloy 800®)

Max. Einsatztemperatur: 1100 °C in Luft

Einsatzgebiete: Kraftwerke, Erdöl- und Petrochemie, Ofenbau.

Werkstoffeigenschaften: Durch Zusatz von Titan und Aluminium hat der Werkstoff besonders gute Werte für die Warmfestigkeit. Eignet sich für Anwendungszwecke, wo neben Zunderbeständigkeit höchste Belastbarkeit gefordert wird. Ausgezeichnet beständig gegen Aufkohlung und Aufstickung. Der Werkstoff ist gut schweißbar mit Lichtbogen- und WIG-Verfahren. Eine Wärmebehandlung nach dem Schweißen ist nicht erforderlich.

2.4816 (entspricht Inconel 600®)

Max. Einsatztemperatur: 1100 °C

Einsatzgebiete: Druckwasserreaktoren, Kernkraft, Ofenbau, Kunststoffindustrie, Wärmevergütung, Papier- und Nahrungsmittelindustrie, Dampfkessel, Flugmotoren.

Werkstoffeigenschaften: Gute allgemeine Korrosionsbeständigkeit, beständig gegen Spannungsriß-Korrosion. Ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit. Nicht empfohlen bei CO₂- und schwefelhaltigen Gasen oberhalb 550 °C und Natrium oberhalb 750 °C. An Luft beständig bis 1100 °C. Gute Schweiß Eigenschaften bei Anwendung aller Schweißtechniken. Vor dem Schweißen sollte das Material weichgeglüht sein, thermisches Nachbehandeln ist aber nicht notwendig. Ausgezeichnete Duktilität auch nach längerem Einsatz.

Platin 10% Rhodium

Max. Einsatztemperatur: 1300 °C

Einsatzgebiete: Glas-, elektrochemische und katalytische Technik, chemische Industrie, Laborbetriebe, Schmelz-, Glüh- und Brennöfen.

Werkstoffeigenschaften: Hochtemperaturbeständig bis 1300 °C. unter oxidierenden Bedingungen. In Abwesenheit von Sauerstoff, Schwefel, Silizium, hohe Warmfestigkeit bis 1200 °C. Besondere Beständigkeit in Halogenen, Essigsäuren, NaOCl-Lösungen etc. Versprödung durch Aufnahme von Silizium aus Armierungskeramiken. Über 1000 °C. Schwefeleutektika möglich. Phosphorempfindlichkeit.

3.1.3 Thermo- und Ausgleichsleitungen

Oft ist es erforderlich, die Vergleichsstelle eines Thermoelementes aus konstruktiven oder sicherheitstechnischen Gründen in größerer Entfernung von der Messstelle anzuordnen.

In anderen Fällen wird die Installation des Messkreises fest verlegt und das eigentliche Thermoelement als Messeinsatz ausgeführt, so dass es leicht ausgewechselt werden kann. Auch aus Kostengründen, besonders bei Edelmetall-Thermoelementen, ist es sinnvoll die Verbindung zur Vergleichsstelle in kostengünstigen Ersatzwerkstoffen auszuführen. Man verwendet dazu eine Verbindungsleitung zwischen dem eigentlichen Thermoelement und der Vergleichsstelle, welche, in einem eingeschränkten Temperaturbereich, die gleichen thermoelektrischen Eigenschaften wie das entsprechende Thermopaar besitzt. Diese „Bindeglieder“ sind die Thermo- und Ausgleichsleitungen. Der Anwendungsbereich dieser Leitungen ist in den meisten nationalen und internationalen Normen auf -25...200 °C begrenzt, bzw. ist abhängig von der Temperaturbeständigkeit des verwendeten Isolationswerkstoffes. Die Isolationswerkstoffe selbst sind so zu wählen, dass sie die gestellten Anforderungen „vor Ort“, wie zum Beispiel chemische Beständigkeit, Hitzebeständigkeit, Feuchtigkeitsschutz etc., erfüllen.

Begriffe

Thermoleitungen werden aus Thermodrähten oder Litzen hergestellt, welche die gleiche Nennzusammensetzung haben wie das entsprechende Thermoelement. Ausgleichsleitungen bestehen aus Ersatzwerkstoffen (andere Legierung) als das Thermopaar, besitzen aber in einem begrenzten Temperaturbereich die gleichen thermoelektrischen Eigenschaften. Da sich die Übereinstimmung der Thermospannung mit dem jeweiligen Thermoelement auf das Ausgleichsleitungspaar und nicht auf die einzelne Ader bezieht, dürfen an der Übergangsstelle zwischen den beiden Verbindungen keine Temperaturdifferenzen zwischen den Thermoschenkeln auftreten.

Andernfalls kommt es durch parasitäre Thermospannungen zu Messfehlern. Die erlaubten Grenzwertabweichungen einer Thermo- oder Ausgleichsleitung sind die Grenzwerte der zusätzlichen Abweichung in Mikrovolt, die in einem Messkreis entsteht, wenn eine solche Leitung in diesen eingefügt wird.

Thermo- und Ausgleichsleitungen nach EN 60584-3 / DIN 43722

Seit 1994 wurde die EN 60584-3 weltweit von allen wichtigen Industrienationen übernommen. Die DIN 43722 ist die leicht modifizierte deutsche Fassung der IEC 584-3: 1989.

Kurzbezeichnung:

Thermoleitungen (Originalwerkstoffe) werden mit dem Buchstaben X (X steht für **Extension**) gekennzeichnet, der dem Kennbuchstaben des Thermopaars nachgestellt wird, zum Beispiel: JX.

Ausgleichsleitungen (Ersatzwerkstoffe) werden mit dem Buchstaben C (C steht für **Compensation**) gekennzeichnet, der dem Kennbuchstaben des Thermopaars nachgestellt wird, zum Beispiel: KC.

Da für manche Thermoelemente unterschiedliche Ersatzwerkstoffe verwendet werden, müssen diese durch einen zusätzlichen Buchstaben unterschieden werden, zum Beispiel: KCA und KCB.

Farbkennzeichnung:

Die Farbe der Isolation des negativen Leiters für alle Thermopaartypen ist weiß, die des positiven Leiters entspricht den Angaben der nachstehenden Tabelle.

Typ des Thermopaars	Farbe des positiven Leiters und des Mantels	Farbe des negativen Leiters
S	orange	weiß
R	orange	weiß
B	grau	weiß
J	schwarz	weiß
K	grün	weiß
N	rosa	weiß
T	braun	weiß
E	violett	weiß

Tab. 3-5: Farbkennzeichnung von Thermo- und Ausgleichsleitungen nach DIN 43722

Der Außenmantel, falls vorhanden, hat die gleiche Farbkennzeichnung wie der positive Leiter. Eine Ausnahme bilden die Leitungen für eigensichere Kreise, bei denen die Farbe für alle Thermoelementtypen blau ist. Sind Thermo- oder Ausgleichsleitungen mit einem Stecker versehen, muss dieser in der Farbe des positiven Leiters oder des Mantels gekennzeichnet sein. Dabei ist der Stecker insgesamt einzufärben, oder es kann alternativ ein Farbpunkt auf der Oberfläche angebracht werden.

Grenzabweichungen:

Die untenstehende Tabelle zeigt die zulässigen Grenzabweichungen (in Mikrovolt) für Thermo- und Ausgleichsleitungen für den erlaubten Anwendungstemperaturbereich. Die in Klammern angegebenen Grenzabweichungen (in °C) entsprechen der Abweichung in Mikrovolt, wenn die Messstelle des gesamten Messkreises (Thermoelement mit angeschlossener Thermo- bzw. Ausgleichsleitung), ebenfalls auf der angegebenen Temperatur ist.

Typ des Thermo-paares	Typ der Leitung	Klasse der Grenzabweichungen		Anwendungs-temperatur-bereich	Temperatur der Messstelle
		1	2		
J	JX	$\pm 85 \mu\text{V} (\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C})$	$\pm 140 \mu\text{V} (\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C})$	-25...200 °C	500 °C
T	TX	$\pm 30 \mu\text{V} (\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C})$	$\pm 60 \mu\text{V} (\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C})$	-25...100 °C	300 °C
E	EX	$\pm 120 \mu\text{V} (\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C})$	$\pm 200 \mu\text{V} (\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C})$	-25...200 °C	500 °C
K	KX	$\pm 60 \mu\text{V} (\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C})$	$\pm 100 \mu\text{V} (\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C})$	-25...200 °C	900 °C
N	NX	$\pm 60 \mu\text{V} (\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C})$	$\pm 100 \mu\text{V} (\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C})$	-25...200 °C	900 °C
K	KCA	–	$\pm 100 \mu\text{V} (\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C})$	0...150 °C	900 °C
K	KCB	–	$\pm 100 \mu\text{V} (\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C})$	0...100 °C	900 °C
N	NC	–	$\pm 100 \mu\text{V} (\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C})$	0...150 °C	900 °C
R	RCA	–	$\pm 30 \mu\text{V} (\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C})$	0...150 °C	1000 °C
R	RCB	–	$\pm 60 \mu\text{V} (\pm 5,0 \text{ }^\circ\text{C})$	0...200 °C	1000 °C
S	SCA	–	$\pm 30 \mu\text{V} (\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C})$	0...100 °C	1000 °C
S	SCB	–	$\pm 60 \mu\text{V} (\pm 5,0 \text{ }^\circ\text{C})$	0...200 °C	1000 °C
B	BC	–	$\pm 40 \mu\text{V} (\pm 3,5 \text{ }^\circ\text{C})$	0...100 °C	1400 °C

Tab. 3-6: Klasse der Grenzabweichungen von Thermo- und Ausgleichsleitungen nach DIN 43722

3.1.4 Ältere nationale Normen

Für viele, in älteren Normen beschriebene Leitungen, gibt es oft keine nationalen oder internationalen Normengrundlagen, dennoch sind diese Produkte in vielen Anlagen weltweit eingesetzt. Für Neuanlagen und die Umrüstung bestehender Anlagen sollten nur noch die in vorigen Abschnitten beschriebenen Thermo- und Ausgleichsleitungen nach IEC 584-3: 1989 bzw. DIN 43722 Verwendung finden. Die bekanntesten, noch in Anwendung befindlichen, aber nicht mehr aktualisierten, nationalen Normen sind:

Ausgleichsleitungen nach DIN 43713 / DIN 43714

Kurzbezeichnung:

In der DIN 43713 bzw. DIN 43714 wird noch nicht zwischen Ausgleichs- und Thermoleitungen unterschieden. Alle Leitungen werden als Ausgleichsleitung, kurz AGL, bezeichnet, der die Norm DIN 43714 und die Nominalzusammensetzung des dazugehörigen Thermopaars nachgestellt wird, zum Beispiel: AGL DIN 43714 Fe-CuNi.

Farbkennzeichnung:

Die Farbe der Isolation des positiven Leiters ist für alle Thermopaartypen rot, die des negativen Leiters entspricht den Angaben der nachstehenden Tabelle.

Type des Thermopaars	Farbe des positiven Leiters	Farbe des negativen Leiters und des Mantels
S	rot	weiß
R	rot	weiß
L	rot	dunkelblau
K	rot	grün
U	rot	braun

Tab. 3-7: Farbkennzeichnug von Ausgleichsleitungen nach DIN 43714

Der Außenmantel, falls vorhanden, muss ebenfalls entsprechend obenstehender Tabelle eingefärbt sein, mit Ausnahme der Leitungen für eigensichere Messkreise, bei denen die Grundfarbe des Außenmantels für alle Thermoelementtypen hellblau, mit einem Streifen oder Kennfaden in der Farbe des jeweiligen negativen Leiters, ist.

Grenzabweichungen:

Die untenstehende Tabelle zeigt die zulässigen Grenzabweichungen (in °C) für Ausgleichsleitungen, die im angegebenen Anwendungstemperaturbereich betrieben werden.

Typ des Thermopaars	Art der Leitung	Zulässige Grenzabweichungen	Anwendungstemperaturbereich
Cu-CuNi (U)	Cu-CuNi	± 3,0 °C	0...200 °C
Fe-CuNi (L)	Fe-CuNi	± 3,0 °C	0...200 °C
NiCr-Ni (K)	NiCr-Ni	± 3,0 °C	0...200 °C
NiCr-Ni (K)	SoNiCr-SoNi1	± 3,0 °C	0...200 °C
NiCr-Ni (K)	SoNiCr-SoNi2	± 3,0 °C	0...100 °C
Pt10%Rh-Pt (S)	SoPtRh1-SoPt1	± 3,0 °C	0...200 °C
Pt10%Rh-Pt (S)	SoPtRh2-SoPt2	± 3,0 °C	0...100 °C
Pt13%Rh-Pt (R)	SoPtRh1-SoPt1	± 3,0 °C	0...200 °C
Pt13%Rh-Pt (R)	SoPtRh2-SoPt2	± 3,0 °C	0...100 °C

Tab. 3-8: Grenzabweichungen nach DIN 43710 für Ausgleichsleitungen nach DIN 43713

Thermo- und Ausgleichsleitungen nach ANSI-MC96.1 (USA)

Kurzbezeichnung:

Die ANSI-MC96.1 unterscheidet zwar zwischen Thermo- und Ausgleichsleitungen (extension and compensating cables), aber alle Leitungen werden einheitlich mit dem Buchstaben X gekennzeichnet, der dem Kennbuchstaben des Thermopaars nachgestellt wird, zum Beispiel: EX.

Farbkennzeichnung:

Die Farbe der Isolation des negativen Leiters ist für alle Thermopaartypen rot, die des positiven Leiters ist entsprechend nachstehender Tabelle.

Typ des Thermopaars	Farbe des Mantels	Farbe des positiven Leiters	Farbe des negativen Leiters
S	grün	schwarz	rot
R	grün	schwarz	rot
B	grau	grau	rot
J	schwarz	weiß	rot
K	gelb	gelb	rot
T	blau	blau	rot
E	violett	violett	rot

Tab. 3-9: Farbkennzeichnung von Thermo- und Ausgleichsleitungen nach ANSI-MC96.1

Der Außenmantel, falls vorhanden, ist ebenfalls entsprechend obenstehender Tabelle gefärbt.

Grenzabweichungen:

Die untenstehende Tabelle zeigt die zulässigen Grenzabweichungen (in Mikrovolt bzw. °C) für Thermo- und Ausgleichsleitungen, die im angegebenen Anwendungsbereich betrieben werden.

Typ des Thermopaars	Typ der Leitung	Klasse der Grenzabweichungen		Anwendungs-temperaturbereich
		Spezial	Standard	
E	EX	–	± 1,7 °C	0...200 °C
J	JX	± 1,1 °C	± 2,2 °C	0...200 °C
K	KX	–	± 2,2 °C	0...200 °C
T	TX	± 0,5 °C	± 1,0 °C	0...100 °C
R	SX	–	± 57 µV	0...200 °C
R	SX	–	± 57 µV	0...200 °C
S	SX	–	± 57 µV	0...200 °C
S	SX	–	± 57 µV	0...200 °C
B	BX	–	0 µV/-33 µV	0...100 °C

Tab. 3-10: Klasse der Grenzabweichungen von Thermo- und Ausgleichsleitungen nach ANSI-MC96.1

Thermo- und Ausgleichsleitungen nach NF C 42-324 (Frankreich)

Kurzbezeichnung:

Die NF C 42-324 unterscheidet zwar zwischen Thermo- und Ausgleichsleitungen (Câble de Extension et Câble de Compensation), aber eine Ausgleichsleitung kann ein Thermopaar sein, das sich vom dazugehörigen Thermoelement durch seine Zusammensetzung oder durch mindere thermoelektrische Güte (Toleranz) unterscheidet. Das heißt, Ausgleichsleitungen können materialidentisch oder nicht materialidentisch sein.

Thermoleitungen werden mit dem Buchstaben X gekennzeichnet, und dem Kennbuchstaben des Thermopaars nachgestellt, zum Beispiel: JX.

Ausgleichsleitungen werden mit dem Buchstaben C gekennzeichnet und dem Kennbuchstaben des Thermopaars nachgestellt, zum Beispiel: KC.

Farbkennzeichnung:

Die Farbe der Isolation des positiven Leiters ist für alle Thermopaartypen gelb, die des negativen Leiters ist gemäß Tabelle.

Der Außenmantel, falls vorhanden, ist ebenfalls entsprechend nachstehender Tabelle gefärbt.

Typ des Thermopaars	Thermo- leitung	Ausgleichs- leitung	Farbe des positiven Leiters	Farbe des negativen Leiters und des Mantels
S	–	SC	gelb	grün
R	–	SC	gelb	grün
B	–	BC	gelb	grau
J	JX	JC	gelb	schwarz
K	KX	KC	gelb	violett
K	–	VC	gelb	braun
K	–	WC	gelb	weiß
T	TX	TC	gelb	blau
E	EX	EC	gelb	orange

Tab. 3-11: Farbkennzeichnug von Thermo- und Ausgleichsleitungen nach NF C 42-324

Grenzabweichungen:

Die untenstehenden Tabellen zeigen die zulässigen Grenzabweichungen (in °C) für Thermo- und Ausgleichsleitungen die im angegebenen Anwendungstemperaturbereich betrieben werden.

Temperaturbereich	TX	JX	EX	KX
-25...250 °C	± 0,5 °C	± 1,5 °C	± 1,5 °C	± 1,5 °C

Tab. 3-12: Klasse der Grenzabweichungen von Thermoleitungen nach NF C 42-324

Temperaturbereich	TC	JC	EC	KC	VC	WC	SC	BC
-25...100 °C	±1,0 °C	±3,0 °C	±3,0 °C	±3,0 °C	±3,0 °C	±3,0 °C	±7,0 °C	±4,0 °C
100...200 °C	–	±3,0 °C	±3,0 °C	±3,0 °C	–	±3,0 °C	±7,0 °C	±4,0 °C
200...250 °C	–	±3,0 °C	±3,0 °C	–	–	–	–	–

Tab. 3-13: Klasse der Grenzabweichungen von Ausgleichsleitungen nach NF C 42-324

3.1.5 Messwiderstände

Bei der Verwendung von Messwiderständen wird die Temperaturmessung auf die Messung des elektrischen Widerstandes eines Sensors, der einer Temperatur ausgesetzt ist, zurückgeführt.

Bei Widerstandsthermometern wird die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Metallen, Halbleitern und Keramiken als Messeffekt benutzt. Es werden zwei Gruppen von Materialien bezüglich der Steigung ihrer Kennlinien unterschieden: NTC- und PTC-Fühler.

PTC-Fühler sind Materialien, deren Widerstand bei steigender Temperatur zunimmt (**p**ositive **t**emperature-**c**oeffizient) oder „Kaltleiter“. Zu ihnen zählen die metallischen Leiter, die für die Herstellung der nachfolgend erläuterten Messwiderstände eingesetzt werden.

Bei den NTC-Fühlern (**n**egative **t**emperature-**c**oeffizient) oder „Heißleiter“ handelt es sich häufig um Halbleiterfühler bzw. Keramiken, die eher für spezifische Einsatzfälle und Temperaturen verwendet werden.

Werkstoffe für Messwiderstände

An die Materialien zur Herstellung von Temperaturfühlern müssen verschiedene Anforderungen gestellt werden, um gute und reproduzierbare Messergebnisse sicher zu stellen.

- Großer Temperaturkoeffizient,
- geringe Abhängigkeit von Umwelteinflüssen (Korrosion, chemischer Angriff),
- großer Messbereich,
- Austauschbarkeit,
- hohe Langzeitstabilität,
- gute Verarbeitbarkeit.

In der industriellen Temperatur-Messtechnik hat sich Platin und in weitaus geringerem Umfang Nickel als Widerstandsmaterial durchgesetzt.

Aus diesem Grund werden beide Werkstoffe nachfolgend ausführlicher behandelt.

Der Platin-Messwiderstand mit einem Nennwert von 100 Ω (Pt 100) hat sich über die letzten Jahrzehnte als Industriestandard etabliert.

Nennwert

Die Widerstände werden nach ihrem Widerstandswert bei 0 °C benannt (Nennwert). Ni100 und Pt100 als häufigste Typen haben also 100 Ω bei 0 °C, Pt500 oder Pt1000 demnach 500 bzw. 1000 Ω bei 0 °C.

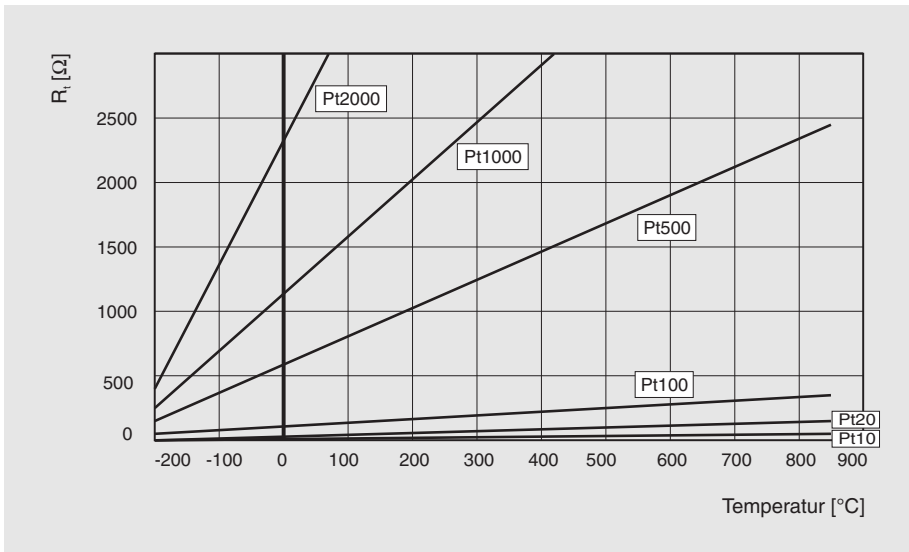


Bild 3-3: Abhängigkeit des Widerstandes R_t von der Temperatur für Platin-Messwiderstände mit unterschiedlichem Nennwert

Temperaturkoeffizient (TK)

Genauer gesagt, der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes. Er bezeichnet die Änderung des elektrischen Widerstandes zwischen zwei Temperaturen, meist zwischen 0 °C und 100 °C mit der Einheit:

$$\frac{\Omega}{\Omega \cdot K} \text{ somit dimensionslos als } \frac{1}{K}$$

Für kleine Temperaturbereiche kann man eine lineare Abhängigkeit des Widerstandes annehmen:

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)]$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100^\circ \text{C}}$$

Darin bedeuten:

t: Temperatur in °C

t₀: Bezugstemperatur (z. B. 0° C)

R_t: Widerstand bei der Temperatur t in Ω

R₀: Nennwiderstand; Widerstand bei 0 °C in Ω

α: mittlerer Temperaturkoeffizient zwischen 0 °C und 100 °C in K⁻¹

Werkstoff Platin

Zu seinen Vorteilen zählen die hochreine Herstellbarkeit, hohe chemische Beständigkeit, leichte Bearbeitbarkeit, die gute Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften und ein breiter Einsatzbereich zwischen -250 °C und 850 °C.

Der Temperaturkoeffizient von spektralreinem Platin liegt bei 0,003925 K⁻¹ und unterscheidet sich somit vom geforderten Wert für Pt-Messwiderstände. Das Platin für industrielle Platin-Temperaturmesswiderstände wird gezielt erzeugt.

Für den Platin-Sensor sind in der EN 60751 u. a. die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes, der Nennwert, die zulässigen Grenzabweichungen und der Temperaturbereich definiert.

Messcharakteristik von Platin

Vereinfacht:

Im Bereich von 0...100 °C hat Platin einen Temperaturkoeffizienten von 0,00385 K⁻¹, d. h. ein Messwiderstand Pt100 hat bei 0 °C 100 Ω und bei 100 °C 138,5 Ω.

Erweitert:

Bei der Definition der Grundwertreihe werden zwei Temperaturbereiche unterschieden:

Für -200...0 °C gilt ein Polynom dritten Grades

$$R_t = R_0 \left[1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100^\circ \text{C}) \cdot t^3 \right]$$

Für den Bereich von 0...850 °C gilt ein Polynom zweiten Grades

$$R_t = R_0 \left[1 + A \cdot t + B \cdot t^2 \right]$$

Nach EN 60751 gilt für die Koeffizienten:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$$

Für Temperaturen oberhalb 0 °C lässt sich die Abhängigkeit der Temperatur vom Widerstand als Funktion beschreiben zu:

$$t = -\frac{A}{2B} - \sqrt{\left(\frac{A}{2B}\right)^2 + \frac{R_t - R_0}{R_0 \cdot B}}$$

In den Grundwerttabellen der EN 60751 sind die Widerstandswerte zu den Temperaturen in Stufen von 1 K angegeben.

Für die Empfindlichkeit, d. h. die Widerstandsänderung pro K, gilt bei Temperaturen <0 °C:

$$\frac{\Delta R}{\Delta t} = R_0 \left(A + 2B \cdot t - 300^\circ \text{C} \cdot t^2 + 4 \cdot C \cdot t^3 \right)$$

Für Temperaturen über 0 °C gilt:

$$\frac{\Delta R}{\Delta t} = R_0 (A + 2B \cdot t)$$

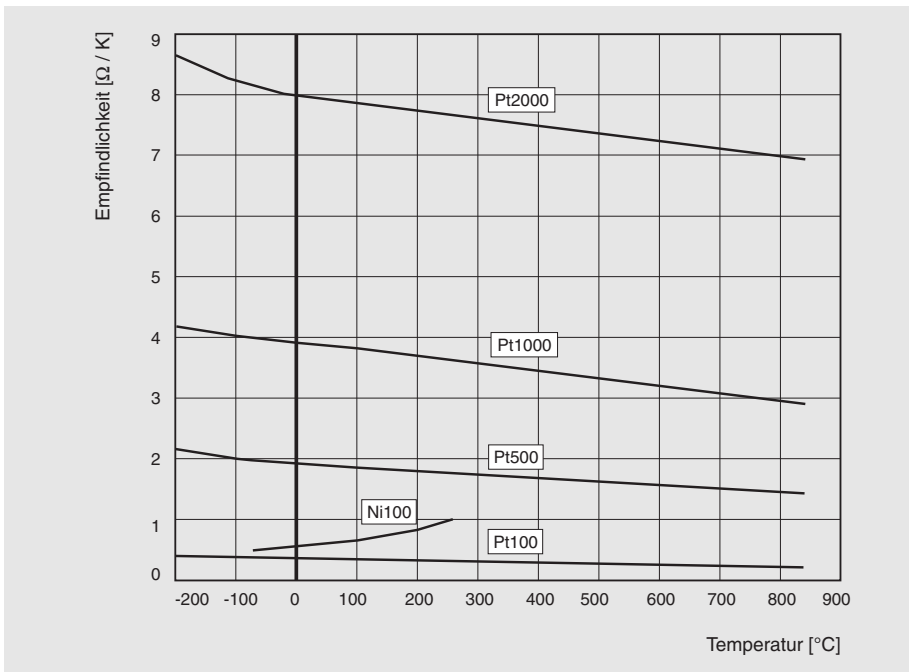


Bild 3-4: Empfindlichkeit dR/dT für Ni100 und Platin-Messwiderstände mit unterschiedlichem Nennwert

Toleranzklassen von Platin

Nach der EN 60751 sind Platin-Widerstandsthermometer nach ihren Grenزابweichungen Δt in zwei Toleranzklassen unterteilt:

Klasse A: $\Delta t = \pm(0,15^{\circ}\text{C} + 0,002 \cdot |t|)$

Klasse B: $\Delta t = \pm(0,30^{\circ}\text{C} + 0,005 \cdot |t|)$

Toleranz- Bezeichnung	Temperatur- Bereich	Toleranz in K	Grenzwertabweichung bei 0 °C			
			Tempe- ratur	Widerstand R ₀ = 100 Ω	R ₀ = 500 Ω	R ₀ = 1000 Ω
Klasse A	-200...650 °C	$\pm(0,15\text{K} + 0,002 \cdot t)$	$\pm 0,15\text{K}$	$\pm 0,06\ \Omega$	$\pm 0,29\ \Omega$	$\pm 0,59\ \Omega$
Klasse B	-200...850 °C	$\pm(0,30\text{K} + 0,005 \cdot t)$	$\pm 0,30\text{K}$	$\pm 0,12\ \Omega$	$\pm 0,59\ \Omega$	$\pm 1,17\ \Omega$
Grenzwertabweichung bei 100 °C						
Klasse A			$\pm 0,35\text{K}$			
Klasse B			$\pm 0,80\text{K}$			

Tab. 3-14: Grenزابweichung nach EN 60751 und erweiterte Grenzwertabweichung

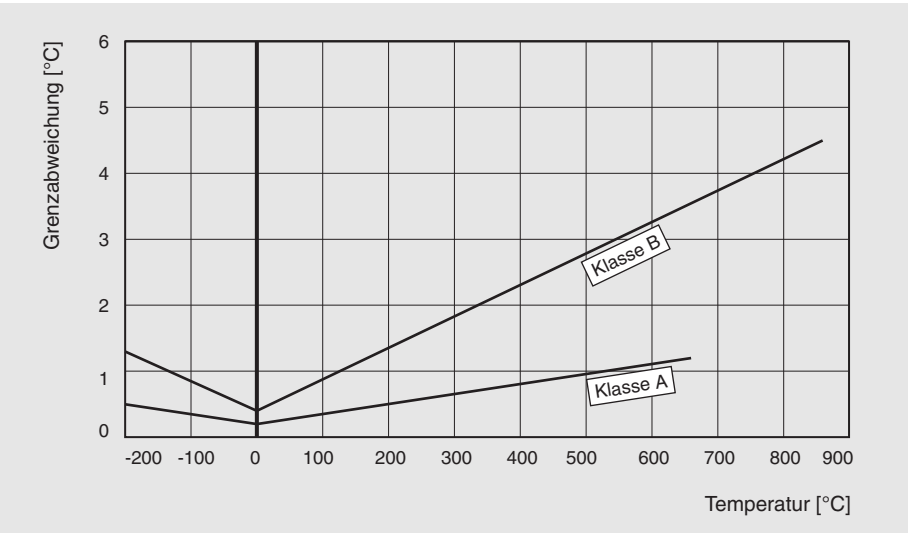


Bild 3-5: Grenزابweichung für Platin-Widerstandsthermometer in °C

Werkstoff Nickel

Er ist wesentlich preiswerter als Platin. Er weist einen fast doppelt so hohen Temperaturkoeffizienten auf, aber eine deutlich schlechtere chemische Beständigkeit. Der Messbereich reicht daher nur von -60...250 °C und die zulässigen Grenزابweichungen sind größer als bei Platin. Genormt sind die Nickel-Messwiderstände in der DIN 43760.

Messcharakteristik von Nickel

Vereinfacht:

Im Bereich von 0...100 °C hat Nickel einen TK von $0,00618 \text{ K}^{-1}$, d. h. ein Messwiderstand Ni100 hat bei 0 °C 100 Ω und bei 100 °C 161,8 Ω.

Erweitert:

Für den Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur gilt für Nickel im Temperaturbereich -60...250 °C:

$$R_t = R_0 \left(1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^4 + D \cdot t^6 \right)$$

mit

$$A = 0,5485 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$B = 0,665 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-2}$$

$$C = 2,805 \cdot 10^{-11} \text{ K}^{-4}$$

$$D = -2 \cdot 10^{-17} \text{ K}^{-6}$$

Nach DIN 43 760 beträgt der Sollwert 100,00 Ω (daher: Ni100). Daneben werden Widerstände mit $R_0 = 10 \text{ Ω}$, 1000 Ω oder 5000 Ω gefertigt.

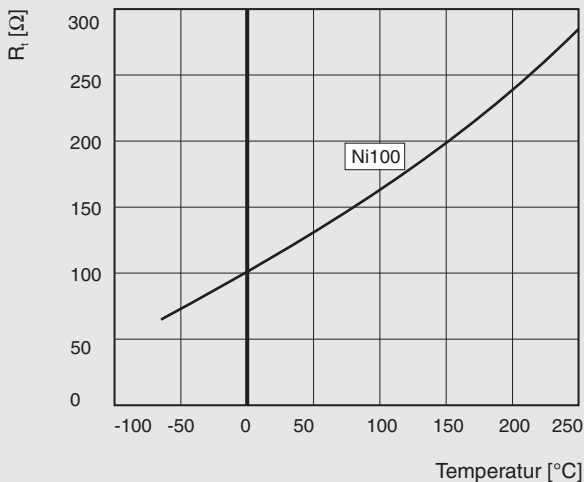


Bild 3-6: Abhängigkeit des Widerstandes R_t von der Temperatur für Ni100

In der Norm sind die maximal zulässigen Grenzabweichungen Δt für Nickelwiderstände definiert:

$$\Delta t = \pm(0,4^{\circ}\text{C} + 0,007 \cdot |t|) \quad \text{für } 0 \dots 250^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t = \pm(0,4^{\circ}\text{C} + 0,028 \cdot |t|) \quad \text{für } -60 \dots 0^{\circ}\text{C}$$

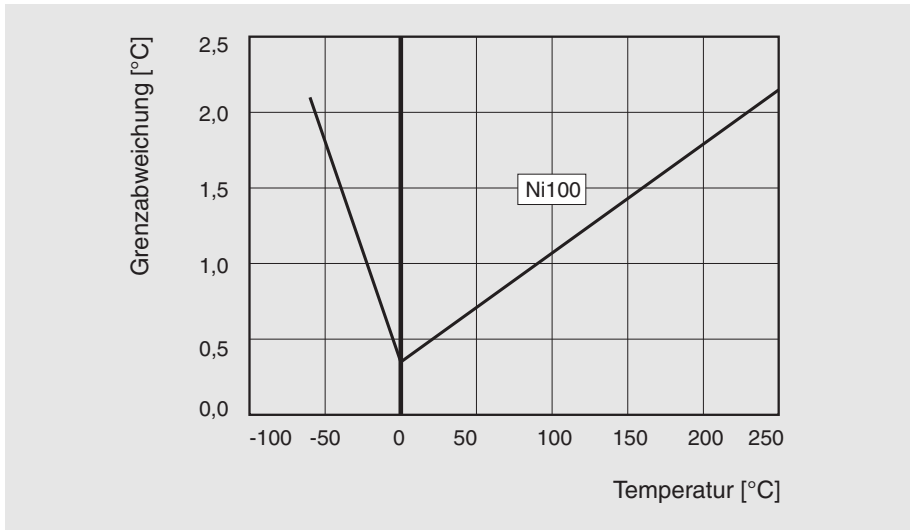


Bild 3-7: Maximale Grenzabweichungen in °C bei Ni100

Der Anwendungsbereich der Nickelsensoren findet sich häufig in der Heizungs-, Klima- und Lüftungstechnik.

Bauformen von Messwiderständen

Im Folgenden wird im wesentlichen auf Platin-Messwiderstände eingegangen. Man unterscheidet zwischen Metalldraht- und Metallschichtwiderständen. Als Basismaterial dienen Keramik-, Glas- oder Kunststoff-Trägerkörper.

Metalldrahtwiderstände

Die Messwendel besteht aus Platindrähten zwischen 10 µm und 50 µm Durchmesser.

Keramikwiderstände

Eine auf den Nennwert genau abgegliche Platinwendel mit Anschlussdrähten wird in die Längsbohrungen einer Keramik-Doppelkapillare eingezogen. In die Kapillarbohrungen wird Glasurfrittenpulver eingerüttelt. Die beiden Enden des Keramikkörpers werden ebenfalls mit Glasurfritte verschlossen. Nach Aufschmelzen der Glasurfritte sind die Anschlussdrähte und die Platinwendel fixiert.

Bei einer anderen konstruktiven Ausführung wird die Messwendel nicht in Bohrungen eines Keramikzylinders eingezogen, sondern in Schlitze des Keramikkörpers eingelegt. Die äußeren Abmessungen variieren im Durchmesser zwischen 0,9 mm bis 4,9 mm und in der Länge zwischen 7 mm und 32 mm.

Typischer Einsatz: anspruchsvolle Mess- und Regelaufgaben in der Verfahrenstechnik sowie Laboranwendungen.

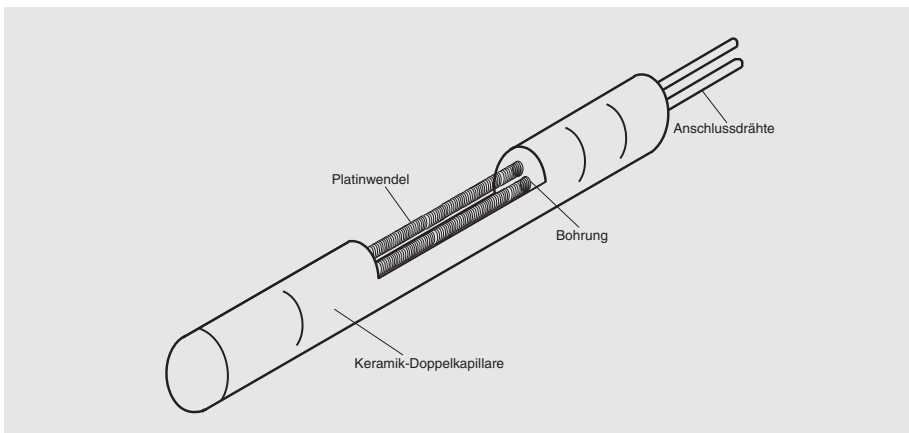


Bild 3-8: Keramik-Metalldrahtwiderstand

Glas-Messwiderstände

Hier wird die Messwendel bifilar auf einen Glasstab aufgewickelt, in das Glas eingeschmolzen und mit Anschlussdrähten versehen. Nach dem Abgleich wird ein dünnwandiges Stück Glasrohr über die Messwicklung geschoben und beide miteinander verschmolzen. Die geometrischen Abmessungen können im Durchmesser zwischen 0,9...5,0 mm und in der Länge zwischen 7...60 mm liegen.

Typischer Einsatz: chemischer Apparatebau.

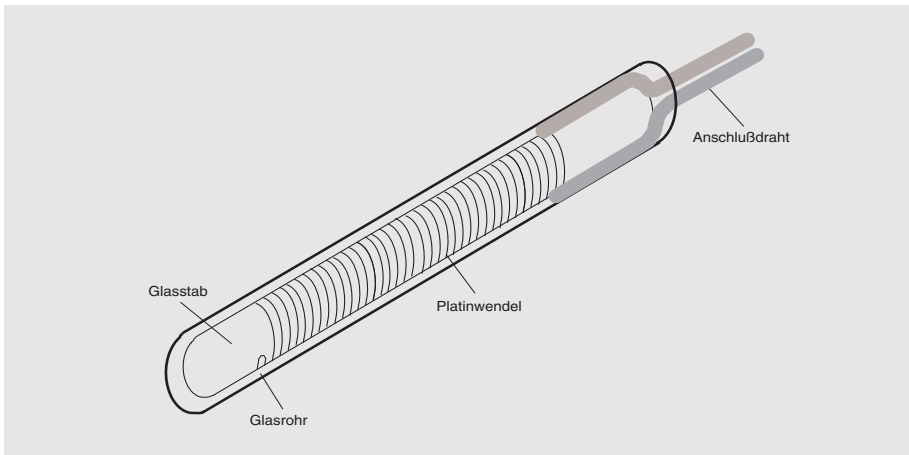


Bild 3-9: Glas-Messwiderstand

Nuten-Widerstandsthermometer

Die Platin-Messwicklung ist in Aussparungen des bandförmigen Kunststoffisolierkörpers druckentlastet eingelegt und mit Zuleitung zugentlastet verbunden. Der Isolierkörper ist einschließlich des Kabelaustritts mit Schrumpfschlauch überzogen. Die geometrischen Abmessungen können in der Breite zwischen 8 mm und 12 mm und in der Länge zwischen 63 mm und 250 mm liegen. Die Dicke beträgt 2 mm.

Typischer Einsatz: Temperaturmessung in den Wicklungen elektrischer Maschinen und an gewölbten Oberflächen

Folien-Temperatur Sensoren

Die Platin-Messwicklung ist zwischen zwei Polyimidfolien eingebettet und mit Anschlussdrähten verbunden. Die Dicke beträgt 0,17 mm.

Typischer Einsatz: Messung an Rohren

Metallschichtwiderstände

Anstelle der Messdrähte werden dünne Platinschichten als temperaturempfindliche Elemente verwendet. Die Schichten sind auf ebene Keramikträger aufgebracht. Es gibt mehrere Verfahren dünne Schichten abzuscheiden, z. B. Vakuumaufdampfen, Kathodenzerstäubung („Sputtern“) oder Einbrennen einer Platin-Dickfilmpaste.

Platin-Dickfilm-Messwiderstände

Bei dieser Ausführung wird eine Platinpaste auf ein Keramiksubstrat mittels Siebdruck aufgebracht und eingebrannt. Anschließend muss der Widerstand auf den Nennwert getrimmt, eine Glasschutzschicht, Anschlussdrähte und eine Zugentlastung aufgebracht werden. Die Dicke der Platinschicht liegt zwischen 10 µm und 15 µm.

Platin-Dünnschicht-Messwiderstände

Flachtypen

Keramiksubstrate werden durch Vakuumaufdampfen oder durch Kathodenzerstäuben mit einer 1...2 µm dicken Platinschicht beschichtet. Danach wird die Schicht durch Schneiden mit Lasern oder Fotolithografie strukturiert. Die Platin-Leiterbahnbreiten liegen zwischen 7 µm und 30 µm. Mit einem Lasertrimmer werden die Widerstände auf den Nennwert abgeglichen. Zum Schutz gegenüber mechanischer Einwirkung (Kratzer) wird eine 10 µm dicke glaskeramische Isolierschicht im Siebdruckverfahren aufgedruckt und eingebrannt. Nach dem Anschweißen der Anschlussdrähte werden die Schweißstellen mit einem Glas als Zugentlastung überschmolzen. Die geometrischen Abmessungen dieser Flachtypen reichen von 1,4 mm x 1,6 mm bis zu 2 mm x 10 mm, die Substratdicken von 0,25...0,65 mm.

Typischer Einsatz: alle Anwendungsbereiche; Oberflächenmessung

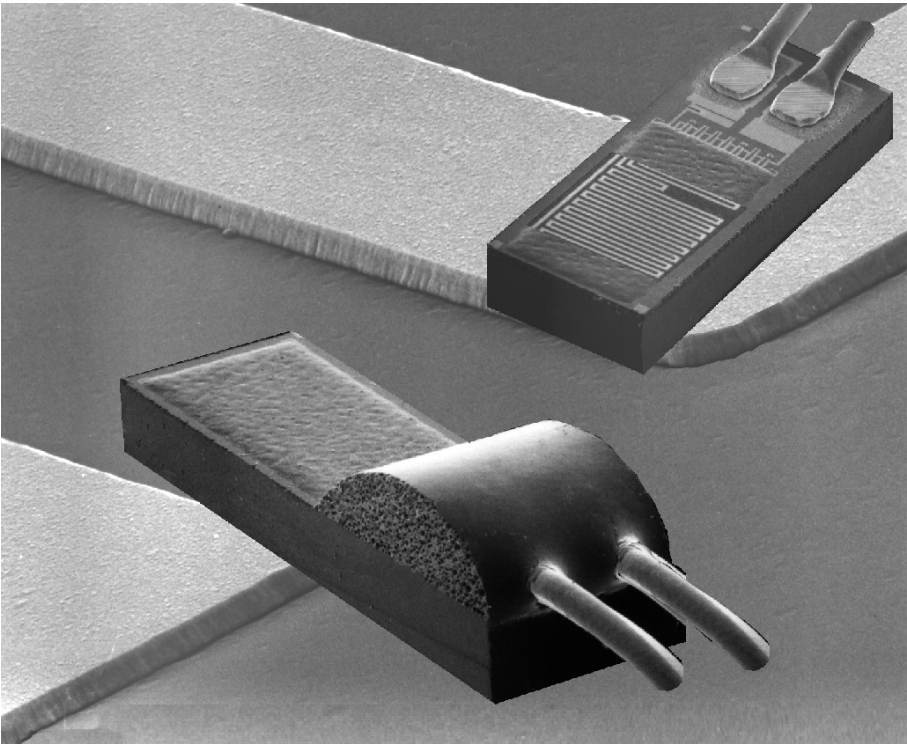


Bild 3-10: Dünnschicht-Messwiderstand

Dünnschicht-Röhrentypen

Neben den Dünnschicht-Flachtypen sind auch Dünnschicht-Messwiderstände in Rundbauform lieferbar. Bei dieser Ausführung werden Flachmesswiderstände in zylindrische Keramikröhrchen in Längsrichtung eingeführt. Durch Zuschmelzen der offenen Enden des Röhrchens mit einer Glasurfrötte, die gleichzeitig auch die beiden Enden des Messwiderstandes sowie die Anschlussdrähte umschmilzt und fixiert, erhält man eine Rundbauform. Durch die Keramikhölse ist der Dünnschicht-Messwiderstand zusätzlich geschützt. Die äußeren Abmessungen betragen für den Durchmesser 2...4,8 mm und für die Länge 5...14 mm.

Typischer Einsatz: Verfahrenstechnik

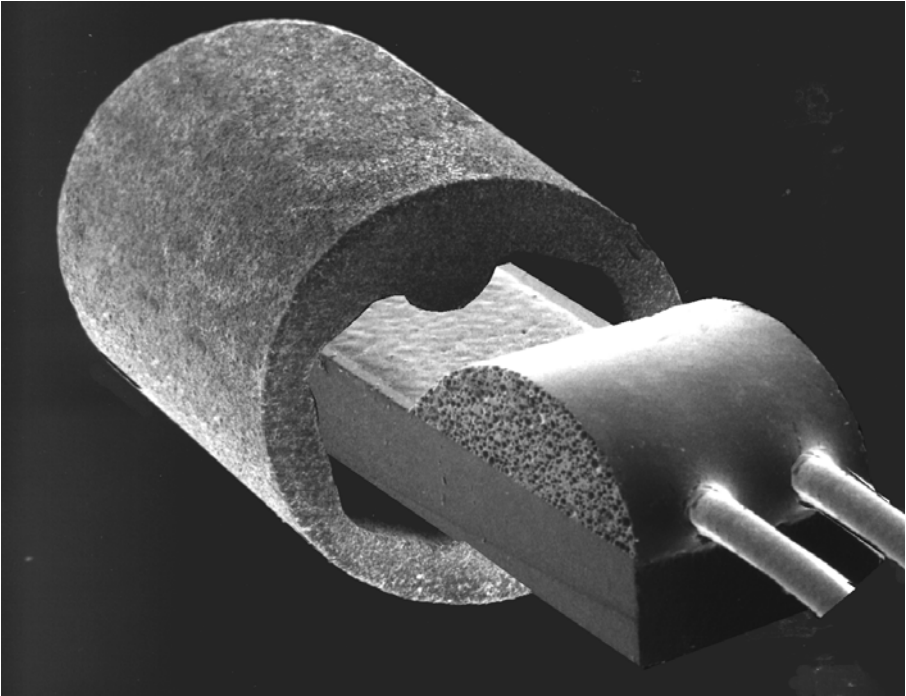


Bild 3-11: Dünnschicht-Röhrentyp (Einbauprinzip)

Dünnschicht-Platin-Messwiderstände mit lötfähigen Anschlussflächen

Hierbei werden die Anschlussflächen mit einer lötfähigen Metallisierung überzogen. Die Ausführung mit nebeneinanderliegenden Anschlussflächen mit Lötdepot eignet sich zum direkten Anschluss mit isolierten Kabeln. Bei Messwiderständen mit Anschlussflächen an entgegengesetzten Enden spricht man von „Surface Mounted Devices“, SMD, die direkt auf Leiterplatten und Hybridschaltungen aufgelötet werden können.

Typischer Einsatz: auf Platinen.

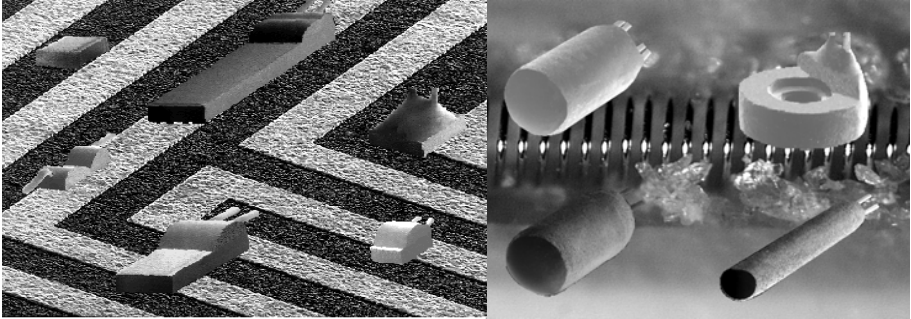


Bild 3-12: Bauformen von Dünnschicht- und Metalldraht-Messwiderständen

Auswahlkriterien und Einsatzgrenzen

Die Anwendungsgrenzen der Sensoren sind durch eine Vielzahl von Parametern gegeben. Der wichtigste ist zweifellos die Temperatur. Genau definierte Temperaturgrenzen sind schwer anzugeben. Sie sind, außer von der Temperatur, auch noch vom Messmedium, mechanischen Gegebenheiten (auch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten) und den Genauigkeits- bzw. Zuverlässigkeitsanforderungen abhängig.

Es ist nicht möglich, eine allgemeingültige Aussage darüber zu treffen, welche Widerstandsthermometer-Bauform die beste Lösung darstellt. Dies ist in starkem Maße vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig, der die Konstruktion des gesamten Thermometers bestimmt. Als Auswahlkriterien gelten:

– Temperaturbereich

Es ist selten erforderlich, dass für einen Anwendungsfall der gesamte in der Norm definierte Temperaturbereich abgedeckt werden muss. Für hohe Temperaturen ($> 600\text{ °C}$) werden Fühler mit speziellen Zuleitungswerkstoffen (NiCr) eingesetzt. Bei Anwendungen mit Temperaturschocks sind eher drahtgewickelte Typen zu bevorzugen.

– Geforderte Genauigkeit und Langzeitstabilität

Die Genauigkeiten ergeben sich aus den Toleranzklassen bzw. aus den tatsächlichen einzelnen Messwerten; für die Langzeitstabilität sind die besonderen Umgebungsbedingungen der spezifischen Messung zu berücksichtigen. Prinzipiell ist unter industriellen Bedingungen oberhalb 400 °C Vorsicht geboten, hier ist sorgfältig gegen Thermoelemente abzuwägen.

– Empfindlichkeit und Eigenerwärmung

Die Empfindlichkeit ist durch die Widerstandsänderung pro K definiert und beträgt beim Pt100 ca. 0,385 Ω/K und beim Pt1000 ca. 3,85 Ω/K. Da das Messsignal direkt vom Messstrom und Widerstand abhängt (der Spannungsabfall am Messwiderstand ist $U = R \cdot I$) bewirkt der Messstrom eine Eigenerwärmung des Messwiderstandes, die mit dem Strom quadratisch zunimmt. ($P = I^2 \cdot R$). Für genaue Messungen muss die Eigenerwärmung kleingehalten und damit der Messstrom begrenzt werden.

Vereinfacht lässt sich sagen, dass für industrielle Anwendungen bei den Messströmen moderner Messumformer die folgenden Betrachtungen meist entfallen können.

Erweitert:

$$I_{zul} = \sqrt[2]{\frac{EK \cdot \Delta T_{zul}}{R_0}}$$

$$\frac{dU}{dT} = \sqrt[2]{R_0} \cdot \alpha \cdot \sqrt[2]{T_{zul} \cdot EK}$$

mit

I_{zul} : zulässiger Messstrom

EK: Eigenerwärmungskoeffizient in W/K

ΔT_{zul} : zulässige Temperaturerhöhung

R_0 : Nennwiderstand

α : Temperaturkoeffizient

Typische Werte für die Spannungsempfindlichkeit bei einer zulässigen Temperaturerhöhung von 0,1 °C sind bei Schichtmesswiderständen für Pt100 ca. 0,1 mV/K und für Pt1000 ca. 0,4 mV/K bei Messungen in strömendem Wasser.

In Luft ergibt sich für Pt100 ca. 0,03 mV/K und 0,09 mV/K. Für die maximal zulässigen Messströme entspricht dies in fließendem Wasser für Pt100 ca. 6 bis 10 mA und für Pt1000 ca. 3 mA, in Luft für Pt100 ca. 2 mA und für Pt1000 ca. 1 mA. Drahtmesswiderstände haben einen etwas kleineren Eigenerwärmungskoeffizienten als Schichtmesswiderstände und können deshalb mit höherem zulässigen Messstrom betrieben werden (für Pt100 ist I_{zul} ca. 4 mA bis 14 mA in Wasser und 2 mA bis 3 mA in Luft). Ihr Nennwert ist aber auf 100 mW begrenzt.

- Ansprechzeit

Die Ansprechzeit des nackten Messwiderstandes ist selten von Bedeutung, da er im Regelfall in ein Thermometer eingebaut wird, dessen Konstruktion die Ansprechzeit dominiert. Nachfolgende Werte sind daher meist nur für Laboraufbauten relevant.

Die kleinen geometrischen Abmessungen von Schicht-Messwiderständen und die damit verbundenen geringen Wärmekapazitäten führen zu kurzen Ansprechzeiten $T_{0,5}$ von ca. 0,1 s in Wasser und ca. 3...6 s in Luft. Bei Drahtmesswiderständen liegen die Ansprechzeiten $T_{0,5}$ zwischen 0,2...0,5 s in Wasser und zwischen 4 s und 25 s in Luft.

- Geometrische Abmessungen und Zuleitungswiderstände

Die angegebenen Grundwertreihen und ihre zulässigen Grenzabweichungen gelten für die Messwiderstände einschließlich ihrer Anschlussdrähte (üblicherweise 10...30 mm lang) oder bei langen Anschlussdrähten bis zu einem definierten Sensorpunkt. Alle weiteren Leitungs- und Übergangswiderstände gehen in das Messergebnis ein, wenn sie nicht gesondert berücksichtigt oder durch geeignete Schaltungen kompensiert werden.

3.2 Temperaturfühlerkonstruktionen für die Industrie

3.2.1 Konstruktiver Aufbau

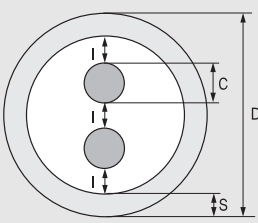
Temperaturfühler (Thermoelemente oder Widerstandsthermometer) können im Aufbau auf drei Grundversionen zurückgeführt werden:

- Mantel-Temperaturfühler
- Temperaturfühler mit auswechselbarem Messeinsatz
- Temperaturfühler für hohe Temperaturen (Gerade Thermoelemente)

Mantel-Temperaturfühler

Sie bestehen aus einem metallischen Rohr mit innenliegenden Drähten, die in ein Isolationspulver eingebettet sind. An einem Ende ist das Messelement gekapselt angefügt, am anderen Ende das Anschlusssteil, das aus einem Kabel, Stecker oder Anschlusskasten besteht.

Bei der Herstellung von mineralisierten Mantelleitungen wird von großen Ausgangsdurchmessern durch Ziehprozesse das eingebrachte Isolationspulver derart verdichtet, dass eine flexible, vibrationsfeste Einheit entsteht.

Außen Ø der Leitung (D) Nennwert ± Grenzabweichung mm	Mindestwanddicke (S) mm	Mindest Ø der Innenleiter (C) mm	Mindestdicke (I) der Isolation mm	
0,5 ± 0,025	0,05	0,08	0,04	 <p>D = Außendurchmesser C = Leiterdurchmesser S = Wanddicke I = Dicke der Isolation</p>
1,0 ± 0,025	0,10	0,15	0,08	
1,5 ± 0,025	0,15	0,23	0,12	
1,6 ± 0,025	0,16	0,24	0,13	
2,0 ± 0,025	0,20	0,30	0,16	
3,0 ± 0,030	0,30	0,45	0,24	
3,2 ± 0,030	0,32	0,48	0,26	
4,0 ± 0,045	0,40	0,60	0,32	
4,5 ± 0,045	0,45	0,68	0,36	
4,8 ± 0,045	0,48	0,72	0,38	
6,0 ± 0,060	0,60	0,90	0,48	
6,4 ± 0,060	0,64	0,96	0,51	
8,0 ± 0,080	0,80	1,20	0,64	
10,0 ± 0,100	1,00	1,50	0,80	

Tab. 3-15: Aufbau und Abmessungen von mineralisierten Mantelleitungen mit 2 Innenleitern

Man setzt Mantel-Temperaturfühler dort ein, wo z. B. an schwer zugänglichen Stellen gemessen werden muss.

Anwendungen:

Lagertemperaturmessung, Heißgaskanäle, offene Behälter, Labors, Prüfstände, usw.

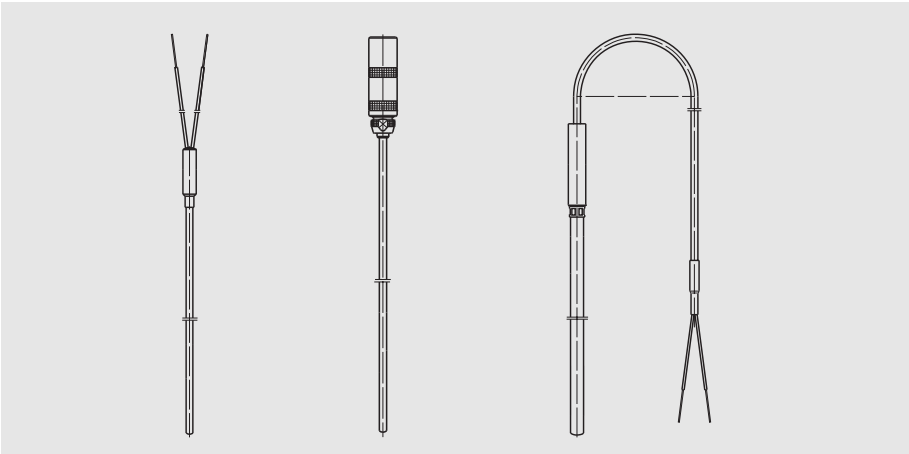


Bild 3-13: Temperaturfühler in Bauart Mantelthermometer zum direkten Kontakt mit dem Medium

Temperaturfühler mit auswechselbarem Messeinsatz

Sie beinhalten als Messelement eine Einheit gleichen Aufbaus wie bei Mantel-Temperaturfühlern. Als Anschlusssteil ist in der Regel ein Keramiksockel mit Schraubklemmen vorhanden. Um diese Einheit vor den Prozessbedingungen zu schützen und um einen Austausch ohne Unterbrechung des laufenden Prozesses zu ermöglichen, wird diese Einheit in eine Schutzarmatur eingebaut. Diese besteht aus einem Schutzrohr mit Prozessanschluss (z. B. Flansch, Gewinde) und einem Anschlusskopf, der den notwendigen Anschluss externer Kabel ermöglicht. Diese Komponenten sind in Normen standardisiert:

DIN 43729 für Anschlussköpfe,
DIN 43772 für Schutzrohre.

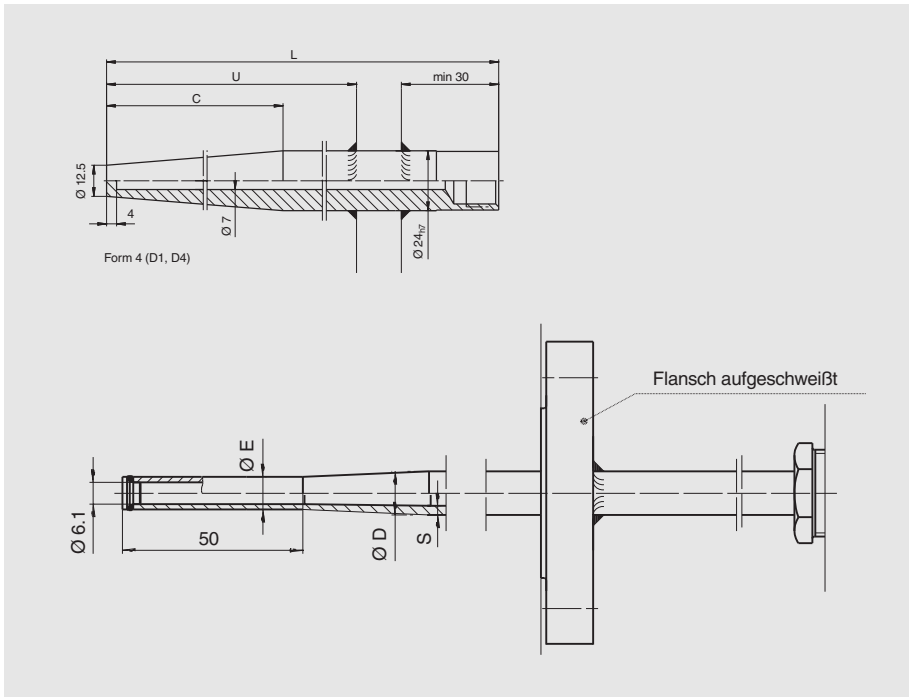


Bild 3-14: Beispiele genormter Schutzrohre: Form 4 für Heißdampfleitungen
NAMUR-Schutzrohre für kurze Ansprechzeiten

In den Normen werden auch komplette Ausführungsformen definiert:

DIN 43770, DIN 43771 für Temperaturfühler mit auswechselbarem Messeinsatz
DIN 43733 für Gerade Thermoelemente

Darüber hinaus sind von Anbietern und Anwendern weitere abgewandelte Ausführungen entwickelt worden, um für die unterschiedlichen Betriebs- und Einbaubedingungen angepasste Bauteile zur Verfügung zu haben.

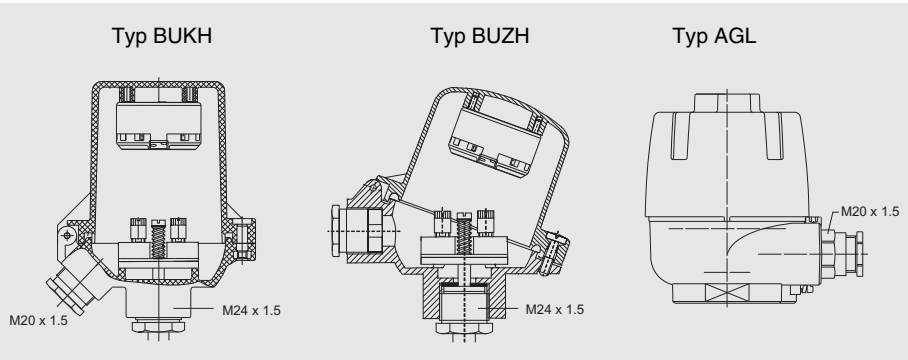


Bild 3-15: Beispiele weiterentwickelter Anschlussköpfe;
Form BUZH, BUKH zum Messumformereinbau in den Deckel
Form AGL druckfeste Kapselung / Explosionproof

Vielfach ist kein direkter Kontakt des Messfühlers mit dem Medium möglich. Um die Lebensdauer des Messeinsatzes gegen Oxidations- und Korrosionseinflüsse zu verlängern, bzw. um eine schnelle Austauschbarkeit ohne Störung des Prozesses zu ermöglichen, werden Schutzrohre eingesetzt.

Bei hohen Belastungen verwendet man vorzugsweise Schutzrohre, die aus Vollmaterial gebohrt und in ihren Außenkonturen bearbeitet sind. Dies hat den Vorteil, dass man Maße, Form und Wanddicken optimal den betriebstechnischen Beanspruchungen (Druck, Strömung, usw.) und messtechnischen Anforderungen anpassen kann. So hergestellte Schutzrohre sind in der Regel teurer als aus Rohrmaterial gefertigte Schutzrohre. Aus diesem Grund werden gebohrte Schutzrohre nur für den medienberührten Bereich des Temperaturfühlers eingesetzt. Außerhalb des Medienbereichs werden sie, falls erforderlich, mit Halsrohren verlängert.

Für Prozesse mit geringerer Belastung werden kostengünstigere Schutzrohre verwendet, die aus Rohrmaterial mit eingeschweißtem Bodenstopfen hergestellt sind.

Medium	Minimale Einbaulänge	
Gasförmig	15...20 mal	Durchmesser Schutzrohr an der Spitze
Flüssig	5 - 10 mal	Durchmesser Schutzrohr an der Spitze
Fest	3...5 mal	Durchmesser Schutzrohr an der Spitze

Tab. 3-16: Empfohlene Einbaulängen (Richtwerte in stehenden Medien)

Die Einbaulänge schließt die im Rohrstutzen geführte Länge ein. Daraus ergeben sich für die gängigsten Schutzrohre folgende Empfehlungen für Mindesteinbaulängen:

	Schutzrohrdurchmesser				
	9 mm	11/12 mm	14/15 mm	22 mm	25 mm
Medium	Mindesteinbaulänge				
Gasförmig	180 mm	250 mm	300 mm	450 mm	500 mm
Flüssig	80 mm	110 mm	160 mm	250 mm	300 mm

Tab. 3-17: Empfohlene Einbaulängen für Standard-Schutzrohrdurchmesser

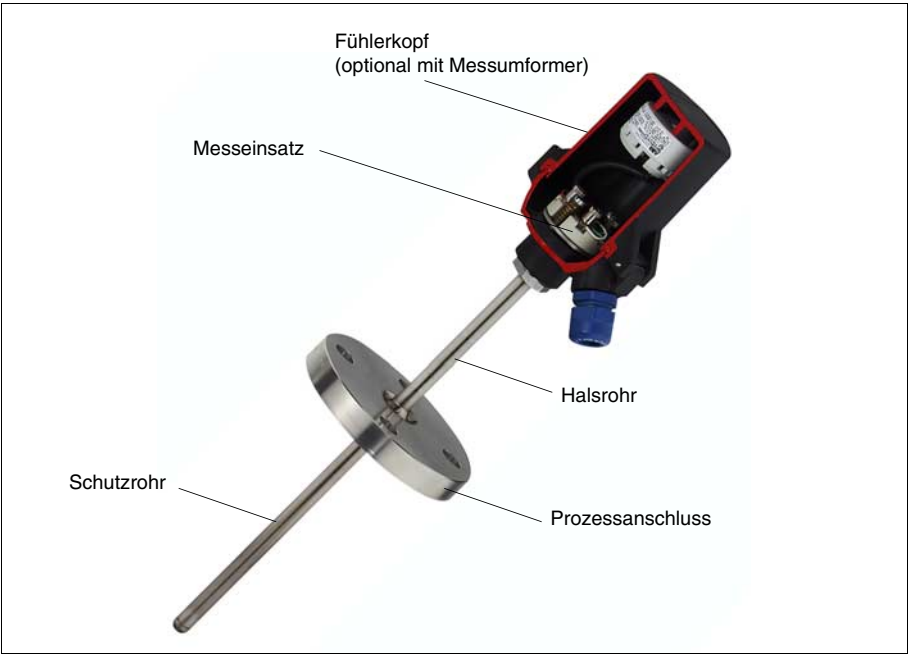


Bild 3-16: Komplett montierter Temperaturfühler mit Schutz- und Halsrohr

Temperaturfühler für hohe Temperaturen (Gerade Thermoelemente)

Sie sind ebenfalls mit austauschbarem Messeinsatz konstruiert. Da die Anwendung jedoch vorwiegend in Verbrennungsprozessen erfolgt (Temperaturen bis 1800 °C) besitzen diese Fühler einige bauliche Besonderheiten.

Messeinsatz: Thermopaardrähte mit großem Leiterquerschnitt im Keramik-Isolierstab.

Schutzrohr: Aus hitzebeständigem Metall- bzw. Keramikschutzrohr.

Prozessanschluss: Da vorwiegend in drucklosen Prozessen eingesetzt, sind einfache Befestigungen (Ovalflansch, Gewindemuffe) mit Stopfbuchsenabdichtung möglich.

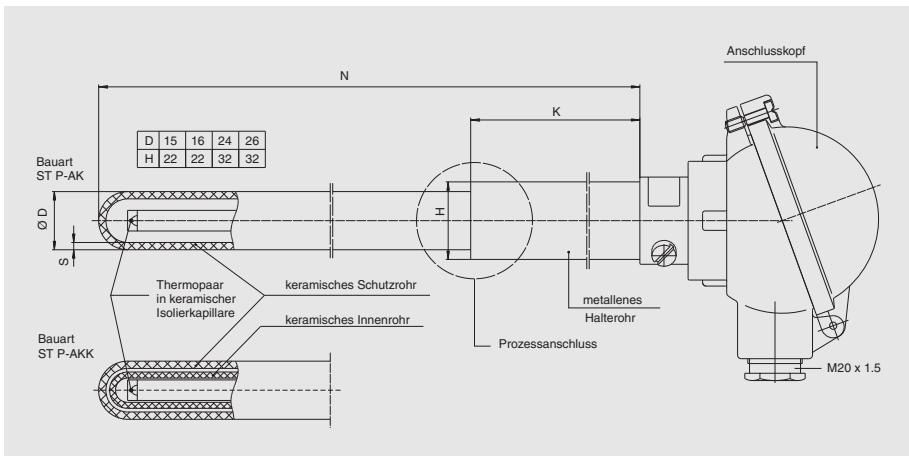


Bild 3-17: Beispiel für einen Temperaturfühler in Bauart „Gerades Thermoelement“

3.2.2 Einbaubedingungen

In der Industrie gibt es vielfältige Anwendungen der Temperatur-Messtechnik. Daher lassen sich nicht immer standardisierte Temperaturfühler verwenden. Vielfach sind Sonderausführungen erforderlich, um die Messung zu optimieren, z. B. Messfühler mit extrem kurzer Sensorlänge oder -Schutzrohre mit geringer Masse.

Wärmeübergang

Temperaturfühler müssen immer in gutem Wärmekontakt mit dem Medium stehen, damit ein schneller Temperatúrausgleich möglich ist und der thermische Messfehler durch geeignete Maßnahmen minimiert werden kann.

Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit nimmt der Wärmeübergang zu, so dass Einbaulängen reduziert werden können. Dies zeigt sich besonders bei den in der Norm DIN 43772 festgelegten D-Hülsen zum Einsatz in Heißdampfleitungen. Sie werden nur bis zum Konus eingebaut und haben dadurch eine wesentlich geringere Einbaulänge als nach vorgenannter Faustregel (siehe Tab. 3-17 empfohlene Einbaulängen):

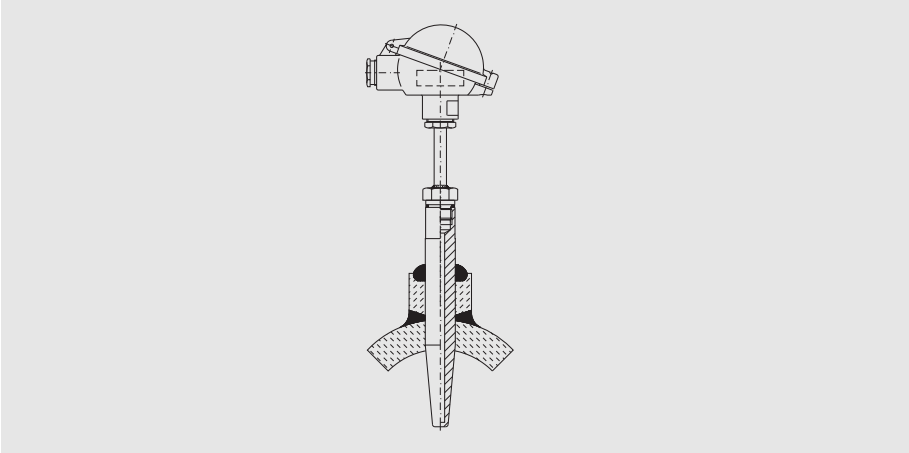


Bild 3-18: Temperaturfühler in Heißdampfleitung bei starker Strömung

Einbaupositionen

Steht die rechnerisch benötigte Einbaulänge nicht zur Verfügung, können durch konstruktive Maßnahmen am Fühler oder an der Einbaustelle günstigere Verhältnisse geschaffen werden:

- eine verjüngte Schutzrohrspitze verkürzt die erforderliche Einbaulänge um ca. 30 %.
- in Rohrleitungen mit geringem Durchmesser (DN 10...DN 20) kann das Schutzrohr zu einem Teil des Stutzens gemacht werden.

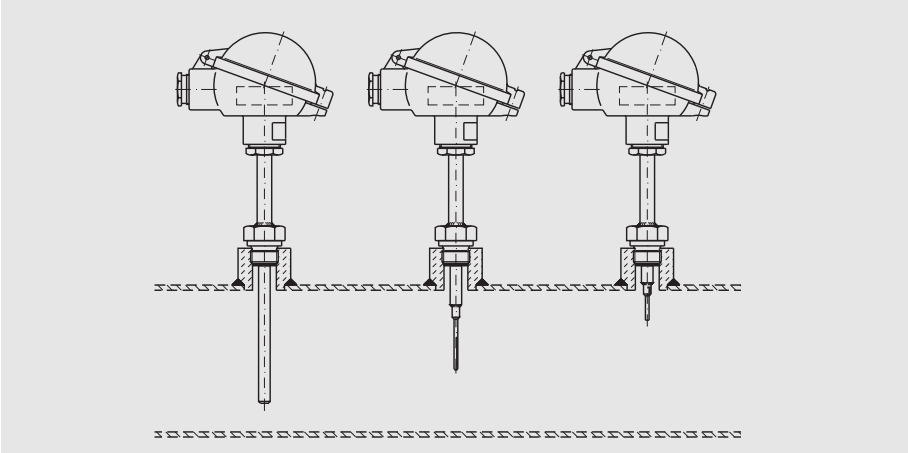


Bild 3-19: Kürzere Einbaulängen durch reduzierte Schutzrohrspitze oder freiliegenden Messeinsatz

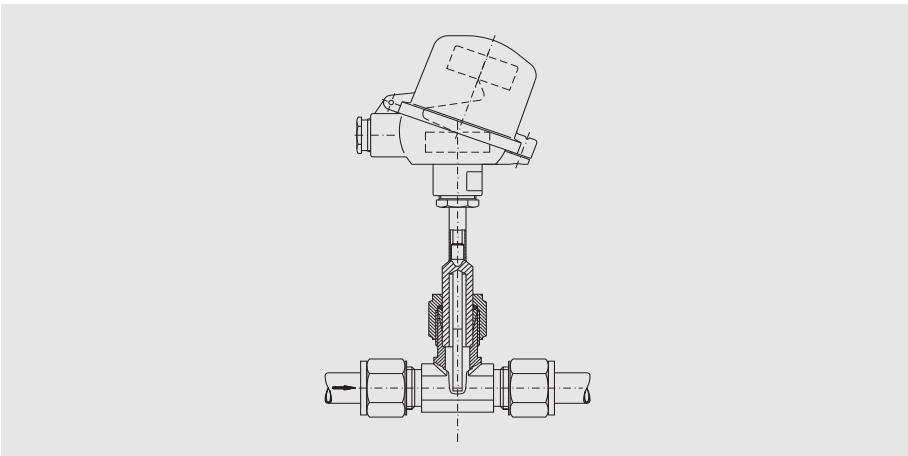


Bild 3-20: Temperatureinbau in Rohrleitungen mit geringem Durchmesser

Am Einbauort kann durch Wahl der Stutzenposition die für den Fühler notwendige Einbaulänge geschaffen werden:

- Durch Verlängerung des Rohrstutzens für den Fühler (siehe Bild 3-20),
- durch Erweiterung der Rohrleitung,
- durch schrägen Einbau,
- durch Einbau in Rohrkrümmer (diese Einbauart ist vorzuziehen, da sie die geringste Versperrung des Querschnittes und geringste Schutzrohrbelastung ergibt) siehe Bild 3-21.

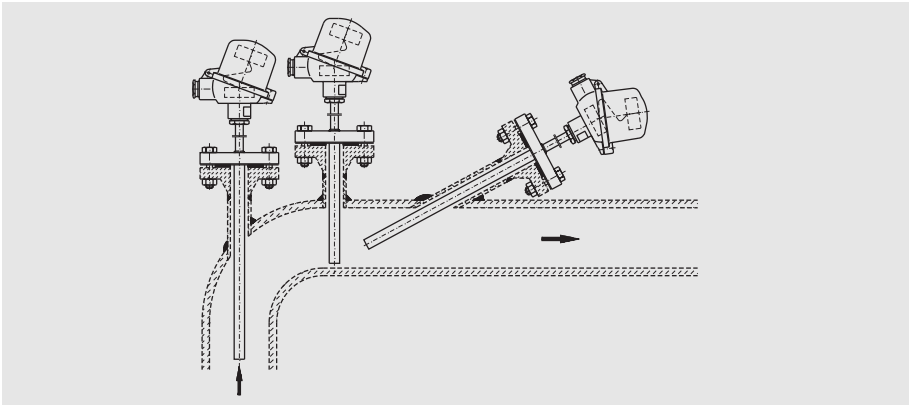


Bild 3-21: Einbaupositionen in Rohrleitungen

Einbau ohne Schutzrohr

Gibt man einem direkt eingebauten Temperaturfühler gegenüber der Version mit Schutzrohr den Vorzug, kann eine schnellere Ansprechzeit und wegen des geringeren Durchmessers (möglich: 1,5; 2; 3; 6 mm) eine sehr kurze Einbaulänge realisiert werden.

Bei Thermoelementen hat man im Vergleich zu Widerstandsthermometern eine punktförmige Messstelle, so dass extrem kurze Einbaulängen möglich sind (s. Tab. 3-18).

	Durchmesser		
	1,5 mm	3 mm	6 mm
Medium	Mindesteinbaulänge		
Gasförmig	30 mm	60 mm	100 mm
Flüssig	8 mm	30 mm	60 mm
Fest	5 mm	20 mm	30 mm

Tab. 3-18: Empfohlene Einbaulängen für direkt eintauchende (ohne Schutzrohr) Temperaturfühler

Bei Widerstandsthermometern ist die temperaturempfindliche Länge des verwendeten Messwiderstandes (typbedingt ca. 7...30 mm lang), zu den Tabellenwerten zu addieren.

3.2.3 Prozessanschlussarten

Der Einbau in Rohrleitungen und Behälter erfolgt vorwiegend über Gewinde-, Flansch- oder Schweißanschluss.

Die gewählte Einbauart ist bestimmend für die Druckbelastbarkeit, da der anstehende Prozessdruck gegen die Querschnittsfläche des Anschlussteiles drückt.

Einschraubanschluss

Bei zylindrischen Gewinden erfolgt die Abdichtung durch die am Dichtbund eingelegte Dichtung. Je nach dort anstehender Temperatur und der Aggressivität des Mediums können Dichtungen aus Fluor-Kunststoffen, Kupfer oder Edelstahl ausgewählt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Elastizitätsgrade und da der Prozessdruck ein Abheben von der Dichtfläche verursachen kann, sind die dichtbaren Drücke relativ gering (max. 100 bar).

Bei konischen Gewinden erfolgt die Abdichtung im Gewinde durch formschlüssige Verbindung ohne weitere Dichtung bzw. durch Zwischenlage von PTFE-Band. Dadurch wird die Dichtfläche durch die gesamte Gewindelänge gebildet und der dichtbare Druck ist größer. Je nach Herstellungsverfahren des Gewindes für Einschraubstutzen, -zapfen und Materialfestigkeit können Dichtdrücke von 300...400 bar erreicht werden.

Flanschanschluss

Beim Flanschanschluss bestimmt der Flansch-Nenndruck den maximalen Druck. Es gibt Druckstufen bis zu 160 bar, die bei geringem Druck mit Flachdichtungen, bei größeren Druckstufen durch Rundschnurringe im Nut-Federsystem gedichtet werden.

Es gilt:

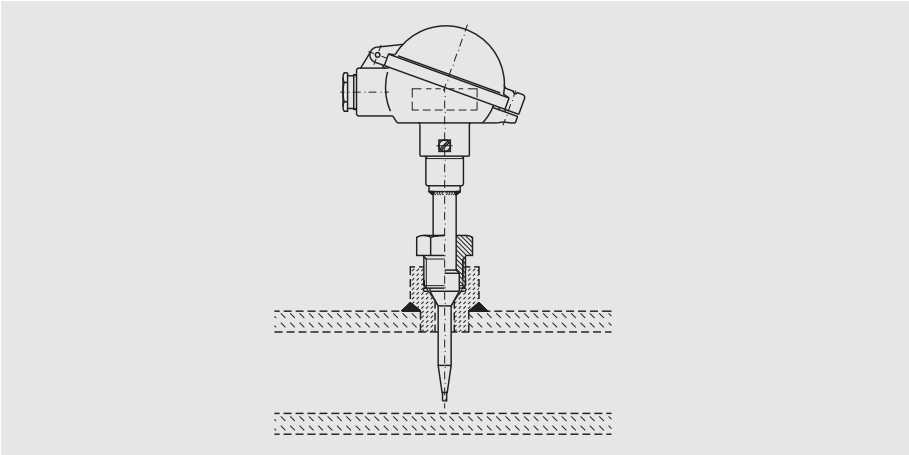
je kleiner die projizierte Fläche der Dichtung, desto höher der Dichtdruck, da durch das Zusammenschrauben beider Teile eine höhere spezifische Flächenpressung erreicht wird.

Einschweißanschluss

Im Bereich bis 700 bar werden häufig Einschweiß-Schutzrohre verwendet. Dabei ist, insbesondere bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten, darauf zu achten, dass die Verbindung Stutzen/Schutzrohr als Passung ausgeführt ist, um Schäden wie Schutzrohrabriss durch Resonanzschwingung vorzubeugen.

Konus-und Linsenanschluss

Für Hochdruckanwendungen (bis max. 4000 bar) in der Gassynthese, bei denen der Fühler schnellansprechend und austauschbar sein muss, verwendet man konusförmige Dichtsysteme, bei denen das Gegenstück einen um ca. 1° größeren Formwinkel hat, so dass sich nur eine linienförmige Dichtfläche ergibt. Dadurch können



extrem hohe Dichtkratte erzielt werden.

Bild 3-22: Hochdruck-Temperaturfühler mit Kegelabdichtung

Druckprüfung

Häufig werden zur Bestätigung der Dichtheit Druckprüfungen verlangt, die in entsprechenden Prüfzertifikaten durch den Hersteller bestätigt werden (siehe Kapitel 6). Typische Prüfbedingungen sind Druckprüfung mit 1,5-fachem Nenn-/Auslegungsdruck bei einer Haltezeit von 3 min.

3.2.4 Prozessbeanspruchung

Bei der Auswahl der für den Bedarfsfall optimalen Fühler sind zuerst die gewünschten Eigenschaften zu definieren:

- Kurze Ansprechzeit
- Messgenauigkeit
- geringer Platzbedarf

Daraus resultiert die Bauart eines möglichst kleinen Fühlers.

Dem gegenüber stehen jedoch die Prozessbedingungen:

- Temperatur
- Strömung
- Druck
- Vibration
- Abrasion
- Aggressives Medium

Diese machen eine massivere Bauart und damit größere Einbaulängen erforderlich, da:

- Die Temperatur eine Reduzierung der Festigkeit hervorruft,
- die Strömung eine Biegebeanspruchung und Eigenschwingung hervorruft,
- der Druck eine radiale Beanspruchung auf die Mantelfläche ausübt,
- die Vibration eine Werkstoffbelastung ausübt, besonders an der Einspannstelle,
- Abrasion einen Werkstoffabtrag bewirkt,
- ein aggressives Medium einen Abtrag der Wanddicke oder Korrosion bewirkt.

Neben einer Vielzahl von Sonderausführungen gibt es auch Schutzrohre, die in Normen vollständig beschrieben werden (z. B. DIN 43772). Das Schutzrohr soll den Messeinsatz vor chemischen und mechanischen Beschädigungen schützen. Die Auswahl des Schutzrohres hängt dabei einerseits von prozessbedingten Parametern, andererseits von messtechnischen Parametern ab.

In der Norm DIN 43772 finden sich Belastungsdiagramme verschiedener Schutzrohr-Bauformen.

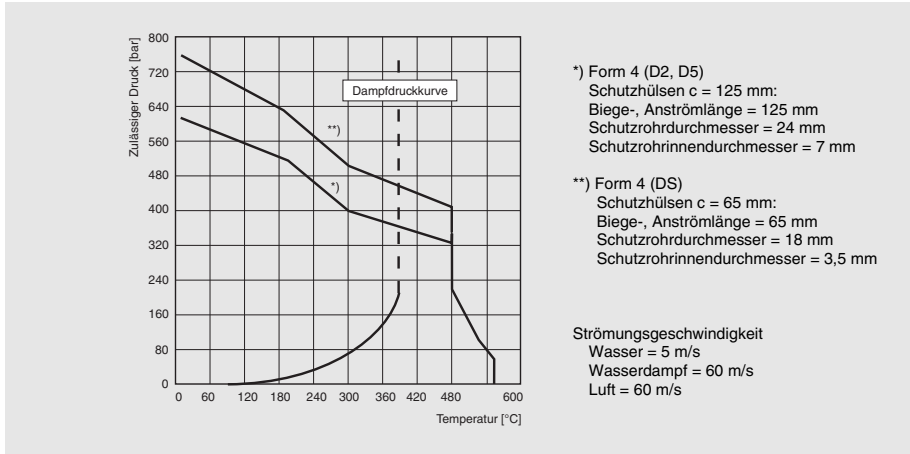


Bild 3-23: Beispiel eines Belastungsdiagramms, Werkstoff 1.4571 (316 Ti)

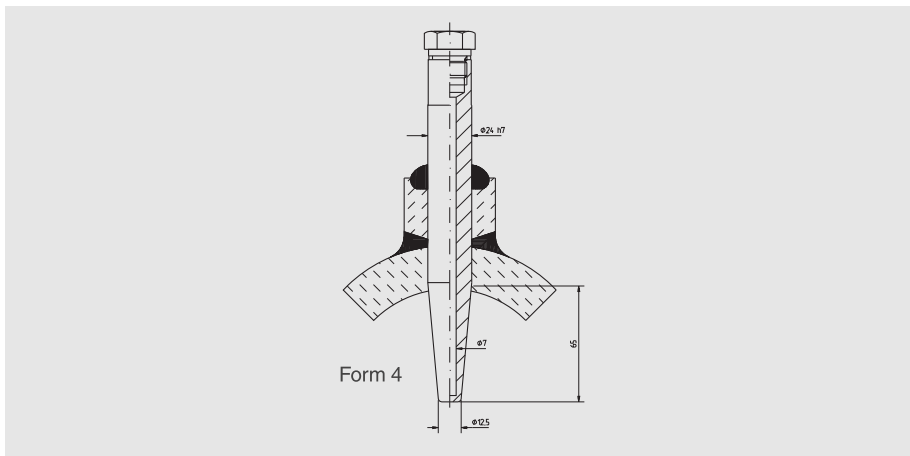


Bild 3-24: Druck-/werkstoffabhängige Auswahl von Schutzrohren
 (Form 4 mit 65 mm Konuslänge/Einbaulänge)

3.2.5 Auslegung von Schutzrohren

Schutzrohre müssen die folgenden Funktionen erfüllen:

- Positionierung der temperatursensitiven Fühlerspitze im Prozess
- Schutz des Temperaturfühlers
- Abschluss des Prozessraumes zur Umwelt.

Das Versagen dieser Komponenten kann Betriebsunterbrechungen, Freisetzung brennbarer, explosiver oder giftiger Stoffe, Sach- und Personenschäden zur Folge haben. Deshalb ist eine sorgfältige Risiko- und Belastungsanalyse erforderlich.

Schutzrohre unterliegen je nach Anwendungsbereich bestimmten gesetzlichen Anforderungen. Als drucktragende Teile müssen z. B. Werkstoff, Konstruktion, Berechnung, Fertigung und Prüfung den Anforderungen der Druckbehälter- oder Dampfkesselverordnung entsprechen. International weit verbreitet sind auch die entsprechenden Regeln und Vorschriften des ASME-Codes. In explosionsgefährdeten Bereichen wird durch Schutzrohre die Trennung von Zonen unterschiedlicher Gefährdungshäufigkeiten sichergestellt (siehe auch Kapitel 7).

Es stehen Schutzrohre in bewährten und genormten Bauformen mit unterschiedlichen Prozessanschlüssen zur Verfügung.

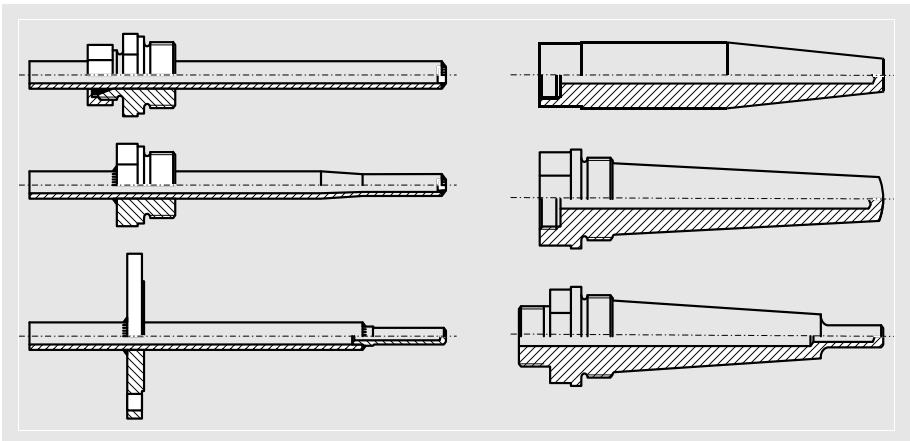


Bild 3-25: Bauformen von Schutzrohren (schematisch)

Für genormte Schutzrohre sind Belastungsdiagramme in den entsprechenden Normen veröffentlicht, die den maximal zulässigen Druck in Luft/Dampf bzw. Wasser bei einer bestimmten Temperatur und einer bestimmten maximalen Strömungsgeschwindigkeit angeben. Häufig jedoch weichen Schutzrohre in Abmessungen und/oder Betriebsbedingungen von den Standardwerten ab.

Werkstoffe von Schutzrohren

Neben der Bauform und den Abmessungen kommt der Werkstoffauswahl eine entscheidende Bedeutung zu. Der Werkstoff muss den Prozessbedingungen angepasst sein und eine ausreichende Standfestigkeit aufweisen. (siehe hierzu Kapitel 3.2.4 und Kapitel 3.2.6).

Im Falle drucktragender Teile ist häufig der Nachweis bestimmter Warmfestigkeitseigenschaften oder auch der Kerbschlagzähigkeit über Materialprüfzeugnisse erforderlich. Die Grenzbelastungen der Werkstoffe ergeben sich in den niedrigeren Temperaturbereichen z. B. durch die 1 %-Dehngrenze und in höheren Temperaturbereichen bei Werkstoffen mit Kriechneigung durch die Zeitstandfestigkeit für 100.000 Stunden. Diese Werte sind in Abhängigkeit von der jeweiligen Betriebstemperatur den Werkstoffnormen oder den Datenblättern der Werkstoffhersteller zu entnehmen. Der Sicherheitsbeiwert (z. B. 1,5 für duktile Stähle) und eventuell ein Belastungsabschlag für Schweißverbindungen kann in Abhängigkeit von der Werkstoffgruppe den einschlägigen Regelwerken entnommen werden.

Schutzrohre aus spröden Werkstoffen (z. B. Glas, Keramik) bedürfen einer besonderen Betrachtungsweise, da schon ein einzelner Schlag zur plötzlichen und vollständigen Zerstörung führen kann. In der Regel sind weitaus höhere Sicherheitsbeiwerte und Schutzmaßnahmen gegen Schlagbeanspruchung erforderlich. In kritischen Fällen ist eine zweite Barriere notwendig, die das Entweichen gefährlicher Stoffe beim Bruch des Schutzrohrs verhindert (Verschraubungen, druckfeste elektrische Durchführungen usw).

Berechnung von Schutzrohren

Das Medium wirkt durch Druck, Strömung und Wirbelbildung mechanisch auf das Schutzrohr ein. Deshalb umfasst eine Schutzrohrberechnung:

- Die Belastung durch den statischen Außendruck,
- die Biegebelastung durch die Strömung des Mediums,
- die Belastung durch fremderregte Biegeschwingungen.

Die Einbausituation für Schutzrohre ist beispielhaft im Bild 3-26 dargestellt.

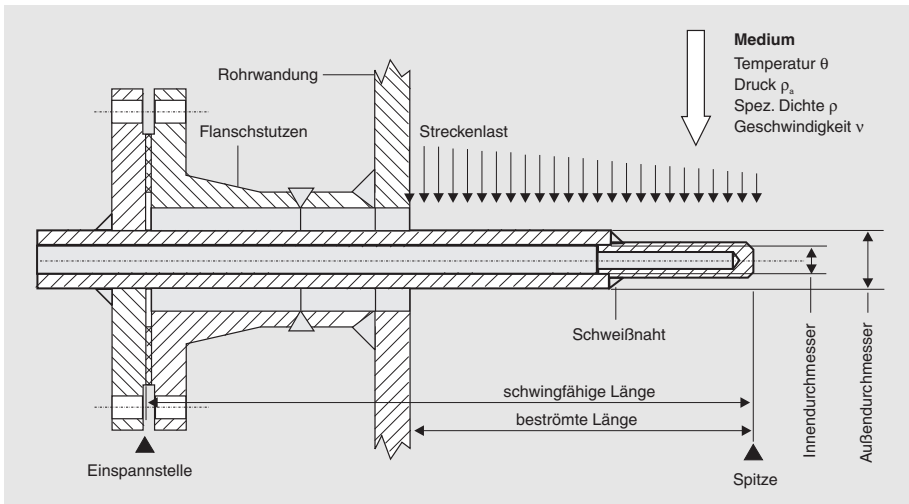


Bild 3-26: Einbaubeispiel Schutzrohr

Die Druckbelastbarkeit lässt sich am einfachsten durch größere Mindestwandstärken erhöhen. Bei hohen Temperaturen fallen jedoch die Festigkeitskennwerte einiger Werkstoffe soweit ab, dass akzeptable Wandstärken nur mit Hilfe hochwarmfester Stähle und Nickellegierungen zu erreichen sind.

Die statische Berechnung der Schutzrohrbelastung ergibt den Spannungszustand. Durch den Außendruck überlagern sich Biegespannungen, bedingt durch die Strömung des Mediums. In Abhängigkeit vom Außendurchmesser des Schutzrohrs, von Widerstandsbeiwert und Geschwindigkeit der Strömung, sowie der Dichte des Mediums wird eine Streckenlast auf das Schutzrohr aufgebracht. Dies führt zu einer Biegespannung, die an der Einspannstelle ihr Maximum erreicht. Die wirkungsvollste Maßnahme gegen zu hohe Biegespannungen ist die Verkürzung der Schutzrohrlänge. Des Weiteren sind auch eine Vergrößerung des Außendurchmessers an der Einspannstelle oder die Wahl von Werkstoffen höherer Festigkeit mögliche Alternativen.

Bei waagrechtem Einbau im Bereich hoher Temperaturen kann schon die Biegebelastung durch das Eigengewicht aufgrund von Kriechvorgängen zu beträchtlichen Deformationen führen.

Schwingungsanalyse

Die dynamische Schwingbelastung von Schutzrohren erfordert eine ausführlichere Betrachtung. Die Schwingungen verursachen Wechsellastspannungen im Schutzrohr, die sich den zuvor beschriebenen statischen Spannungszuständen überlagern.

Neben den Eigenfrequenzen des Schutzrohres im eingebauten Zustand sind die Erregerfrequenzen äußerer periodischer Kräfte von Bedeutung. Eine dieser Erregerfrequenzen wird durch Wirbelablösung des strömenden Mediums hinter dem Schutzrohr verursacht. Unter bestimmten Strömungsbedingungen bildet sich die „Kármán'sche Wirbelstraße“, bei der sich in regelmäßigen Zeitabständen beidseitig abwechselnd Einzelwirbel ablösen. Die Frequenz dieser Wirbelablösung ist abhängig von den Prozessparametern und den Schutzrohrabmessungen.

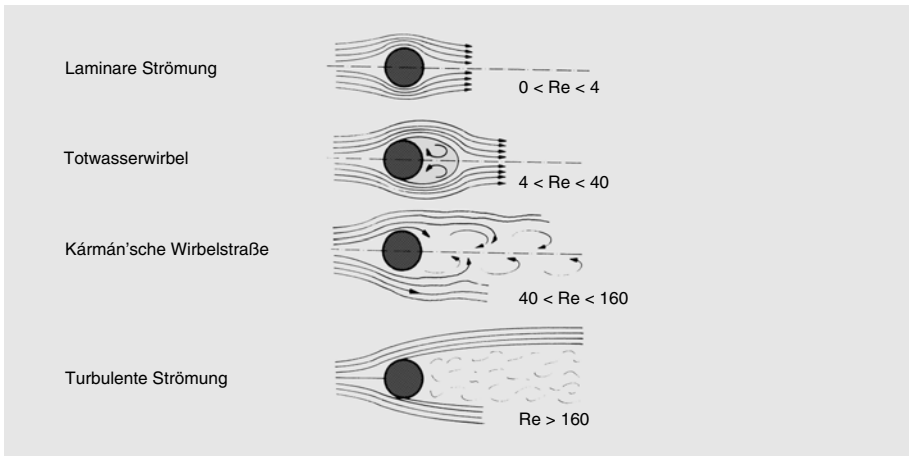


Bild 3-27: Strömungsverhältnisse um Schutzrohre

Diese periodische Erregerkraft versetzt das Schutzrohr in Schwingung. Die Stärke der Schwingungsamplitude steigt in der Nähe des Resonanzpunktes sehr stark an, d. h. wenn die Erregerfrequenz gleich einer Eigenfrequenz des Schutzrohres ist.

Da die Dämpfung im ungünstigsten Fall als klein angenommen werden muss, geht der Verstärkungsfaktor der Schwingung im Resonanzfall gegen unendlich. Dies führt sehr schnell zur Ermüdung und Bruch des Schutzrohres an der Einspannstelle oder an Stellen scharfer Kanten und Wandstärkensprüngen (Kerbwirkung).

Periodische Erregerkräfte können auch von Pumpen, Verdichtern und anderen rotierenden oder oszillierenden Massen stammen, von wo sie über die Rohrleitung auf das Schutzrohr übertragen werden. Unkritischer sind aperiodische Kräfte (z. B. einzelne Druckstöße), die zu keinem übermäßigem und längerem Aufschwingen des Schutzrohres führen.

Eine sehr konservative Auslegungsregel fordert daher konsequenterweise, dass die Erregerfrequenz niemals einen Wert von 80 % der Eigenfrequenz des Schutzrohres überschreiten darf. Dies gilt insbesondere für Schutzrohre in Anwendungsfällen mit hohem Risikopotenzial.

Bei Schwingungsproblemen ist eine Verkürzung der schwingungsfähigen Länge (ist gleich die Veränderung der Eigenfrequenz) das wirkungsvollste Mittel zur Vermeidung von Schwingungsbrüchen. Dies kann neben der Verringerung der Gesamtlänge auch durch Passungen und Abstützungen an geeigneten Positionen geschehen. So ist z. B. bei Einschweißhülsen die schwingfähige Länge auf das aus dem Stutzen/Schutzrohr herausragende Teil reduziert.

In den Fällen, in denen keine Möglichkeiten zur Erfüllung der strengen 80 %-Auslegungsregel gegeben sind (z. B. Temperaturfühler für Dieselmotoren, Turbinen, Verdichter usw), sind umfangreiche Typprüfungen erforderlich. Diese beinhalten z. B. Schwingprüfungen im Resonanzpunkt unter Betriebstemperatur, wobei an den Schutzrohrspitzen Beschleunigungsamplituden von über 150 g (150-fache Erdbeschleunigung) erreicht werden können.

Nach dem Erreichen von 10 Millionen Lastwechseln kann eine Dauerbeständigkeit angenommen werden. Trotzdem sollten Resonanzfrequenzen beim An- und Abfahren von Anlagen nach Möglichkeit schnell durchfahren werden.

Optimierungsmaßnahmen

Leider wirken sich viele Maßnahmen zur Verbesserung der mechanischen Stabilität negativ auf andere messtechnische Eigenschaften aus.

Hochbelastbare, d. h. relativ dickwandige Schutzrohre verursachen aufgrund ihrer Wärmekapazität eine deutlich verlängerte Ansprechzeit. Diese kann durch engere Passungen zwischen Messeinsatz und Schutzrohrbohrung, verjüngte Schutzrohrspitzen, sowie kleinere Messeinsatzdurchmesser im Rahmen des technisch Machbaren verringert werden.

Schutzrohre mit schwingungstechnisch günstigen kurzen Einbaulängen zeigen einen relativ starken Wärmeabfluss. Mögliche Abhilfemaßnahmen sind hier die Reduzierung der temperaturempfindlichen Länge des Messeinsatzes bis hin zu bodenempfindlichen Temperaturfühlern und die Verjüngung der Schutzrohrspitze.

Problem	Abhilfemaßnahmen Schutzrohr-Geometrie	Abhilfemaßnahmen Betriebsparameter
Erregerfrequenz zu dicht am Resonanzpunkt	<ul style="list-style-type: none"> – schwingfähige Länge reduzieren – Außendurchmesser vergrößern 	<ul style="list-style-type: none"> – Strömungsgeschwindigkeit reduzieren (Dichte des Mediums hat keinen Einfluss)
Druckbelastung an der Spitze zu hoch	<ul style="list-style-type: none"> – Außendurchmesser der Spitze vergrößern – Schutzrohr-Werkstoff mit höherer Festigkeit wählen 	<ul style="list-style-type: none"> – Betriebsdruck reduzieren
Biegebelastung an der Einspannstelle zu hoch	<ul style="list-style-type: none"> – Außendurchmesser der Einspannstelle vergrößern – Länge reduzieren – Schutzrohr-Werkstoff mit höherer Festigkeit wählen 	<ul style="list-style-type: none"> – Strömungsgeschwindigkeit reduzieren – Dichte des Mediums reduzieren – Betriebsdruck reduzieren

Tab. 3-19: Zusammenfassung der wesentlichen Optimierungsmöglichkeiten von Schutzrohren

Wichtig bei dynamisch hochbelasteten Schutzrohren ist die Vermeidung von Spannungsspitzen an Durchmessersprüngen, Gewinden, Schweißnähten usw. Die sogenannte Kerbwirkung kann durch sorgfältige Abrundung aller Übergänge, Wahl unempfindlicherer Gewindearten, Verlegung von Schweißnähten in weniger anfällige Bereiche usw., vermindert werden.

Durch geeignete Formgebung der Schutzrohre sind strömungstechnische Optimierungen möglich, z. B. behindern konische Schutzrohre mit sich stetig ändernden Außendurchmessern die Ausbildung einer periodischen Wirbelstraße und reduzieren damit die Erregerkraft.

Verschiedene Betriebszustände können zusammenfassend betrachtet werden, solange den Berechnungen die ungünstigsten Verhältnisse zugrunde gelegt werden (z. B. maximale Strömungsgeschwindigkeit bei maximaler Mediumsdichte und maximalem Druck). Insbesondere ist dabei zu beachten, dass die Dichte des Mediums durch Phasenübergänge oder auch bei Abkühlung zunehmen kann und damit das Schutzrohr noch stärker belastet.

Praktische Durchführung von Schutzrohrberechnungen

Für die Durchführung von Schutzrohrberechnungen stehen spezielle Programme zur Verfügung. Grundlage der Berechnungen sind die sorgfältig zu spezifizierenden Betriebs- und Auslegungsparameter (siehe Tab. 3-20). Die Ermittlung der richtigen Eingabeparameter, sowie die Interpretation der Berechnungsergebnisse und der daraus abzuleitenden Optimierungsmaßnahmen erfordern jedoch besonders in Grenzsituationen fundiertes Hintergrundwissen und Erfahrung. Design- und Fertigungsqualität sind letztlich entscheidend für die Betriebssicherheit von Schutzrohren.

Kategorie	Erforderliche Informationen	Nützliche Informationen
Allgemein	Anlage Bauform	Besondere Gefahrenpotenziale Geometrische Einbauverhältnisse
Medium	Zusammensetzung Temperatur Druck Strömungsgeschwindigkeit	Dichte im Betriebszustand Prüfdruck Normvolumen, Massenstrom, Rohrinnenweite
Werkstoff	Temperaturgrenze Korrosionsbeständigkeit Schweißbarkeit	Verfügbare Werkstoffkennwerte Probleme mit Korrosion, Abrasion Werkstoff der Anschlussteile
Geometrie	Durchmesser Nennlänge Anschlussmaße	Maximal möglicher Durchmesser Ansprechzeit Wärmeableitfehler

Tab. 3-20: Informationen zur Schutzrohrberechnung

Anschlüsse von Schutzrohren

Für die Auslegung der Prozessanschlüsse gibt es festgelegte Berechnungsmethoden (z. B. für Schweißnahtdicken und Flanschverbindungen) oder entsprechende Erfahrungswerte (z. B. Einschraubzapfen mit Dichtungsringen, selbstdichtende konische Gewinde).

Für Prozessanschlüsse mit Dichtungen ist der sogenannte dichtbare Druck maßgebend. Dieser hängt neben Typ, Werkstoff und Abmessungen der Dichtung, sowie der Betriebstemperatur, im Wesentlichen vom sorgfältigen Einbau ab. Bei Gewinden ist eine gute Schmierung zur Reduzierung der Gewindereibung und Vermeidung des Gewindefraßes ratsam.

Dadurch wird z. B. auch die Belastung der Gewindezapfen reduziert und höhere Dichtungskräfte bei niedrigeren Anzugsmomenten erreicht. Bei allen Gewinden mit Dichtungen ist ein Nachziehen nach den ersten Lastzyklen zum Ausgleich von Setzvorgängen und zur Aufrechterhaltung der Dichtungskräfte empfehlenswert.

3.2.6 Korrosion

Ursachen für die Ausbildung eines Korrosionselements

Die elektrochemischen Prozesse, die bei der Korrosion ablaufen, werden durch den Werkstoff, die Umgebungseinflüsse und die Zusammensetzung der Elektrolyten bestimmt. Für die Entstehung eines Korrosionselementes, d. h. die Ausbildung einer Potenzialdifferenz, müssen bestimmte Voraussetzungen gegeben sein:

- Werkstoffbereich aus elektrisch leitfähigen Stoffen mit unterschiedlichem Spannungspotential,
- elektrische Verbindung dieser Bereiche zum Austausch von Ladungsträgern (Elektronen),
- Benetzung mit einem Elektrolyten.

Auch bei Bauteilen, die scheinbar nur aus „einem“ Werkstoff bestehen, können sich infolge von örtlichen Konzentrationsunterschieden an Legierungsbestandteilen oder Verunreinigungen Korrosionselemente ausbilden.

Korrosionsarten

Flächenkorrosion

Die Flächenkorrosion kann gleichmäßig die gesamte Oberfläche betreffen oder ungleichmäßige, muldenförmige Vertiefungen hervorrufen. Ihr kann durch entsprechende Dimensionierung der Schutzrohre begegnet werden. Darüberhinaus kann durch steigende Oberflächengüte der Abtrag der Oberfläche verringert werden. Die ebenmäßige Korrosion ist durch den Einsatz geeigneter Werkstoffe bei definierten Angriffsbedingungen am leichtesten zu beherrschen.

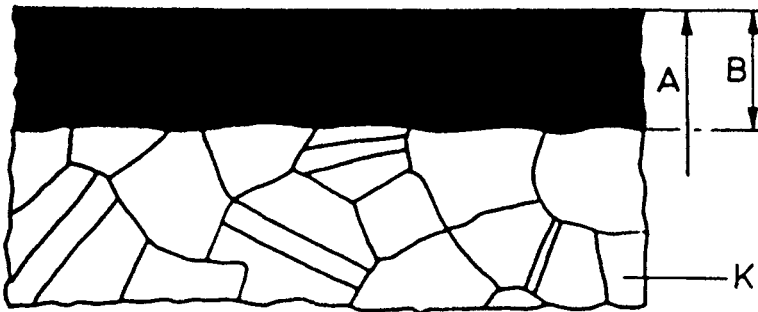


Bild 3-28: Gleichmäßig abtragende Korrosion schematisch (A Ausgangszustand, B Verminderung der Bauteildicke durch gleichmäßig abtragende Korrosion, K Korn (Kristall))

Kontaktkorrosion

Kontaktkorrosion entsteht bei der Berührung zweier unterschiedlicher Metalle in Anwesenheit eines Elektrolyten. Das unedlere der beiden Metalle unterliegt dabei dem verstärkten Korrosionsprozess, die Abtragung erfolgt gleichmäßig. Es handelt sich um eine konstruktionsbedingte Erscheinung, der man z. B. durch die Wahl gleichartiger Werkstoffkombinationen begegnen kann.

Hochtemperaturkorrosion

Die Eignung von Werkstoffen zum Einsatz unter Hochtemperatur ist in erster Linie darin begründet, dass sich an ihrer Oberfläche eine schützende Oxidschicht bildet. Durch die Entstehung dieser Oxidhaut wird der weitere unmittelbare Kontakt des Metalls mit der Atmosphäre verringert und schließlich verhindert. Die Oxidationsbeständigkeit eines Werkstoffs bei erhöhter Temperatur hängt von der Art des sich bildenden Oxids ab. Ist das Oxid lose und porös, setzt sich die Oxidation fort, bis schließlich der gesamte Querschnitt oxidiert ist.

Die Wahl geeigneter Legierungen muss im Hinblick auf die jeweiligen Betriebsbedingungen erfolgen. So hängt die Oxidationsbeständigkeit von Fe-Ni-Cr-Legierungen unter isothermen Bedingungen weitgehend vom Chromgehalt ab, während der Gehalt von Nickel und Eisen nur geringen Einfluss hat.

Unter zyklischen Bedingungen kann sich die Beständigkeitsskala jedoch wesentlich ändern. In diesem Fall wirken sich höhere Nickelgehalte ausgesprochen günstig aus, indem sie die unterschiedliche Wärmeausdehnung und damit das Abblättern des Oxids verringern.

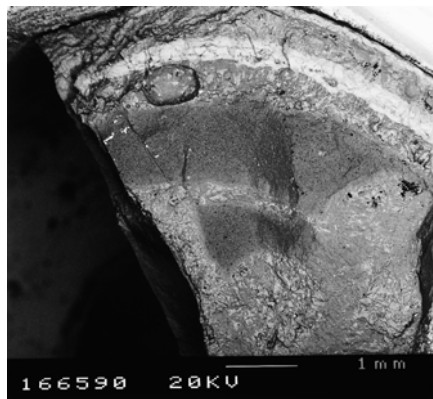
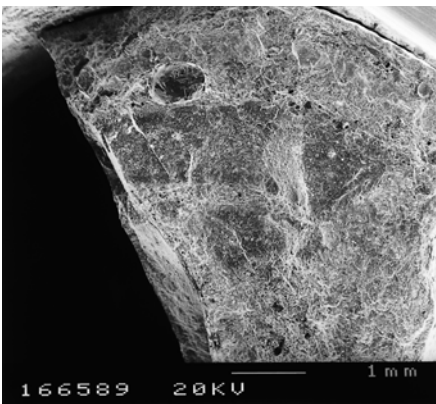


Bild 3-29: Hochtemperaturkorrosion von CrNi-Stahl 1.4841 beim Einsatz in einer Müllverbrennungsanlage bei Temperaturen von ca. 1300 °C nach 5-tägigem Einsatz

Lochfraßkorrosion

Die Lochfraßkorrosion ist eine örtliche, nadelstichtartige, in die Tiefe gehende Korrosionsform, die in relativ kurzer Zeit die gesamte Dicke des Werkstoffs durchdringen kann. Da sie sich regelrecht in das Metall hineinfrißt und nur eine punktuelle Beschädigung der Oberfläche aufweist, ist sie schlecht zu erkennen und deshalb gefährlich. Sie wird besonders durch chloridhaltige wässrige Lösungen gefördert. Durch Zusatz von Molybdän und größeren Chromgehalten erhält man eine bessere Beständigkeit, wie z. B. bei 1.4571 (AISI 316), der 2,5 % Mo enthält. Eine wesentlich bessere Beständigkeit gegenüber 1.4571 (AISI 316) weist allerdings der Werkstoff 1.4539 (Uranus B6) mit 5 % Mo auf.

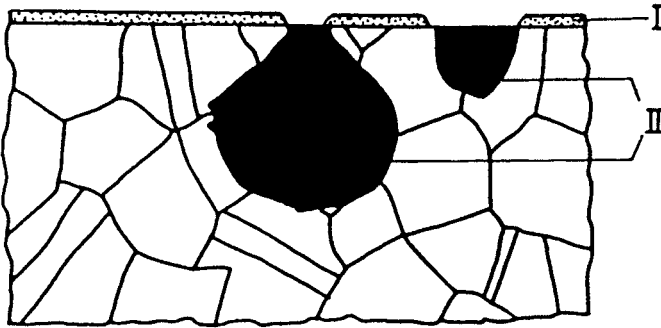


Bild 3-30: Lochkorrosion schematisch (I Passivschicht, die im kleiner werdenden Spalt nicht mehr gebildet wird, II örtlicher Durchbruch der Passivschicht und nachfolgende punktförmige oder lochförmige Korrosion)



Bild 3-31: Lochfraßkorrosion an einem Monel-Schutzrohr nach Einsatz in einer Chemieranlage

Spaltkorrosion

Spaltkorrosion wird durch Ausbildung eines Potenzials im Spalt in Gegenwart von Sauerstoff hervorgerufen, wie es unterhalb der Wasseroberfläche oder in engen Spalten, z. B. bei Schutzrohr/Flanschverbindungen auftreten kann. Als Gegenmaßnahme sollte prozessseitig das Schutzrohr mit dem Flansch verschweißt sein (Vermeidung von Spalten). Die Abtragung erfolgt mulden- oder flächenförmig. Da Spaltkorrosion nicht ohne weiteres ersichtlich ist, gehört sie zu den gefährlichsten Korrosionsarten. Stähle mit höherer Lochfraßbeständigkeit sind auch gegen Spaltkorrosion weniger anfällig.

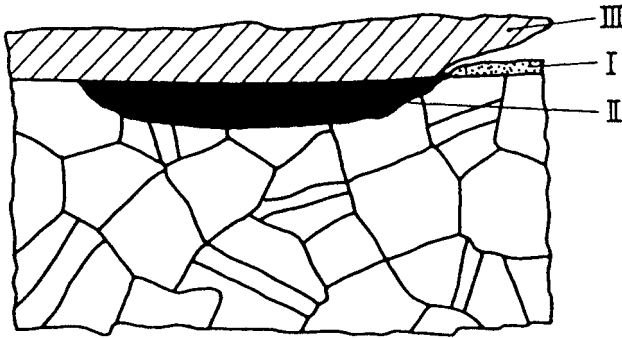


Bild 3-32: Spaltkorrosion schematisch

- I Pasivschicht, die im kleiner werdenden Spalt nicht mehr gebildet wird,
- II aktive Auflösung des Werkstoffes
- III Oberflächenverunreinigung, Ablagerung, etc.

Interkristalline Korrosion

Interkristalline Korrosionsrisse entstehen durch selektive Korrosion. Entweder erfolgt diese durch das unterschiedliche Spannungspotenzial an den Korngrenzen, oder durch einen inhomogenen Gefügeaufbau, wodurch die Korngrenzen aufgelöst werden. Diese Korrosionsart tritt vorwiegend bei nichtrostenden Stählen in sauren Medien auf, wenn sich durch Wärmeeinwirkung (450...850 °C bei austenitischen Stählen, oberhalb 900 °C bei ferritischen Stählen) Chromkarbide in zusammenhängender „kritischer“ Form an den Korngrenzen ausscheiden.

Sie bewirkt örtliche Chromverarmung neben den ausgeschiedenen Chromkarbiden. Zur Vermeidung kommen Stähle mit vermindertem Kohlenstoff-Gehalt, sogenannte „Low-Carbon“-Stähle wie z. B. 1.4404 (316L) oder sogenannte stabilisierte (mit Titan bzw. Niob) Stähle wie z. B. 1.4571 und 1.4550 (AISI 316Ti und 347) zum Einsatz. Dabei bindet Titan bzw. Niob den Kohlenstoff zu stabilen Ti- bzw. Nb-Karbiden, so dass auch bei kritischer Wärmeeinwirkung keine Chromkarbide ausgeschieden werden.

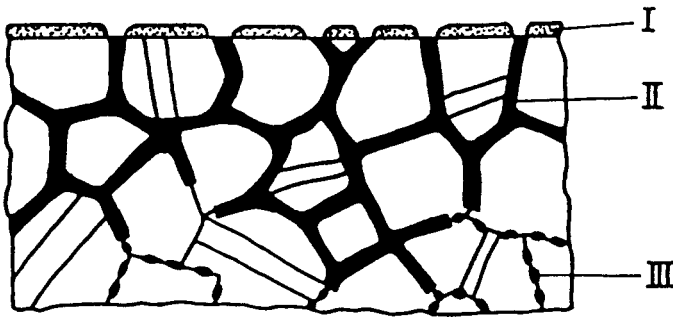


Bild 3-33: Interkristalline Korrosion schematisch

- I Passivschichtbildung am nicht chromverarmten Kornanteil
- II selektiver Angriff der korngrenznahen chromverarmten Zonen
- III Korngrenzen mit Chromkarbiden

Transkristalline Korrosion

Im Gegensatz zu der interkristallinen Korrosion erfolgt die transkristalline Korrosion durch die Körner eines Werkstoffgefüges hindurch. Sie tritt bevorzugt entlang derjenigen Gleitebenen auf, an denen sich infolge plastischer Verformungen eine erhöhte Versetzungsdichte (die Versetzungsdichte gibt die Häufigkeit von Versetzungen an und ist ein Maß für vorangegangene Verformungen) und damit ein höherer Energiezustand eingestellt hat. Sie stellt eine folgenschwere Art der Korrosion dar, da sie häufig erst bei einem Bruch (z. B. durch dauernde, starke Zugbeanspruchung) ersichtlich wird.

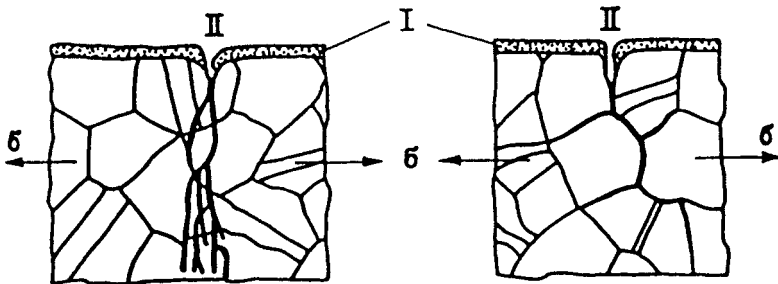


Bild 3-34: Transkristalline Spannungsrisskorrosion schematisch; verästelte Risse
I Passivschicht
II örtlicher Durchbruch der Passivschicht

Spannungsrisskorrosion

Bedingungen für das Auftreten von Spannungsrisskorrosion sind vorhandene Zug- oder auch Eigenspannungen (z. B. durch Schweißen bzw. Kaltverformungen), die Anwesenheit eines Elektrolyten sowie die Entstehung eines Anrisses.

Die Spannungen führen zu einer Bewegung der Versetzungen im Inneren des Werkstoffs. An der Werkstückoberfläche entstehen Gleitstufen. Ist die Oberfläche mit einer oxidhemmenden Deckschicht überzogen, so wird sie an den Gleitstufen unterbrochen und die Korrosion kann am Werkstoff angreifen. Das Zusammenwirken von Korrosion und mechanischer Belastung führt zum beschleunigten Rissfortschritt und frühzeitigen Versagen des Bauteils.

Die Neigung zur Spannungsrisskorrosion ist besonders bei den austenitischen Stählen zu beobachten. Gefördert wird dies durch halogenionenhaltige Angriffsmittel, vor allem solche mit Chloriden der Alkali- bzw. Erdalkalimetalle z. B. Lösungen, die Natrium-Calcium- oder Magnesiumchlorid enthalten. Mit steigender Chlorid-Ionenkonzentration nimmt die Anfälligkeit zu. Aus diesem Grund dürfen beispielsweise bei Sauergasanwendungen, z. B. nach NACE, die Stähle einen bestimmten Härtewert von 22 HRC nicht überschreiten. Zuvor kaltverformte Schutzrohre werden daher nach dem Umformprozess spannungsarm gegläht.

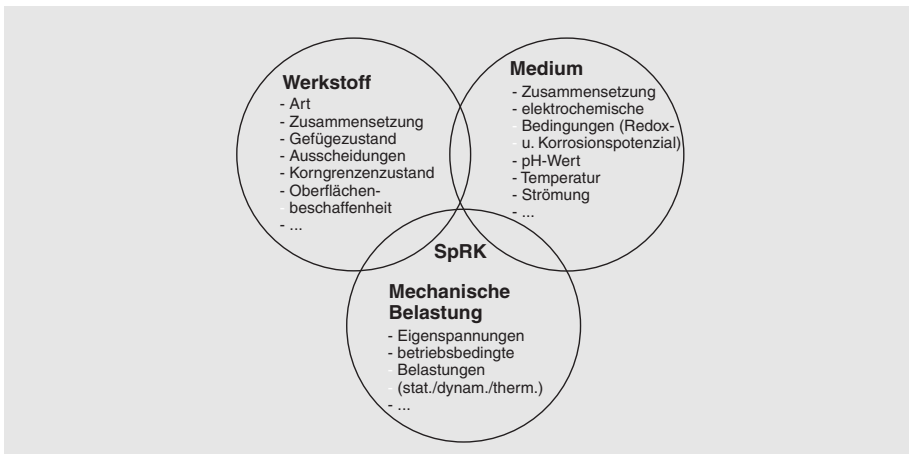


Bild 3-35: Spannungsrisskorrosion als Folge des Zusammenwirkens verschiedener Einflussfaktoren

Schwingungsrissskorrosion

Schwingungsrissskorrosion ist durch dynamische Zugspannungen bei gleichzeitigem Einwirken eines korrosiven Mediums bedingt. Versetzungen der Gleitebenen des Werkstoffs an der Werkstückoberfläche, welche durch die Schwingbeanspruchung entstanden sind, führen zu tiefen Anrissen. Schon schwache Elektrolyte bewirken das frühzeitige Versagen des Bauteils.

Begegnen kann man der Schwingungsrissskorrosion zum einen durch geeignete Werkstoffauswahl in Abhängigkeit vom Angriffsmedium und zum anderen durch entsprechende Schutzrohrberechnung. Bei kritischen Anwendungen in der Nähe ihrer Belastbarkeitsgrenze sollte unbedingt eine Berechnung erfolgen. Diese berücksichtigt insbesondere die kritische Resonanzschwingung (siehe Kapitel 3.2.5).



Bild 3-36: Schwingungsrissskorrosion am Beispiel einer Flansch/Schutzrohrverbindung. Der Abriss erfolgte am Beginn des Gewindes zur Prozessseite

Spannungs- und Schwingungskorrosion können bei allen metallischen Werkstoffen auftreten. Der Korrosionsvorgang erfolgt bei der Spannungsrissskorrosion je nach Werkstoff und Elektrolyt inter- oder transkristallin.

Wasserstoffversprödung

Wasserstoffversprödung entsteht in Elektrolyten durch Kathodenreaktion. Der aktive Wasserstoff diffundiert in den Werkstoff und lagert sich in die Tetraeder und Oktaederlücken des Kristallgitters ein. Das Kristallgitter wird gedehnt und die Wasserstoffatome verhindern die elastische Bewegung der Metallatome (Versprödung). Unter Beanspruchung kommt es zur Rissbildung bis hin zum Bruch des Werkstoffs. Wie bei allen Risskorrosionsarten verläuft der Vorgang zunächst unbemerkt und wird erst bei einem Bruch ersichtlich. Zur Vermeidung werden spezielle Werkstoffe eingesetzt.

Bei den verschiedenen Arten der Schädigung von Stählen durch Wasserstoff sind die Vorgänge in wässrigen Medien von solchen zu unterscheiden, die bei höheren Temperaturen in Gasen ablaufen. Die Schädigung in gasförmigen Medien beruht vorwiegend auf einer Entkohlung des Stahles, wobei in Abhängigkeit von der Temperatur des Werkstoffs und dem Druck des im Medium enthaltenen Wasserstoffs die Entkohlung von der Oberfläche bis ins Innere des Stahles reicht. Der Einlagerungseffekt tritt in den Hintergrund.

Als Druckwasserstoffangriff im engeren Sinne werden nur die Schädigungen bezeichnet, die auf der inneren Entkohlung beruhen. Da die Entkohlung durch Abbinden des Kohlenstoffs unterdrückt werden kann, besitzen alle mit Karbidbildnern legierten Baustähle eine Druckwasserstoffbeständigkeit, die der von Kohlenstoffstählen überlegen ist. Mit zunehmendem Legierungsgehalt steigt die Beständigkeit im allgemeinen an.

Die speziell für den Einsatz unter Druckwasserstoffangriff entwickelten Stähle enthalten vor allem die Elemente Chrom, Molybdän und Vanadium im Legierungsbereich der niedriglegierten Stähle, wie z. B. 1.7362. Sie sind im SEW 590 (Stahl Eisen Werkstoffblatt) vereinheitlicht.

Neben diesen Werkstoffen können je nach Beanspruchung auch weitere Stähle, vor allem aus den Werkstoffgruppen der „warmfesten und hochwarmfesten Stähle“ sowie der „nichtrostenden und säurebeständigen Stähle“ verwendet werden.

Selektive Korrosion

Abweichend von den bisher geschilderten Korrosionsarten wird bei der selektiven Korrosion nur eine Gefügeart angegriffen, während das Restgefüge vollkommen erhalten bleibt. Bei den austenitischen CrNi-Stählen ist es besonders die Sigma-Phase und der in Sigma-Phase umgewandelte δ -Ferrit, der selektiv angegriffen wird. Diese Korrosionsart tritt bevorzugt in Schweißnähten austenitischer CrNi-Stähle auf. Ein selektiver Angriff erfolgt bei bestimmten Mischungen aus reduzierenden und oxidierenden Säuren, z. B. Flusssäure-/Salpetersäure-Mischungen und in stark oxidierender Schwefelsäure.

Allgemeine Bemerkungen

Selbst wenn der Werkstoff optimiert ist, kann ein aggressiver Angriff in Teilbereichen auftreten, wie z. B. an Schweißnähten, da hier während des Schweißvorgangs Entmischungen der Legierung auftreten können. Es entstehen partiell Werkstoffzusammensetzungen mit geringerer Beständigkeit. Um dies auszuschließen verwendet man bei sehr aggressiven Medien Schutzrohre aus Vollmaterial, so dass medienseitig keine Schweißnähte vorhanden sind. Darüber hinaus werden teilweise zwei ineinandergesteckte Schutzrohre verwendet.

Generell kann man sagen, dass es für die meisten Medien keinen Werkstoff gibt, der absolut beständig ist. Bei der Temperaturmessung ist durch Zusammenwirken von aggressiven Medien und hoher Temperatur immer ein Verschleiß gegeben. Es kommt darauf an, Werkstoffe auszuwählen, bei denen dieser so gering gehalten wird, dass die Lebensdauer maximiert wird.

Für die Auswahl des richtigen Werkstoffes ist es ratsam, mindestens die Werkstoffqualität einzusetzen, aus dem der Behälter/die Rohrleitung besteht oder aus Preis- bzw. Festigkeitsgründen einen Werkstoff mit entsprechend resistenter Ummantelung aus z. B. Emaille, PFA, Tantal, sowie abriebfesten Beschichtungen, beispielsweise Stellite, einzusetzen.

3.2.7 Werkstoffauswahl

Die nachfolgenden Tabellen geben einen Überblick über häufig verwendete Schutzrohrwerkstoffe.

Max. Temp. in °C	Werkstoff-Nr.	Werkstoffeigenschaften	Einsatzbereich
Unlegierte, warmfeste- und hochwarmfeste Stähle			
400	1.0305 (ASTM 105)	Unlegierter Stahl	Einschweiß- und Einschraubschutzrohre in Dampfleitungen
500	1.5415 (AISI A204 Gr.A)	Niedriglegierter warmfester Stahl mit Molybdän-Zusatz	Einschweiß- und Einschraubschutzrohre
540	1.7335 (AISI A182 F11)	Niedriglegierter warmfester Stahl mit Chrom- u. Molybdän-Zusatz	Einschweiß- und Einschraubschutzrohre
570	1.7380 (AISI A182 F22)	Niedriglegierter warmfester Stahl mit Chrom- u. Molybdän-Zusatz	Einschweiß- und Einschraubschutzrohre
650	1.4961	Hochwarmfester austenitischer Chrom-Nickel-Stahl (Niob stabilisiert)	Einschweiß- und Einschraubschutzrohre
Rost- und säurebeständige Stähle			
550*)	1.4301 (AISI 304)	Gute Beständigkeit gegen organische Säuren bei mäßigen Temperaturen, Salzlösungen, wie z. B. Sulfate, Sulfide, alkalische Lösungen bei mäßiger Temperatur	Nahrungs- und Genussmittelindustrie, medizinischer Apparatebau
550*)	1.4404 (AISI 316 L)	Durch den Zusatz von Molybdän höhere Korrosionsbeständigkeit in nicht oxidierenden Säuren, wie Essigsäure, Weinsäure, Phosphorsäure, Schwefelsäure und anderen. Erhöhte Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion und Lochfraß durch reduzierten Kohlenstoffgehalt	Chemie, Zellstoff-Industrie, Kerntechnik, Textil-, Farben-, Fettsäuren-, Seifen- Pharmazeutische Industrie sowie Molkereien und Brauereien
550*)	1.4435 (AISI 316 L)	Höhere Korrosionsbeständigkeit gegenüber 1.4404, geringerer Delta-Ferritanteil	Pharmazeutische Industrie
550*)	1.4541 (AISI 321)	Gute interkristalline Korrosionsbeständigkeit. Gute Beständigkeit gegen Schwerölprodukte, Dampf und Verbrennungsabgase. Gute Oxidationsbeständigkeit	Chemie, Kernkraft- und Reaktorbau, Textil-, Farben-, Fettsäuren-, Seifen-Industrie
550*)	1.4571 (AISI 316 Ti)	Erhöhte Korrosionsbeständigkeit gegenüber bestimmten Säuren durch Zusatz von Molybdän. Resistent gegen Lochfraß, Salzwasser und aggressive Industrieinflüsse	Pharmazeutische Industrie sowie Molkereien und Brauereien

*) In Abhängigkeit von Druckbelastung und Korrosionsangriff können die Anwendungstemperaturen bis 800 °C reichen.

Max. Temp. in °C	Werkstoff-Nr.	Werkstoffeigenschaften	Einsatzbereich
Hitzebeständige Stähle			
1100	1.4749 (AISI 446)	Sehr hohe Beständigkeit gegenüber schwefelhaltigen Gasen und Salzen aufgrund hohen Chromgehaltes, sehr gute Oxidationsbeständigkeit sowohl bei konstanter als auch bei zyklischer Temperaturbeanspruchung (Geringe Beständigkeit gegenüber stickstoffhaltigen Gasen)	Einsatz in Rauch- und Verbrennungsgasen, Industrieöfen
1200	1.4762 (AISI 446)	Hohe Beständigkeit gegenüber schwefelhaltigen Gasen aufgrund hohen Chromgehaltes (Geringe Beständigkeit gegenüber stickstoffhaltigen Gasen)	Rauch- und Verbrennungsgasen, Industrieöfen
1150	1.4841 (AISI 314)	Hohe Beständigkeit gegenüber stickstoffhaltigen und sauerstoffarmen Gasen. Einsatz im Dauerbetrieb nicht zwischen 700 °C und 900 °C aufgrund Versprödung (höhere Warmfestigkeit gegenüber 1.4749 und 1.4762)	Kraftwerksbau, Erdöl- und Petrochemie, Industrieöfen
1100	2.4816 (Inconel 600)	Gute allgemeine Korrosionsbeständigkeit, beständig gegen Spannungsrissskorrosion. Ausgezeichnete Oxidationsbeständigkeit. Nicht empfohlen bei CO ₂ - und schwefelhaltigen Gasen oberhalb 550 °C und Natrium oberhalb 750 °C	Druckwasserreaktoren, Kernkraft, Industrieöfen, Dampfkessel, Turbinen
1100	1.4876 (Incoloy 800)	Durch Zusatz von Titan und Aluminium hat der Werkstoff besonders gute Werte für die Warmfestigkeit. Geeignet für Anwendungen, wo neben Zunderbeständigkeit höchste Belastbarkeit gefordert wird. Ausgezeichnet beständig gegen Aufkohlung und Aufstickung	Druckwasserreaktoren, Kraftwerksbau, Erdöl- und Petrochemie, Industrieöfen

Tab. 3-21: Schutzrohr-Werkstoffe

Für den Einsatz im Tieftemperaturbereich kommen austenitische Cr-Ni bzw. Ni-Legierungen zur Anwendung. Sie zeichnen sich durch besonders hohe Zähigkeit bis zu sehr tiefen Temperaturen aus.

3.2.8 Keramische Schutzrohre

Metallene Schutzrohre sind in der Anwendung vorzuziehen, da sie sowohl eine absolute Medien- als auch Druckabdichtung gewährleisten. Die Anwendung ist auf Temperaturen bis zum Bereich 1150 °C...1200 °C begrenzt, da sowohl die mechanische Festigkeit als auch die Oxidationsbeständigkeit darüber hinaus keine ausreichende Lebensdauer mehr zulässt.

Keramische Schutzrohre werden wegen ihrer vergleichsweise schlechten mechanischen Eigenschaften (sehr spröde) nur dann eingesetzt, wenn die Messbedingungen metallische Armaturen ausschließen, sei es aus chemischen Gründen oder wegen hoher Messtemperaturen. Im Temperaturbereich 1200 °C...1800 °C müssen keramische Schutzrohre verwendet werden.

Einbauposition

Um einen zufriedenstellenden Betrieb sicher zu stellen, sollte man einige besondere Aspekte berücksichtigen. Keramische Schutzrohre sind bruch- und thermoschockempfindlich und haben bei hohen Temperaturen geringe mechanische Festigkeiten.

Faustregeln für die Verwendung von keramischen Schutzrohren:

- Möglichst kurz halten
- Senkrecht einbauen
- Nur sehr langsam in Zonen hoher Temperatur hineinbringen
- Von direkter Vibrationsanregung fernhalten
- Vor Gewichtszunahme durch Ablagerungen schützen
- Stoßbeanspruchung durch Flugpartikel vermeiden
- Trocken (am besten im Ofen) lagern.

Es ist nicht unbedingt notwendig die Messstelle in der Mitte eines Heißkanals zu platzieren. In geringem Wandabstand, d. h. mit kürzerer Einbaulänge, erreicht man praktisch das gleiche Temperaturprofil (so lange die Wand nicht gekühlt ist).

Da am Rand, bzw. in der Ausmauerung von Öfen, die Temperaturen meist unter 1200 °C liegen, können ab dort hitzebeständige Stähle eingesetzt werden. Das keramische Schutzrohr sollte in dieser Zone in einem metallischen Halterrohr geführt werden, um die Biegebelastung der freien Länge kurz zu halten. Außerdem hat diese Konstruktion den Vorteil, dass der Temperaturfühler am Halterrohr in einem üblichen Schiebemuffen/Anschlagflansch gehalten wird und in Schritten langsam in die Prozesszone eingeführt werden kann.

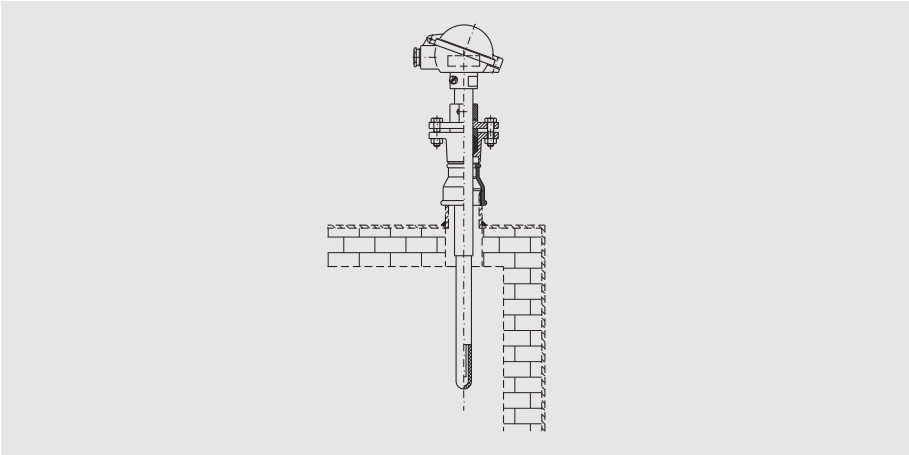


Bild 3-37: Einbau eines geraden Thermoelements mit verschiebbarer Befestigung

Thermoschockbeständigkeit

Die verwendeten Keramikrohre haben unterschiedliche Empfindlichkeiten gegenüber Thermoschock.

Die Temperaturwechselbeständigkeit fällt mit steigender Reinheit des (Al_2O_3) Schutzrohrs (C 530 > 80 % Reinheit, nicht gasdicht; C 610 > 60 % Reinheit, gasdicht und C 799 > 99 % Reinheit, gasdicht). Bereits Haarrisse im Keramikrohr können ein Eindringen von Fremdstoffen und somit ein Driften der Thermospannungswerte bewirken. Zur Vermeidung von Rissen ist beim Ein- und Ausbau aus dem Prozess darauf zu achten, dass das Schutzrohr nur eine allmähliche Temperaturänderung erfährt.

Die Verwendung eines Innenrohres aus gasdichter Keramik in einem Außenrohr aus thermoschockbeständiger Keramik ist daher ratsam. Hierbei schützt das äußere das innere Schutzrohr. Durch die zwischen beiden Schutzrohren befindliche Luftschicht wird die empfindliche Innenkeramik vor einem zu großen Temperaturschock geschützt. Man erhöht damit die Lebensdauer des Temperaturfühlers.

Montagehinweis

Entscheidend ist auch die vorliegende Prozesstemperatur, bei der der Fühler eingeführt werden soll.

Wird unter diesen Bedingungen der Fühler eingebaut, sollte so verfahren werden, dass der Fühler bis zur Hälfte der Ausmauerung vorgeschoben, 10 Minuten gewartet wird, und dann in Schritten von 10 cm mit jeweils 5...10 Minuten Wartezeit weiter eingeschoben wird. Dadurch hat der Fühler die Möglichkeit, sich auf der Länge jeweils auf die geringe Temperatur der Ausmauerung vorzuwärmen und durch Strahlung aus dem Einbauloch langsam Kontakt mit der Mediumtemperatur zu bekommen.

Beachtet man diese Vorsichtsmaßnahme nicht, kann das Keramikrohr durch innere Wärmespannungen zerstört werden!

Keramische Schutzrohre		
Max. Einsatztemperatur in °C	Werkstoff-Nr.	Werkstoffeigenschaften
1400	C 530	Temperaturwechselbeständig, feinporös, nicht gasdicht, schlagempfindlich
1500	C 610	Gasdicht, hohe Feuerbeständigkeit, mittlere Temperaturwechselbeständigkeit, geringe Al_2O_3 -Reinheit, schlagempfindlich
1800	C 799	Sehr gasdicht, höchste Feuerbeständigkeit, geringe Temperaturwechselbeständigkeit, schlagempfindlich

Tab. 3-22: Keramische Schutzrohrwerkstoffe

Darüber hinaus können in besonderen Anwendungsfällen, z. B. Metallschmelzen, Schutzrohre aus Karbiden oder Nitriden verwendet werden.

3.3 Anwendungsspezifische Temperaturfühlerausführungen

Heißgasmessung in Brennkammern

Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Gasen nimmt ein Temperaturfühler Gastemperaturen nur sehr langsam an. Um große Messfehler, die durch Wärmestrahlung (gekühlte Wandung) wie sie beispielsweise in Hochöfen entstehen, zu vermeiden, werden Absaug-Thermoelemente eingesetzt. Das heiße Prozessgas wird durch Unterdruck, der mittels Pressluft erzeugt wird, abgesaugt.

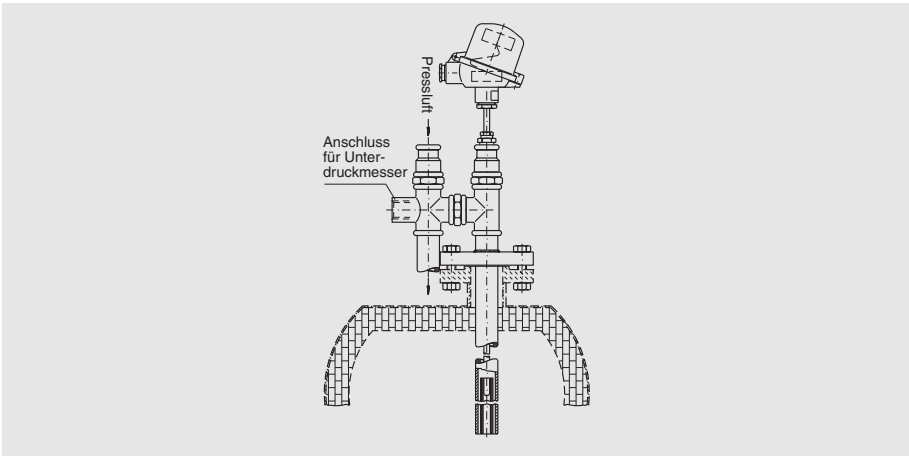


Bild 3-38: Absaugthermoelement in Brennkammern

Temperaturmessung in Hochdruck-/Hochtemperaturreaktoren

Hier kommen Temperaturfühler mit keramischen Innen- und Außenschutzrohren zum Einsatz. Dabei wird das Thermopaar gegen den Anschlussraum mit einer druckdichten Verschraubung abgedichtet. Zum Schutz vor schädigenden Medien, welche die Charakteristik des Thermopaars beeinflussen können (z. B. Schwefel in Claus-Anlagen), wird Inertgas über einen Spülgaseintritt eingeleitet. Hierdurch wird ein entsprechender Gegendruck im Schutzrohr aufgebaut. Mit einem zusätzlichen Auslassstutzen kann die Spülung kontrolliert und verstärkt werden.

Eine Spülung erfolgt jedoch nur, wenn der Spüldruck größer als der Prozessdruck ist. In der Regel ist meistens nur ein sehr geringer Durchsatz erforderlich. Anwendungen finden sich bei der Herstellung chemischer Produkte, bei denen gasförmige Elemente bei hohem Druck/Temperatur in Reaktion gebracht werden (Synthesereaktoren, Düngemittelherstellung, etc.).

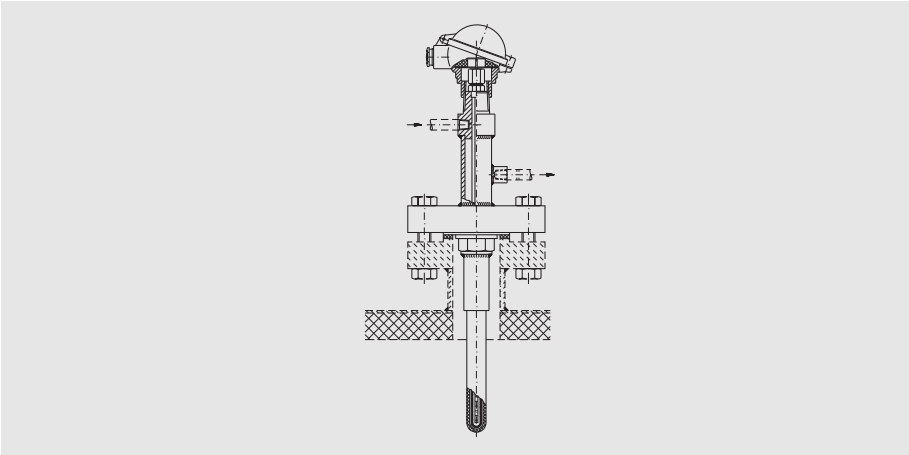


Bild 3-39: Gespültes Thermoelement im Hochdruckreaktor

Temperaturmessung in partikelbeladenen Gasen

Bei der pneumatischen Förderung von Granulaten und Stäuben ist vielfach eine Temperaturmessung erforderlich, um die Entzündungsgrenze zu überwachen. Angeströmte Temperaturfühler erleiden durch Abrasion einen hohen Abtrag. Man kann der Abrasion begegnen, indem man Schutzrohre bepanzert (z. B. mit Stellite, siehe Bild 3-40), verschleißarme Spitzen aus Vollmaterial einsetzt, exzentrisch gebohrte Schutzrohre verwendet bzw. Prallstäbe vor das Schutzrohr setzt. Derartige Temperaturfühler finden Anwendung in der Holzverarbeitenden Industrie, Kohleverarbeitung, Zementindustrie, Kohlekraftwerken und der Glasindustrie.

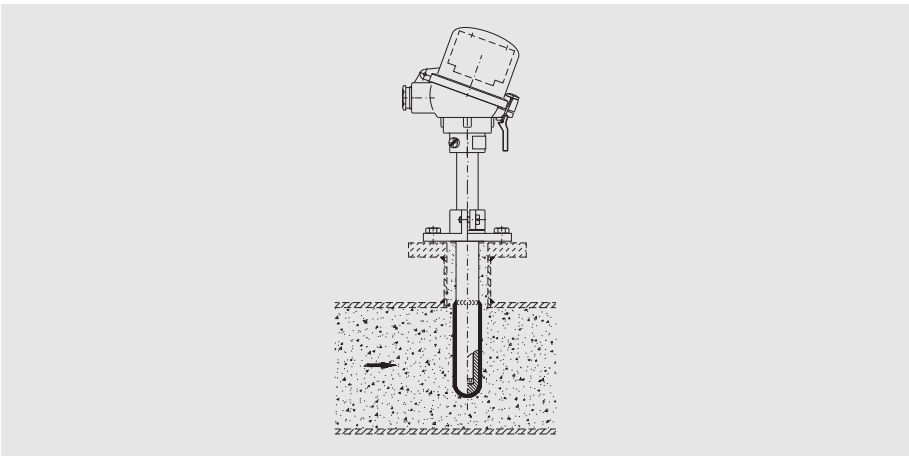


Bild 3-40: Gepanzertes Thermoelement in abrasiven Gasströmungen

Temperaturmessung in Rauchgaskanälen

Filteranlagen in Schornsteinen können sehr empfindlich gegen Überhitzung sein. Hierbei kommt es darauf an, einen Temperaturanstieg des Gases schnellstmöglich zu erkennen.

Da waagrecht in den Gasstrom hereinragende dünne Mantelthermometer nicht stabil genug sind, eine Mindesteinbauposition jedoch erreicht werden muss, sind Sonderkonstruktionen nötig. Zum Einsatz kommt ein Temperaturfühler, der durch ein Tragrohr an die Messposition gebracht und dort senkrecht abgewinkelt mit der Strömung geführt wird.

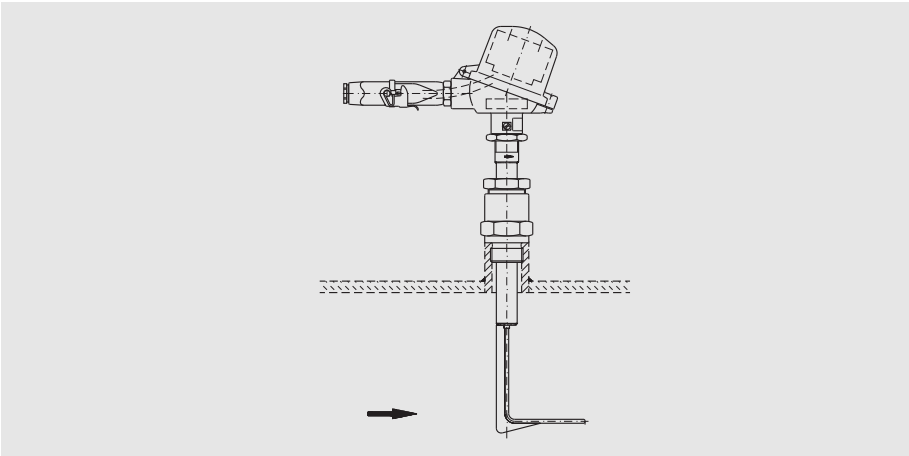


Bild 3-41: Schnellansprechender Temperaturfühler im Strömungskanal

Mehrfach-Stufen-Temperaturfühler zur Temperaturmessung in Großbehältern

In der chemischen Prozesstechnik werden häufig große Volumina überwacht. Da die Temperaturverteilung innerhalb großer Behälter ungleichmäßig sein kann, sind dazu Mehrfach-Messstellen erforderlich, die repräsentativ im Raum verteilt werden. Da ein Zugang zu den Behältern zumeist nur durch eine Öffnung von oben möglich ist, werden hierzu Stufen-Temperaturfühler eingesetzt, in denen innerhalb eines Schutzrohres mehrere Messstellen angeordnet sind. Stufen-Temperaturfühler mit bis zu 20 m Länge und über eine Tonne Gewicht sind dabei keine Seltenheit.

In Schutzrohren wird eine gute Wärmekopplung durch Kontakt der Messelemente mit der Innenwand hergestellt. Eine individuelle Anpassung an explosions- und druck-sichere Ausführungen ist möglich. Sie werden zur Zustandsüberwachung in Flüssigkeits- und Feststofflagertanks eingesetzt.



Bild 3-42: Mehrfach-Stufen-Temperaturfühler in Lagertanks und Prozessreaktoren

Temperaturmessung in Metallschmelzen und Salzbadern mit Winkelthermoelementen

Diese Temperaturfühler werden vorwiegend zur Temperaturmessung in Nichteisenmetallschmelzen und Härtesalzbadern eingesetzt. Bei senkrechtem Einbau in offenen Behältern wird die Winkelform gewählt, damit Anschlusskopf und Anschlusskabel außerhalb des Strahlungsbereiches des Badspiegels liegen. Als Schutzrohre kommen an die Anwendung angepasste Werkstoffe aus thermoschockbeständiger Keramik sowie Metall zum Einsatz. Da das Schutzrohr beim direkten Eintauchen in Schmelzen höchsten Belastungen ausgesetzt ist, muss es als Verschleißteil angesehen werden. Die Haltbarkeit kann erhöht werden, indem dieser Bereich mit einer zusätzlichen Schutzmuffe (Schlichte) überzogen wird.

Für den Einsatz bei Müllverbrennungen, Drehrohr- und Wirbelschichtöfen sowie Windheizern sind Schutzrohre aus Siliziumkarbid, Metallkeramik oder poröser Oxydkeramik wegen ihrer hohen Temperaturbeständigkeit, Härte und Abriebfestigkeit bzw. Beständigkeit gegen Säure und Alkalidämpfe besonders geeignet. Diese Temperaturfühler werden dann nicht winklig, sondern als „Gerade Thermoelemente“ ausgeführt.

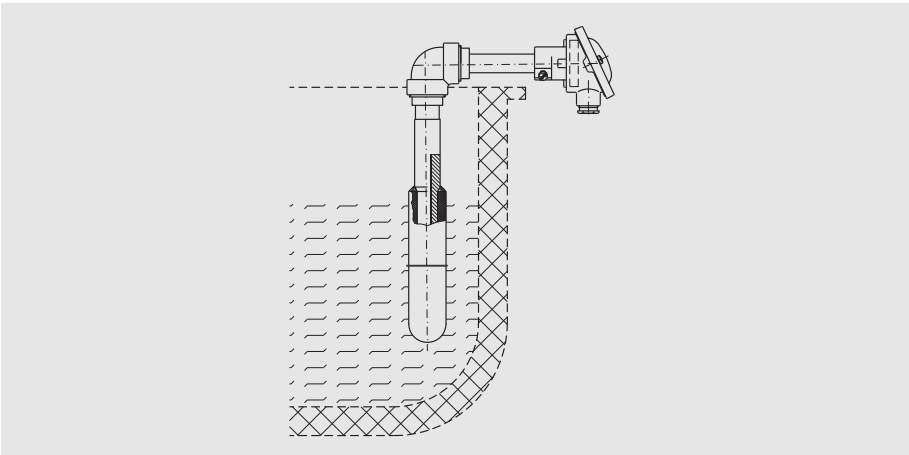


Bild 3-43: Winkelthermoelement in einem Schmelztiegel

Widerstandsthermometer mit extrem kurzen Ansprechzeiten

Überall dort, wo es die regeltechnische Aufgabenstellung erfordert, Prozesstemperaturveränderungen sehr schnell zu erfassen, kommen Spezialkonstruktionen zum Einsatz. Ihr Aufbau im Bereich der Messspitze ist dabei so gestaltet, dass der Messwiderstand innerhalb der Messeinsatzspitze in ein gut wärmeleitendes Medium eingesintert ist. Die Messspitze ihrerseits wird als Passhülse ausgeführt, die als Teil eines auswechselbaren Messeinsatzes in ein Schutzrohr eingebaut wird, dessen Spitze ebenfalls eine Passung aufweist. Durch den so entstehenden extrem guten Wärmeübergang können Ansprechzeiten $\tau_{0,5}$ von kleiner 3 Sekunden realisiert werden (gemessen in strömendem Wasser $v = 0,4 \text{ m/s}$).

Temperaturfühler dieser Bauweise werden vorwiegend im Primärkreislauf kerntechnischer Anlagen sowie bei sicherheitsrelevanten Anlagen zur Energiebilanzierung in chemischen Prozessen eingesetzt, wo höchste Sicherheitsanforderungen auch im Störfall gelten. Prozessparameter sind dabei Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s , Druck bis ca. 175 bar bei maximal $330 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

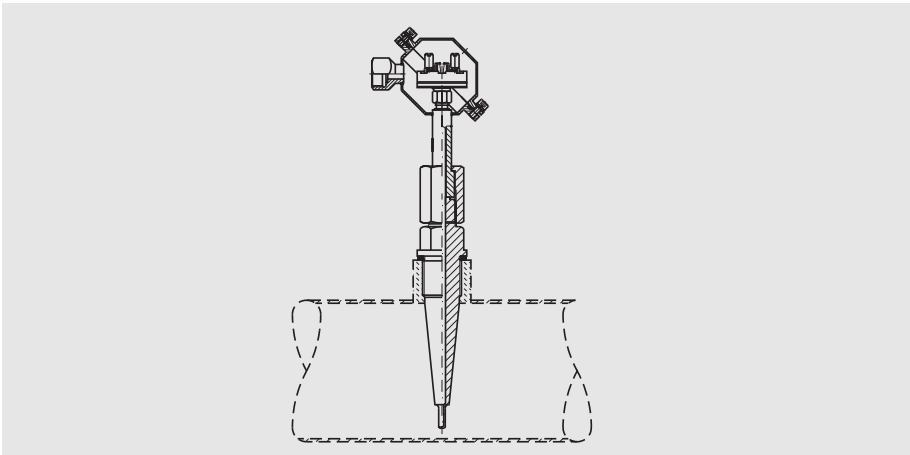


Bild 3-44: Fast-Response Temperaturfühler in einer Reaktorkühlleitung

Temperaturmessung in Kunststoffextrudern

Die genaue Kenntnis der Produkttemperatur während des Spritzvorganges ist ein wesentlicher Faktor, um die Verarbeitbarkeit und Produktqualität zu gewährleisten.

Die Messung ist schwierig, da ein eingebauter Fühler

- die Bewegung der Vorschubschnecke behindert,
- sehr massiv ausgeführt sein muss, da Verarbeitungsdrücke von 300...500 bar gefahren werden,
- einer starken Beeinflussung durch den außenliegenden Heizmantel ausgesetzt ist.

Die dafür geeignete Konstruktion ist ein massiver Fühler kurzer Bauart, in dessen Spitze Messstellen in mehreren Stufen eingebaut sind. Da man den Wärmefluss von außen nicht verhindern kann, ist durch Messung des Temperaturgradienten jedoch eine Bestimmung möglich. Auf diesem Wege kommt man zu einem aussagekräftigen Messwert für die Temperatur der Kunststoffmasse.

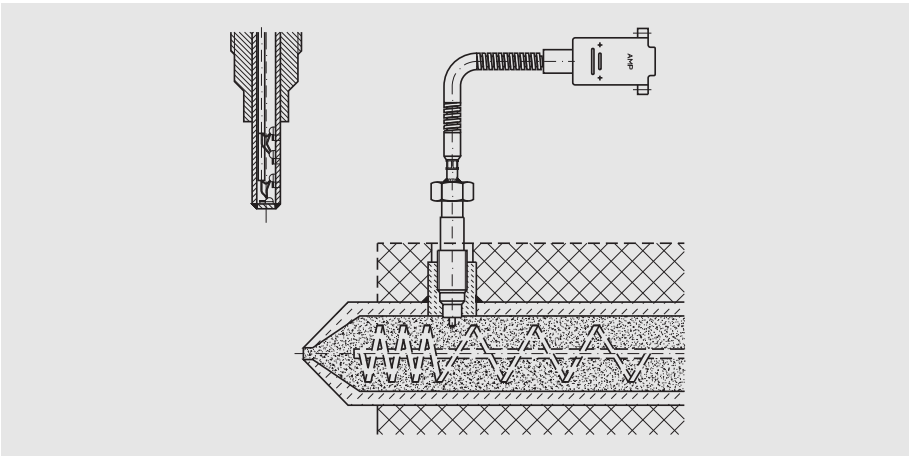


Bild 3-45: Extruder-Temperaturfühler

Temperaturfühler für die Nahrungsmittel- und Pharmaindustrie

Temperaturfühler für diese Anwendungsbereiche werden streng nach hygienisch technischen Anforderungen ausgelegt. Das bedeutet, dass die Konstruktion frei von engen Spalten und Toträumen sein muss, so dass sich keinerlei Produkte und Rückstände ablagern können. Eine Reinigung und Sterilisation der Anlage muss ohne Demontage der Temperaturfühler möglich sein. Man bezeichnet diese Eigenschaften als CIP-Fähigkeit (Cleaning in place) und SIP-Fähigkeit (Sterilising in place). Der Anschlusskopf muss einen hohen Gehäuseschutzgrad aufweisen, um beim Reinigen durch Dampfstrahl dicht zu bleiben.

Die messtechnischen Aufgaben erfordern sehr kurze Ansprechzeiten ($< 3\text{ s}$) bei hohen Genauigkeiten, damit die Produktqualität in engen Grenzen eingehalten werden kann. Zum Einsatz kommen hierbei nur hochlegierte Edelmetalle wie beispielsweise 1.4571, 1.4435 und 1.4404.

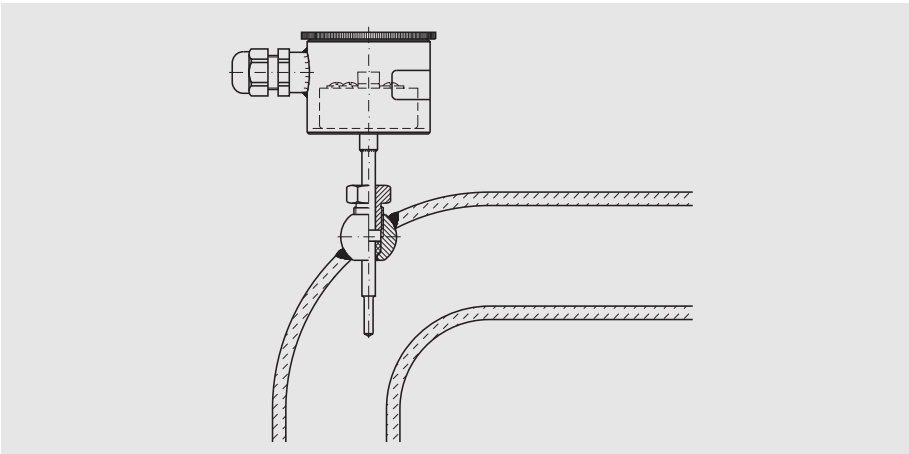


Bild 3-46: Temperaturfühler mit Einschweißkugel in hygienischer Anwendung zum Einbau in verschiedenen Winkelstellungen

Temperaturmessung von Behälterinhalten mit wandbündigem Schutzrohr

Der allseitige Wärmekontakt mit einem Eintauchschutzrohr kann nicht immer realisiert werden, da es im Prozess stört bzw. der auftretenden Beanspruchung nicht standhält. Z. B. in Rührwerksbehältern stört ein Schutzrohr, das an der Wand kratzende Rührwerk, so dass wandbündig gemessen werden muss.

Besondere Maßnahmen am Fühler müssen sicherstellen, dass:

- die thermische Entkopplung zur Wandung vorgenommen wird,
- die Kontaktfläche zum Medium groß genug ist,
- die Messung nicht durch den außen aufliegenden Heizmantel beeinflusst wird.

Ein hierfür geeigneter Fühler ist so aufgebaut, dass das Sensorelement Kontakt nur zur Behälterinnenseite, jedoch nicht zur mechanischen Befestigung hat.

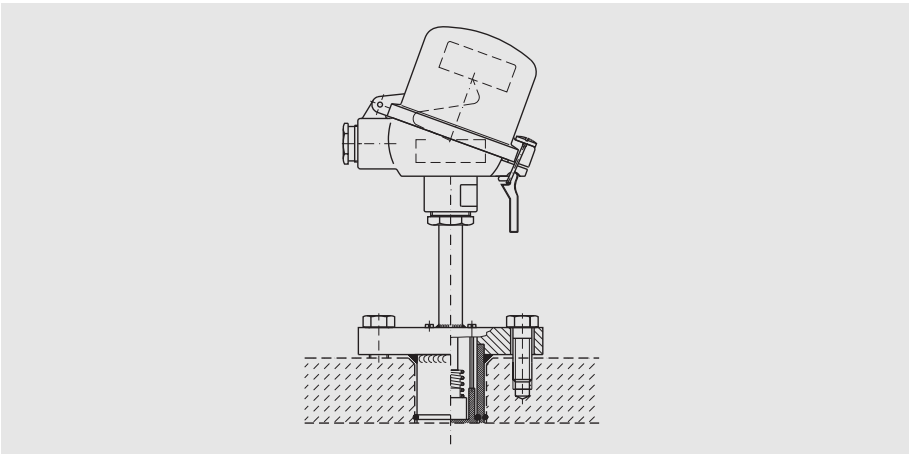


Bild 3-47: Wandbündiger Behältereinbau eines Temperaturfühlers

Temperaturfühler zur Wärmemengenmessung

Wärmeenergie ist teuer, eine kostenmäßige Abrechnung setzt daher eine sehr präzise Messung voraus. Die Anforderungen bezüglich Bauart und zulässiger Messabweichung für Wärmemengenfühler sind in der Norm EN 1434-2 definiert. Da Genauigkeiten für das Fühlerpaar im Bereich von $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ erforderlich sind, ist außer der genauen Selektion von Sensoren, das Verhältnis von Fühlermasse und Einbaulänge sehr wichtig, um sämtliche Außenbeeinflussungen zu vermeiden.

Zum Einsatz kommen hier Temperaturfühler ohne Schutzrohr mit extrem kurzer Messwiderstandslänge, um bei den meist geringen Rohrdurchmessern eine genaue Messung in der Rohrmitte, bei gleichzeitig geringer Wärmeableitung, zu ermöglichen.

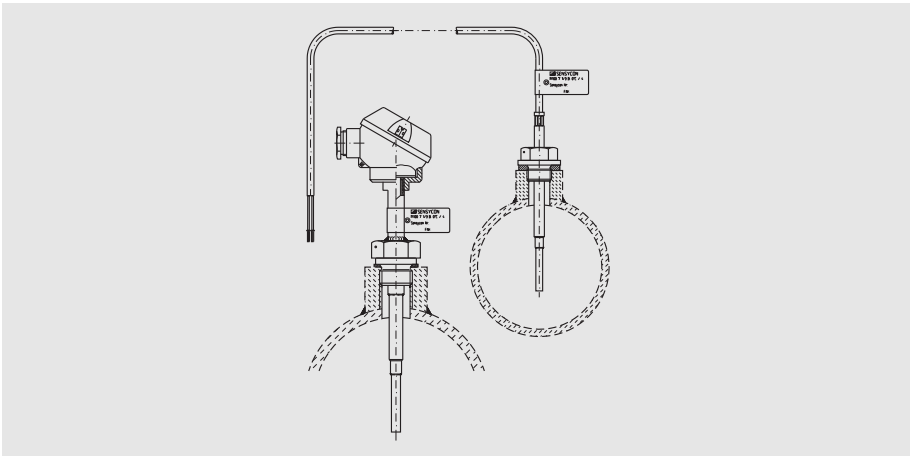


Bild 3-48: Temperaturfühler für die Wärmemengenmessung

Temperaturmessung an Oberflächen

Die Oberflächentemperaturmessung erlangt zunehmende Bedeutung. Aus unterschiedlichen Gründen (Unzugänglichkeit der Messstelle, Sterilität der Anlage, keine Störungen im Strömungskreis usw.) wird das direkte Einbringen von Temperaturfühlern in den Prozesskreis gerne vermieden. Dabei kommen aber nicht nur die Methoden der berührungslosen Infrarot-Messung zur Anwendung (siehe hierzu auch Kapitel 4). Besonders dort, wo unklare oder wechselnde Verhältnisse bezüglich des Emissionskoeffizienten ε zu erwarten sind, werden Oberflächentemperaturen auch über Berührungstemperaturfühler gemessen. Hierbei ist zwischen der ambulanten Messung (Fühler wird von Hand aufgesetzt, Tastfühler) und der Messung mittels fest an der Oberfläche angebrachten Fühlern, zu unterscheiden. Für die Prozesstechnik sind allerdings nur die fest angebrachten Fühler von Bedeutung.

Bei der Temperaturmessung an den Oberflächen fester Körper muss man grundsätzlich eine Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und dem abgrenzenden Medium voraussetzen. Oberflächenfühler werden somit im Bereich ausgeprägter Temperaturgradienten betrieben.

Daher entsteht bei der Oberflächentemperaturmessung ein Messfehler, verursacht durch den Einfluss (Störung) des Fühlers auf die (ungestörte) Oberflächentemperatur.

Bei der Anwendung von Oberflächen-Temperaturfühlern ist folglich nicht nur der eigentliche Fehler des Sensors durch Kalibrierung zu ermitteln, vielmehr muss darüber hinaus auch die Größe der Störung durch den Temperaturfühler auf die Oberflächentemperatur bestimmt werden. Die richtige Anwendung von Oberflächen-Temperaturfühlern setzt daher umfangreiche Erfahrung auf dem Gebiet der Temperatur-Messtechnik voraus. Eine anwendungstechnische Beratung durch den Temperaturfühler-Hersteller ist zu empfehlen.

Um die Wärmeableitung des Messelementes möglichst klein zu halten, sollte die Masse so gering wie möglich sein. Bei kleinen Oberflächen werden aufgrund ihrer geringen Masse häufig Thermoelemente mit einem Durchmesser von 0,5 mm verwendet.

Das Aufbringen erfolgt je nach Einsatzfall durch Auflöten, Aufschweißen, Aufschrauben bzw. Aufkleben durch eine Feder. Bei größeren Querschnitten kommen ebenso Widerstandsthermometer zum Einsatz. Diese sind je nach Art der Anbringung (tangential/axial) bodenempfindlich ausgeführt. Sie werden entweder mit einer Rohrschelle angeklemmt oder über ein Metallplättchen angeschraubt.

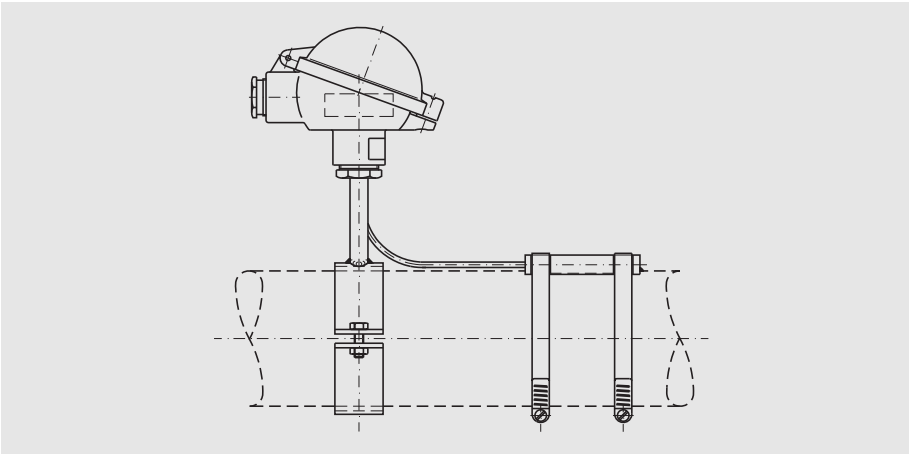


Bild 3-49: Messung auf einer Rohroberfläche

Rohrwandtemperaturmessung an Wärmetauscherrohren

In Wärmetauschern wird z. B. ein flüssiges Medium durch ein Rohrbündel gepumpt, das in einem Heißgasbehälter installiert ist. Über die große Kontaktfläche nimmt das Medium die Temperatur des Gases an. Da hier meist mit hohem Mediendruck und Temperaturen an der Belastbarkeitsgrenze des Rohrleitungswerkstoffs gefahren wird, ist eine Überwachung der Wandtemperatur nötig, damit es nicht durch Materialüberlastung zum Bruch des Systems kommt.

Die Konstruktion eines geeigneten Fühlers muss guten Kontakt zur Rohrwand ermöglichen, ohne selbst durch seine Masse und den Kontakt zum weit wärmeren Heißgas das Ergebnis zu verfälschen. Da Messtemperaturen von ca. 560 °C gefahren werden, ist die Verwendung herkömmlicher Isolierstoffe nahezu ausgeschlossen. Die Lösung für diese Aufgabenstellung ist ein Fühler aus mineralisolierter Mantelleitung mit einer V-förmig ausgebildeten Schneide und einer zur Innenwand gebogenen Messstelle, die durch Schweißen gut mit der Rohrwandung kontaktiert wird. Das Anschweißteil bildet dabei eine Haube über dem Messelement, das die gleiche Temperatur wie die Rohrwandung annimmt. Zum Ausgleich von Temperaturunterschieden werden zusätzliche Kompensationswindungen eingebaut.

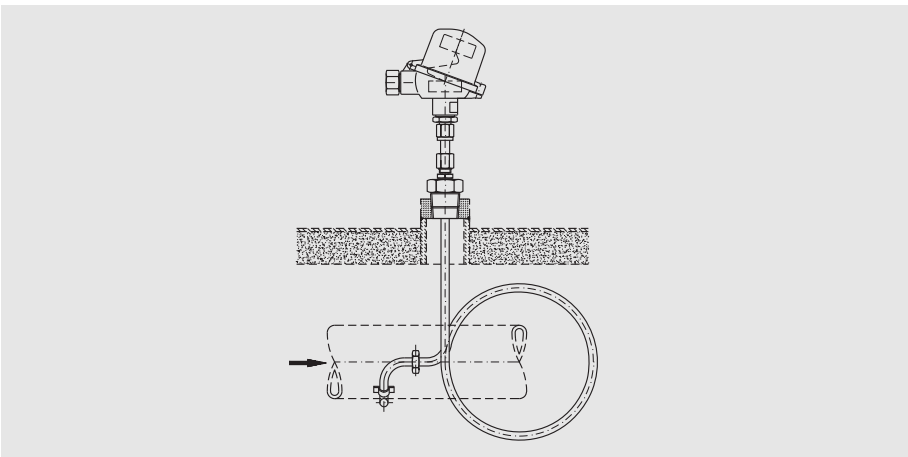


Bild 3-50: Messung auf einer Rohrleitung im Wärmetauscher

Temperaturmessung in Gehäusen und Wandungen

Um Temperaturen in Festkörpern zu messen, wird das Messelement in eine Bohrung in das zu messende Objekt eingelassen. Die Bohrung selbst und das Messelement stören das Temperaturfeld, so dass ein Messfehler entsteht. Der Messfehler wird um so größer, je größer die Bohrung im Verhältnis zum Objekt ist und je mehr sich die Wärmeleitfähigkeit des eingebrachten Temperaturfühlers von der des Objektes unterscheidet.

Als Richtwerte für das Verhältnis von Durchmesser/Tiefe der Bohrung für die Temperaturmessung in Objekten gelten:

- Bei guter Wärmeleitfähigkeit 1:5
- Bei schlechter Wärmeleitfähigkeit 1:10 bis 1:15.

Die Lösung ist ein aus zwei unabhängigen, federbelasteten mineralisolierten Mantelthermoelementen aufgebauter Fühler, der durch seine geringe Masse und seine punktförmige Messstelle eine weitgehend unverfälschte Messung gewährleistet. Einsatz finden diese Temperaturfühler u. a. an thermisch hochbelasteten Bauteilen in Kraftwerken.

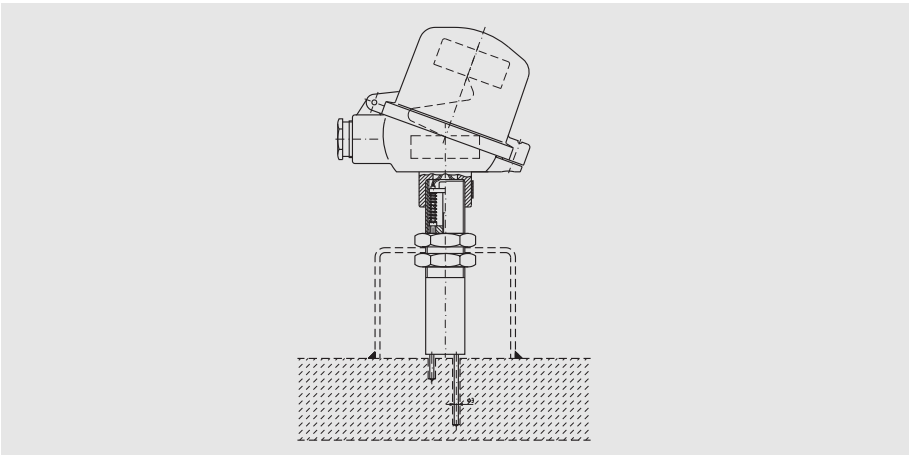


Bild 3-51: Differenztemperaturmessung innerhalb einer Wandung

Temperaturmessung in Lagerschalen und Gehäusen

Zur Messung von Gehäusetemperaturen kann meist nur eine kleine Bohrung geringer Tiefe eingebracht werden. Dies erfordert Temperaturfühler in sehr kurzer temperaturempfindlicher Bauweise. Sie werden meist durch eine zusätzliche Feder gegen den Boden gedrückt, um einen guten Wärmekontakt zu erzielen. Zusätzlich kommen zur Optimierung des Wärmeübergangs Silberspitzen zum Einsatz. Da z. B. bei Großdieselmotoren enorme Schwingungsbelastungen auftreten, müssen die Messfühler mit einem besonders stabilen Innenaufbau sowie verstärkten Federn versehen sein.

Eingesetzt werden diese Temperaturfühler zur Lagertemperaturmessung von Pumpen, Turbinen, Gebläsen und Motoren. Für den Einsatz an Großdieselmotoren auf Schiffen sind darüber hinaus Typprüfungen durch Schiffsahrts-Klassifikationsgesellschaften wie Lloyds Register of Shipping, Germanischer Lloyd u. a. erforderlich.

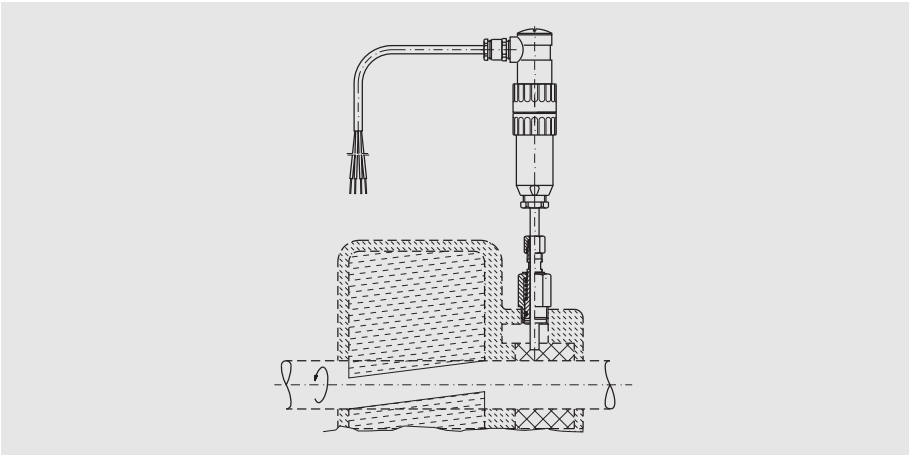


Bild 3-52: Temperaturmessung im Pumpenlager

Temperaturmessung in Bremsen an Eisenbahnnachsen

Zur Überwachung von Bremsen in Hochgeschwindigkeitszügen sind Temperaturfühler mit folgenden Eigenschaften erforderlich:

- Kleine robuste Bauart,
- Eignung für hohe mechanische Schockbelastung,
- mit spezifischer Messfläche, die so dicht wie möglich an der Reibfläche (Bremsbelag) platziert wird,
- schnellansprechend.

Eine geeignete Konstruktion ist ein kleiner federbelasteter Fühler mit Konussitz im Bremssattelgehäuse.

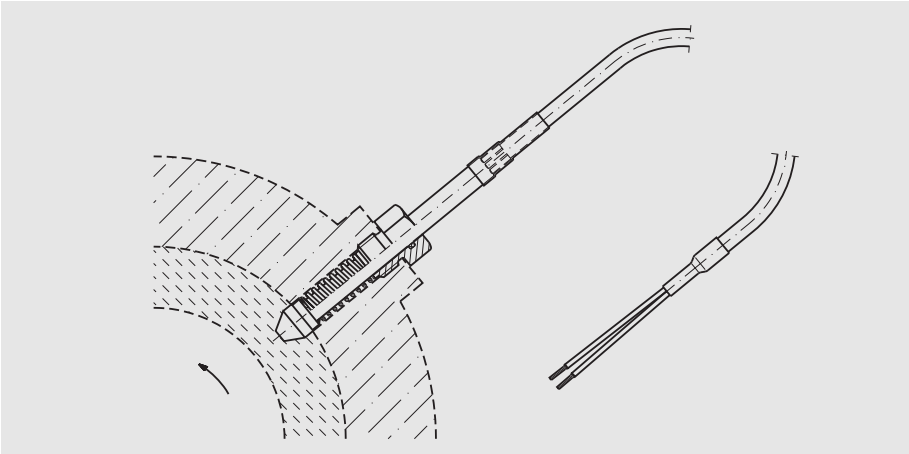


Bild 3-53: Temperaturmessung im Bremssattel

3.4 Dynamisches Verhalten von Temperaturfühlern

3.4.1 Einführung

Das dynamische Verhalten eines Temperaturfühlers beschreibt die Reaktion seines Ausgangssignals auf eine Änderung der Temperatur des zu messenden Mediums.

Bei der berührenden Temperaturmessung wird ein Temperaturfühler in Kontakt zum Messmedium gebracht. Die Temperatur, die sich im ausgeglichenen Zustand einstellen wird, ist eine „Mischtemperatur“ aus der ursprünglichen Temperatur des Temperaturfühlers und der Temperatur des Messmediums. Im Allgemeinen ist die thermische Masse des Messmediums deutlich größer als die des Temperaturfühlers, so dass diese „Mischtemperatur“ und die Temperatur des Messmediums gleichgesetzt werden können.

Ändert sich die Temperatur des Messmediums $T_M(t)$, so reagiert der Temperaturfühler. Sein Ausgangssignal $T_S(t)$ nähert sich dieser neuen Temperatur. Erst wenn der Temperaturfühler keine messbare Änderung des Ausgangssignals mehr zeigt, spricht man vom stationären Zustand.

Während dieser Zeit kann die zeitabhängige Differenz

$$\Delta T(t) = T_S(t) - T_M(t)$$

als dynamischer Messfehler bezeichnet werden. Das dynamische Verhalten eines Temperaturfühlers wird praktisch ausschließlich durch thermische Ausgleichsvorgänge zwischen Messobjekt bzw. Messmedium, Temperaturfühler und seiner Umgebung bewirkt.

Informationen und Kennwerte zum dynamischen Verhalten von Temperaturfühlern werden z. B. zur Abschätzung einer notwendigen Einstellzeit des Fühlers beim Eintauchen in ein Medium konstanter Temperatur, bei der Messung oder Signalisierung schneller Temperaturänderungen und für den Einsatz in Temperatur-Regelkreisen benötigt.

3.4.2 Sprungantwort und Übergangsfunktion, Einstellzeit und Zeitprozentkennwerte

Wird ein Temperaturfühler von einer Ausgangstemperatur T_{S0} , z. B. der Umgebungstemperatur T_U , zum Zeitpunkt $t = 0$ sprungartig mit einem Messobjekt oder Messmedium konstanter Temperatur T_M in thermischen Kontakt gebracht, z. B. durch Anlegen oder Eintauchen, beginnt ein thermischer Ausgleichsvorgang. Am zeitlichen Verlauf der Sensortemperatur $T_S(t)$, der sogenannten Sprungantwort, interessiert vor allem die Einstellzeit t_E , ab der der dynamische Messfehler kleiner ist, als ein unter Bezug auf die Messunsicherheit zweckmäßig festgelegter Teil δ der Ausgangstemperaturdifferenz $T_{S0} - T_M$:

$$T_S(t_E) - T_M \leq \delta (T_{S0} - T_M)$$

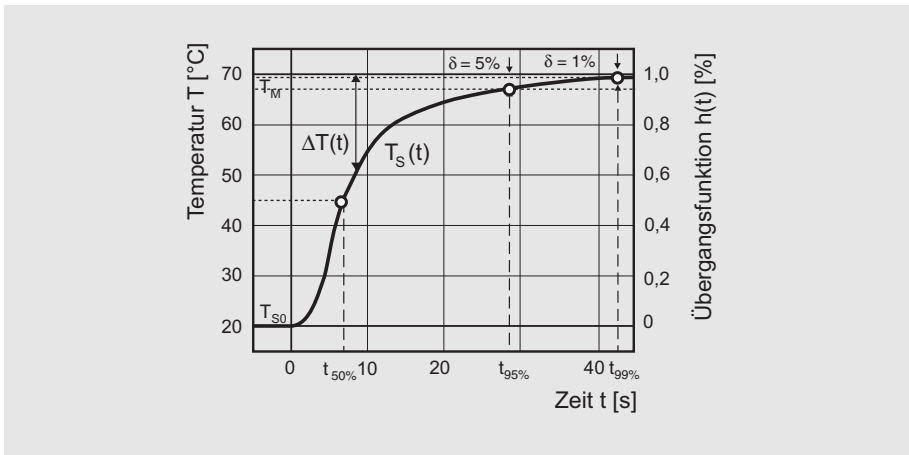


Bild 3-54: Typischer Einstellvorgang (Sprungantwort) bzw. Übergangsfunktion eines Temperaturfühlers

Die charakteristischen Größen des Temperaturfühlers sind seine Einstellzeiten. Diese werden durch Zeitprozentkennwerte beschrieben:

T_{05} bzw. T_{09} ist die Zeit, die der Temperaturfühler benötigt, um 50 % bzw. 90 % eines Temperatursprunges zu detektieren. Die Größe des Temperatursprunges ist hier von nachrangiger Bedeutung. Demzufolge ist die Temperaturänderungsgeschwindigkeit des Temperaturfühlers abhängig von der verbleibenden Differenz zur Temperatur des Messmediums. Die Temperatur des Messmediums wird also erst nach $t = \infty$ genau erreicht.

3.4.3 Ermittlung dynamischer Kennwerte

Nach VDI 3522 und EN 60751 werden für vergleichbare dynamische Kennwerte von industriellen Temperaturfühlern folgende zwei Messbedingungen empfohlen:

Luft: $T_L \approx 25\text{ °C}$, $v_L = (3 \pm 0,3)\text{ m/s}$ ($\rightarrow \alpha_L$)

Wasser: $T_W \approx 25\text{ °C}$, $v_W = (0,4 \pm 0,05)\text{ m/s}$ ($\rightarrow \alpha_W$)

Wenn diese Kennwerte auf andere Einsatzbedingungen umgerechnet werden sollen, müssen für diese Messbedingungen auch die wirksamen Wärmeübergangskoeffizienten bekannt sein. Sie können nach dem VDI-Wärmeatlas näherungsweise bestimmt werden.

In der folgenden Tabelle sind sie für die obigen Standard-Messbedingungen angegeben.

D [mm]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	4	6	8	10	20
α_L [W/m ² K]	414	290	237	205	184	132	95	79	70	64	47
α_W [W/m ² K]	28910	20540	16890	14700	13260	9670	7190	6100	5460	3990	3260

3.4.4 Einflussfaktoren

Die Größen T_{05} bzw. T_{09} sind abhängig von Parametern, die den Temperaturfühler sowie das Messmedium betreffen.

Die Hauptfaktoren sind

Das Messmedium betreffend:

- Wärmekapazität,
- Wärmeleitwert,
- Wärmeübergangskoeffizient zum Temperaturfühler,
- Strömungsgeschwindigkeit.

Den Temperaturfühler betreffend:

- Größe (im allgemeinen der Durchmesser),
- Gewicht,
- verwendete Materialien,
- innerer Aufbau.

Die Einflussfaktoren des Messmediums sind gegebene Größen. Hier kann kaum optimiert werden. Beim Temperaturfühler jedoch gibt es einige Maßnahmen zur Verkürzung der Einstellzeit.

Die wichtigsten sind:

- Reduktion des Durchmessers im Bereich des Sensors,
- Reduktion der Masse im Bereich des Sensors.

Diese beiden Maßnahmen sind miteinander gekoppelt.

Der Temperaturfühler zeigt erst dann stationäres Verhalten, wenn seine Temperatur homogen ist. Die gleichmäßige Durchwärmung des Fühlers ist bei kleineren Fühlern schneller erreicht als bei größeren. Allerdings darf durch diese Maßnahmen die mechanische Stabilität nicht gefährdet werden.

Die Schutzrohrgeometrien tragen sowohl der Optimierung der Einstellzeit, als auch den mechanischen Anforderungen Rechnung.

- Sensorbereich in der Rohrmitte positionieren

In der Rohrmitte sind, laminare Strömung vorausgesetzt, die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten des Messmediums zu erwarten. Auch durch diese Maßnahme darf die mechanische Stabilität nicht gefährdet werden. Beispiele für den Einbau von Fühlern werden in Kapitel 3.2 beschrieben.

Eine weitere Maßnahme wäre z. B. die Verwendung von Koppelmitteln, wie Wärmeleitpaste (bei $T_{\max} < 200\text{ °C}$), oder die Verwendung von Schutzrohrspitzen aus gut wärmeleitenden Materialien. Die Vielzahl von Fühlergeometrien erlaubt hier keine vollständige Aufzählung.

Welche Auswirkungen sowohl die Bauform oder die Abmessungen, als auch der innere Aufbau, besonders aber die äußeren Wärmeübergangsbedingungen auf das dynamische Verhalten eines Temperaturfühlers haben, wird in Bild 3-55 gezeigt. Hier sind die sehr unterschiedlichen Sprunganworten unter gleichen Messbedingungen (strömendes Wasser) eines Widerstandsthermometer-Messeinsatzes (6 mm Ø), des gleichen Messeinsatzes mit einem zusätzlichen Schutzrohr und schließlich mit einer auf das Schutzrohr als Korrosionsschutz aufgetragenen PFA-Beschichtung von 0,5 mm Dicke gegenübergestellt.

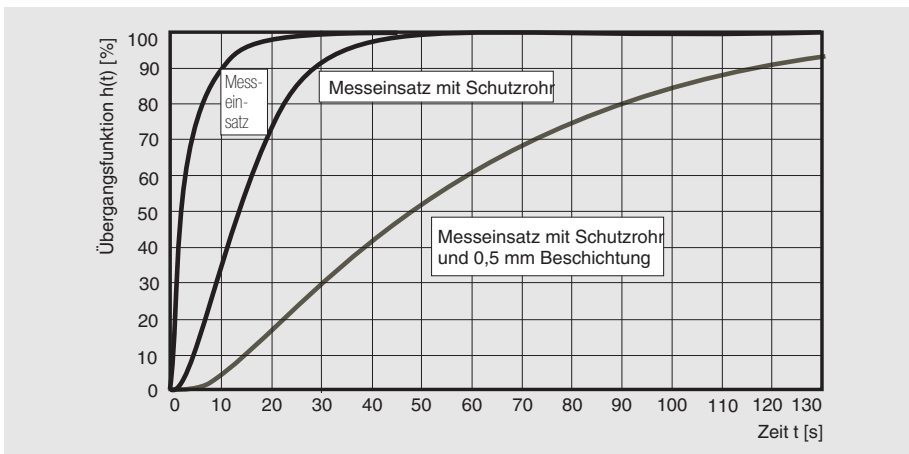


Bild 3-55: Übergangsfunktionen von Widerstandsthermometern unterschiedlicher Bauform in Wasser $v_W = 0,4\text{ m/s}$, $T_W = 25\text{ °C}$

3.5 Alterungsmechanismen technischer Temperaturfühler

Temperaturfühler unterliegen während ihrer Anwendung einer betriebsbedingten Alterung. Dieser komplexe Vorgang, der allgemein unter dem Begriff „Drift“ zusammenfassend bezeichnet wird, und der das Langzeitverhalten des Fühlers im Einsatz beschreibt, ist das Ergebnis verschiedener Einflussfaktoren metallurgischer, chemischer und physikalischer Art.

Die quantitativen Auswirkungen dieser Einflussfaktoren werden in erster Linie von der Temperatur selbst bestimmt. Die Auswirkungen der Driftprozesse resultieren in einer Veränderung der Thermospannung oder des Widerstandes. Die Werte der Thermospannung und des Widerstandes, die in der Grundwerttabelle oder Grundwertreihe für den idealen Temperaturfühler definiert sind, verändern sich mit der Einsatzdauer des Fühlers kontinuierlich.

Die Ursachen lassen sich grob in zwei Gruppen unterteilen:

- Drift, verursacht durch mechanische Beschädigungen der Temperaturfühlerkonstruktion oder des Sensorelementes,
- Drift, verursacht durch metallurgische Veränderung des Sensorwerkstoffes.

Dabei ist davon auszugehen, dass mechanische Beschädigungen fast immer auch der Auslöser für metallurgische Veränderungen des Sensorwerkstoffes sind.

3.5.1 Driftmechanismen bei Thermoelementen

K-Zustand (Nahordnungseffekt)

Dieser Effekt ist kein eigentlicher Drifteffekt, da seine Auswirkung durch gezielte Temperaturbehandlung des Temperaturfühlers wieder beseitigt werden kann. Sein messtechnischer Einfluss ist aber weitgehend mit den Merkmalen der Drift identisch. Da das Thermopaar vom Typ K (NiCr-Ni) noch immer das am häufigsten verwendete Thermoelement ist, viele Anwender von der Problematik des K-Zustandes aber keine Kenntnis besitzen, wird an dieser Stelle detaillierter auf dieses Phänomen eingegangen. Die NiCr-Schenkel der Thermopaare K (NiCr-Ni) und E (NiCr-CuNi) zeigen einen besonderen Effekt, der bei schnellem Abkühlen der Thermodrähte aus Temperaturbereichen oberhalb 400...600 °C eine (im wesentlichen undefinierte) Veränderung der Thermospannung verursacht.

Dieser Effekt, oft auch als Nahordnungseffekt bezeichnet, beeinflusst die Ordnungszustände der einzelnen Gitterbausteine und wird umgangssprachlich K-Effekt oder K-Zustand genannt. Fast alle Metalle mit technischer Bedeutung, erstarren entweder in der Form des kubisch flächenzentrierten (Nickel), des kubisch raumzentrierten (Chrom) oder des hexagonalen Gitters (Zink). Darüber hinaus kommen noch besondere Erstarrungsformen wie tetragonale, rhomboedrische u. a. Gitteranordnungen vor.

Handelt es sich um ein ideal reines Metall, so werden im Erstarrungsvorgang alle Gitterplätze durch Atome des gleichen Elementes besetzt. Bei der für Thermoelemente wichtigen NiCr-Legierung, die im kubisch flächenzentrierten Gitter erstarrt (Bild 3-56), werden die Gitterplätze durch Atome der einzelnen Legierungsbestandteile (Nickel und Chrom) besetzt (Mischkristall). Submikroskopisch gesehen erstarrt die Schmelze in ihrem Gittergefüge so, dass das Verhältnis der einzelnen Elementatome der Stöchiometrie der Legierungszusammensetzung entspricht.

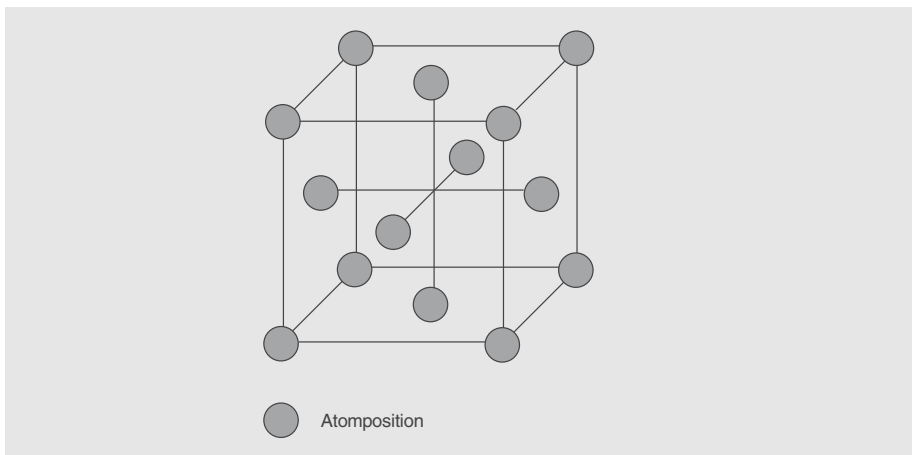


Bild 3-56: Das kubisch flächenzentrierte Kristallgitter

Betrachtet man die atomare Feinstruktur eines NiCr-Kristalles jedoch genauer, so hängt die sich einstellende Gitterbesetzung des einzelnen Kristalls durch Ni- oder Cr-Atome auch von der Geschwindigkeit der Abkühlung ab. Geht man bei der Betrachtung von einer NiCr-Legierung aus, die sich auf einer Temperatur oberhalb 600 °C befindet, so stellt sich durch Diffusion der Atome eine Kristallstruktur ein, die einem kubisch flächenzentrierten Gitter entspricht, bei dem die Eckatome des „Kristalls“ durch Chrom gebildet werden, die Zentralatome der einzelnen Flächen durch Nickel. Betrachtet man diese Anordnung aus einer Blickrichtung senkrecht zu einer der Würfelflächen, so ergibt sich für die Positionierung der Ni- und Cr-Atome das nachfolgende Bild.

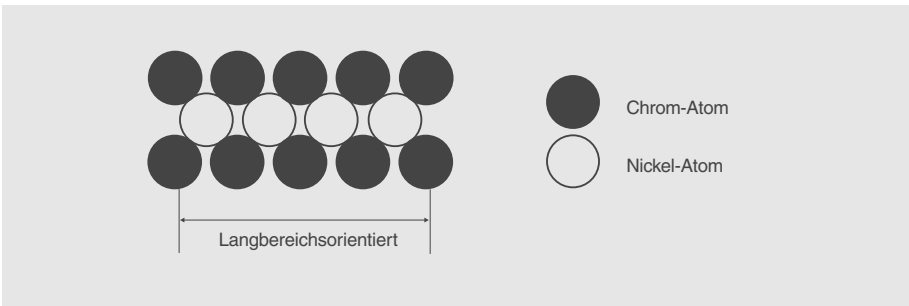


Bild 3-57: Die langbereichsorientierte Anordnung von Ni- und Cr-Atomen (bei Temperaturen $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Liegt der NiCr-Schenkel eines Thermopaars vom Typ K in der langbereichsorientierten Form (U-Zustand) vor (immer bei Temperaturen $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$), so erzeugt er eine reproduzierbare Thermospannung. Lässt man diesen NiCr-Schenkel langsam ($< 100\text{ K/h}$) auf Temperaturen $< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ abkühlen, so stellt sich eine Atomanordnung ein, die als kurzbereichsorientiert bezeichnet wird (K-Zustand) (Bild 3-58). In dieser Anordnung findet sich das typische Merkmal der Langbereichsorientierung (Cr-Atome an den Ecken, Ni-Atome im Zentrum der Flächen) in kleinen Abschnitten des Gitters wieder, unterbrochen auch von „gestörten“ Gitterbereichen.

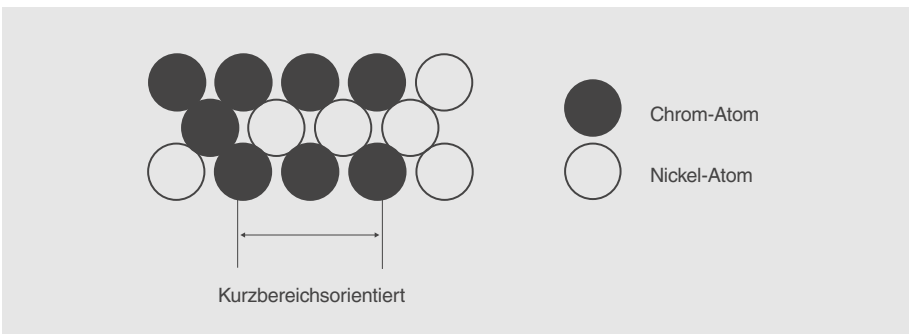


Bild 3-58: Die kurzbereichsorientierte Anordnung von Ni- und Cr-Atomen

Auch diese Gitterstruktur erzeugt eine reproduzierbare Thermospannung. Erfolgt dagegen die Abkühlung aus Temperaturen $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ sehr schnell, so haben die Atome keine ausreichende Zeit zur Verfügung, um von der langbereichsorientierten Anordnung definiert in die kurzbereichsorientierte Anordnung zu wechseln. Das Ergebnis ist eine Mischanordnung zwischen den beiden beschriebenen Ordnungszuständen in einem beliebigen Ordnungsverhältnis, die einen ungeordneten Zustand darstellt (Bild 3-59). Dabei ist die Positionierung der Ni- und Cr-Atome in beliebigen Anordnungen

zueinander möglich, abhängig nur von der Ausgangstemperatur und dem zeitlichen Profil der Abkühlung.

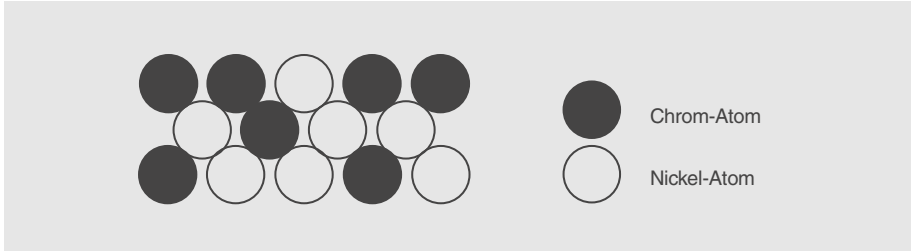


Bild 3-59: Der ungeordnete Zustand

Lässt man einen NiCr-Schenkel, der sich durch schnelles Abkühlen in der ungeordneten Atomstruktur befindet, längere Zeit bei Temperaturen $< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen, so stellt sich durch thermische Diffusion der Atome ganz langsam der kurzbereichsorientierte Zustand wieder ein. Im ungeordneten Zustand und in der Übergangsphase zum kurzbereichsorientierten Zustand verändert sich aber die Thermospannung, die durch diesen Thermoschenkel generiert wird. Dabei kann die Veränderung der Thermospannung bis zu 5 K betragen und somit das Messergebnis deutlich verfälschen. Für die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der generierten Thermospannung und somit für die Eignung als Mess- und Regelgröße, ist der Auslieferungszustand eines Typ K-Thermoelementes von entscheidender Bedeutung.

Der letzte Arbeitsschritt bei der Herstellung von Thermoelementen oder mineralisierten Mantel-Thermoelementleitungen ist immer eine Glühung oberhalb $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, die die beim Ziehen entstandenen Kaltverfestigungen des Werkstoffes abbaut. Der NiCr-Schenkel liegt daher im langbereichsorientierten Zustand vor. Anschließend erfolgt ein rasches Abkühlen, um z. B. die Schweißbarkeit des Mantelwerkstoffes von mineralisierten Mantel-Thermoelementleitungen nicht negativ zu beeinflussen. Dabei stellt sich im NiCr-Schenkel der beschriebene undefinierte Übergangszustand zwischen K und U ein. Bei der Auslieferung eines Thermoelementes im Übergangszustand wird sich an der Messstelle sehr schnell der K-Zustand einstellen, vorausgesetzt die Messstellentemperatur ist $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Im Temperaturgradienten zwischen dem heißen und dem kalten Ende erfolgt dann, quasi schleichend, der langsame Übergang zum U-Zustand. Eine sich kontinuierlich verändernde Thermospannung, die sich erst nach Abschluss des Umwandlungsvorgangs stabilisiert, ist das Ergebnis. Sie kann sich von der Thermospannung des Thermopaars im Auslieferungszustand deutlich unterscheiden. Nur bei Thermoelementen, die im „eingestellten“ K-Zustand ausgeliefert werden (dies erfolgt durch eine aufwändige zweite Schlusssglühung mit langsamer, definierter Abkühlung unter Schutzgas), ist sofort eine stabile Temperaturanzeige gegeben. Zu berücksichtigen ist auch, dass sich der Ordnungszustand des NiCr-Schenkels, und somit die in ihm

erzeugte Thermospannung, im Temperaturbereich zwischen 250 °C und 600 °C relativ undefiniert einstellt. Das macht die Verwendung des Typ K-Thermopaars für Messungen unter schnellen Temperaturwechselbedingungen im genannten Temperaturbereich nur eingeschränkt möglich, da sich die Thermospannungsveränderungen, die sich aus den dann stattfindenden Kristallumwandlungsprozessen ergeben, als eine Art Signalhysterese darstellen.

Abhilfe schafft hier das Legieren beider Schenkel mit geringen Anteilen von Silizium (im Thermopaar Typ N, NiCrSi-NiSi), wodurch die Auswirkungen des Nahordnungseffektes deutlich reduziert werden und vom messtechnischen Standpunkt aus gesehen praktisch zum Verschwinden gebracht werden können. Allerdings hält der Ersatz von Typ K-Thermoelementen durch Typ N-Thermoelemente bisher nur langsam Einzug in die technischen Anwendungen.

Grünfäule (selektive Oxidation des Cr)

Grünfäule ist eine Erscheinung, die bei der Anwendung von NiCr-Legierungen (typisch im Thermopaar Typ K) unter sauerstoffarmer, neutraler oder reduzierender Atmosphäre, in Verbindung mit Feuchtigkeit auftritt. Dabei entsteht im Temperaturbereich zwischen 800 °C und 1000 °C eine selektive Chromoxydation im NiCr-Schenkel. Unter den beschriebenen Bedingungen kann sich, wie bei ausreichendem Sauerstoffüberschuss möglich, keine stabilisierende geschlossene Haut aus Nickeloxyd bilden. Der Leiter verarmt an Chrom, die Legierungszusammensetzung verändert sich, die Thermospannung verringert sich dramatisch. Die Thermospannung eines durch Grünfäule geschädigten Thermoelementes entspricht der Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur an der Stelle an der keine Drahtschädigung mehr vorliegt, und der Vergleichsstelle. Die Messstelle ist somit quasi von der Spitze des Thermoelementes nach „hinten“ gewandert. Durch Grünfäulebefall verursachte Messfehler können durchaus bis zu einigen 100 °C betragen. Der Ni-Schenkel wird von der Grünfäule nicht befallen.

Radioaktive Bestrahlung

Von den Anteilen radioaktiver Bestrahlung haben α - und β -Strahlung praktisch keine Auswirkung auf das Ausgangssignal eines Thermoelementes. Die γ -Strahlung dagegen sorgt für eine Erwärmung der Messstelle und kann je nach Intensität und bestrahltem Volumen Messfehler von einigen hundert Grad verursachen. Thermische Neutronenstrahlung hingegen verändert das Thermomaterial selbst. Abhängig vom Wirkungsquerschnitt des Werkstoffes werden Neutronen eingefangen. Der nachfolgende radioaktive Zerfall bewirkt über verschiedene Zwischenstufen eine Umwandlung in andere Elemente mit anderen Thermoeigenschaften. Art und Dauer der Umwandlung hängen von der eingestrahlten Dosis ab. Stoffe mit kleinem Absorptionsquerschnitt erfahren nur geringe Änderungen, Stoffe mit großer Absorption verändern sich rasch und wandeln sich völlig um.

Folgende Effekte treten bei den wichtigsten Thermomaterialien auf:

- Rhodium besitzt einen hohen Absorptionsquerschnitt und wird innerhalb kurzer Betriebszeit umgewandelt.
Thermoelemente der Typen R, S und B sind daher für die Anwendung unter Neutronenbestrahlung ungeeignet.
- Wolfram-Rhenium-Thermopaare erfahren in beiden Thermoschenkeln Veränderungen, Messfehler bis zu 15 % sind möglich.
- Nickel-Chrom-Draht wird ebenfalls umgewandelt. Im Gefüge wird Eisen und Kupfer angereichert, es verarmt an Kobalt und Mangan.
- Nickel- oder Pt-Draht erfährt praktisch keine Veränderung.
- Im Isolationswerkstoff von mineralisierten Mantelthermoelementen kommt es zu einer Reduzierung des Isolationswiderstandes. Ein kontinuierlich wachsender Fehlereinfluss ist die Folge.

Verunreinigung der Ausgangslegierungen von Thermoelementwerkstoffen

Damit Thermopaare die Thermospannung abgeben, die in der zugrundeliegenden Norm als Grundwerte definiert sind, müssen die Schenkel des Thermopaars bezüglich ihrer Legierungszusammensetzung äußerst exakten Vorgaben entsprechen. Die durch ein Thermopaar generierte Thermospannung reagiert sehr empfindlich auf geringfügige Veränderungen der Legierungszusammensetzung und somit auf eventuell vorhandene Spuren von Fremdmaterialien. Die Thermospannung reagiert auf das Vorhandensein von Fremdstoffen dabei so empfindlich, dass Werkstoffe, die spektralanalytisch untersucht wurden und dabei (im Rahmen der möglichen Auflösung) nominell gleiche Legierungszusammensetzungen ergaben, durchaus unterschiedliche Thermospannungen erzeugen können.

Die folgende Tabelle zeigt den Einfluss von typischen Verunreinigungen auf die Thermospannung eines Drahtes aus reinem Platin (Reinheit > 99,99 %).

Element	dU_{th} ($\mu V/ppm$)
Fe	2,30
Ni	0,50
Ir	0,35
Mn	0,32
Rh	0,20
Cu	0,12
Pd	0,07
Ag	0,03
Au	-0,07
Pb	3,00
Cr	4,04

Tab. 3-23: Einfluss von Verunreinigungen auf die Thermospannung (dU_{th}) von Platin

Ob ein Werkstoff für die Verwendung als Thermoelementmaterial brauchbar ist, zeigt sich in der Regel erst, nachdem daraus ein Thermoelement hergestellt und durch Kalibrierung überprüft wurde. Fremdmaterialien können aber nicht nur während der Herstellung des Thermomaterials aus der Schmelze in den Thermowerkstoff eindringen. Auch während der Herstellung bzw. der Weiterverarbeitung des Thermodrahtes kann ein ursprünglich „brauchbares“ Material durch Fremdstoffe noch „unbrauchbar“ werden. Die größte Veränderung erfahren die Thermodrähte eines Thermoelementes aber während ihrer Einsatzdauer. Diese Veränderung erfolgt durch die Eindiffusion von Fremdstoffen, resultierend aus der unmittelbaren Umgebungsatmosphäre und den darin vorhandenen Materialien. Der bestimmende Beschleunigungsfaktor für diesen Diffusionsprozess ist die Temperatur selbst. Bei ungünstigen Einsatzbedingungen in Verbindung mit hohen Temperaturen wird von einer regelrechten „Vergiftung“ des Thermomaterials gesprochen. Dies gilt ganz besonders für Edelmetall-Thermopaare aus Platin.

Die am häufigsten auftretenden Fälle von Verunreinigungen:

- Reine Materialien wie Kupfer, Eisen und Platin erfahren ihren Alterungseffekt bevorzugt durch das Eindiffundieren von Fremdatomen
- Typische Platingifte sind Silizium und Phosphor, die oberhalb 1000 °C beschleunigt eindiffundieren. Dabei erfolgt eine Beschleunigung des Effekts aufgrund der katalytischen Wirkung des Platins. Silizium legiert Platin rasch zu einer eutektischen, spröden Legierung, die bereits bei 1340 °C schmilzt und schon nach wenigen Minuten zum Ausfall des Thermoelementes führen kann. Hier ist es zwingend erforderlich, als Isolationswerkstoff nur hochreines Aluminiumoxid (Al_2O_3) zu verwenden, welches nur noch geringste Spuren von Restsilizium enthält.
- Beim Einsatz von Pt-Thermopaaren wandert Rhodium langsam über den Schweißpunkt in den Pt-Schenkel ein und vergrößert oder verschmiert den Messpunkt. Dies führt zu Messfehlern, sobald die Veränderung Bereiche von Temperaturgradienten erreicht.
- Bei Legierungen wie CuNi, NiCr oder PtRh sind zu Beginn des Einsatzes Anfangsdriften festzustellen, die auf das Ausheilen der herstellungsbedingten Gefügespannungen zurückzuführen sind. Danach verlangsamt sich der Drifteffekt, kommt aber nicht völlig zum Stillstand.
- Bei NiCr-Schenkeln ist das Eindiffundieren vor allem von Schwefel bekannt, der in die Korngrenzen eindringt und das Material zerstört.
- NiCr-Ni-Thermoelemente zeigen bezüglich Verunreinigungen über längere Zeit ein vergleichsweise geringes Alterungsverhalten, weil die einzelnen Schenkel in die gleiche Richtung driften und die Drift sich thermopaarbezogen praktisch gegenseitig aufhebt (Bild 3-60).

- Durch die Verwendung von geeigneten Isolationskeramiken und Mantelwerkstoffen bei mineralisolierten Mantelleitungen kann beim Thermoelement Typ K eine Oberflächenoxidation (gewollte Voralterung) der Drähte erreicht werden. Diese schützende Oxidhülle kann eine Vervielfachung der Standzeit bewirken (Bild 3-61).

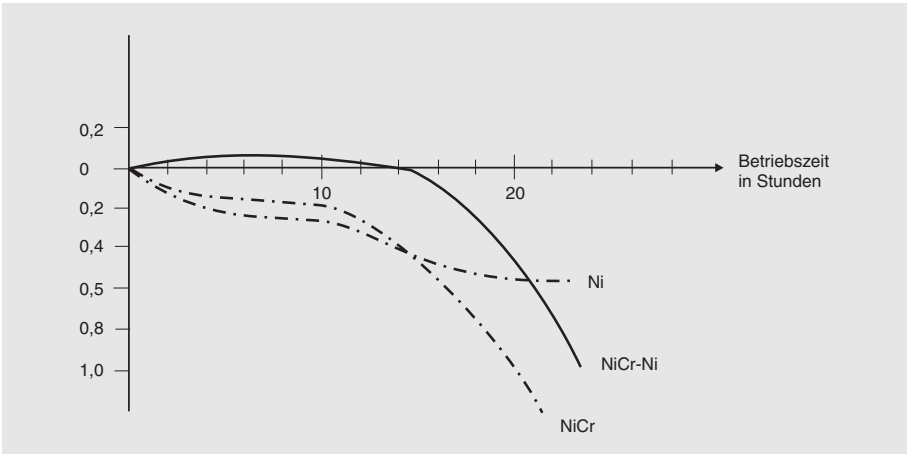


Bild 3-60: Typische Alterung von NiCr-Ni-Thermopaaren bei 1200 °C

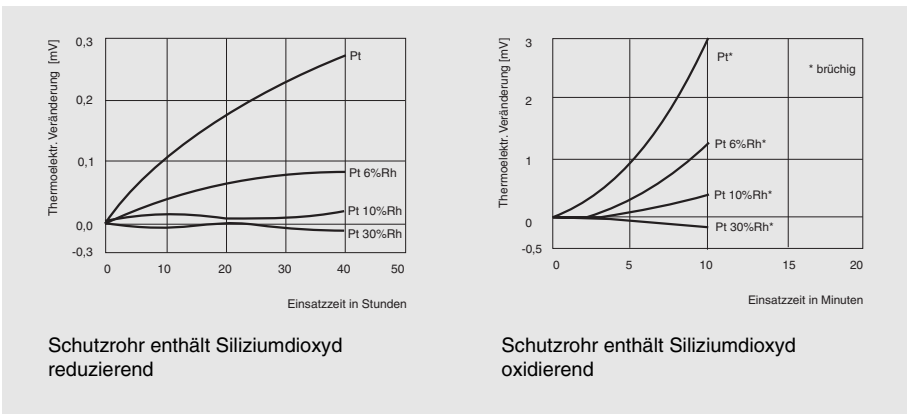


Bild 3-61: Alterungsverhalten von Platin-Thermopaaren im SiO_2 -haltigen Schutzrohr in reduzierender und oxydierender Atmosphäre

Werkstoff	Eigenschaften				
	Anteil Al_2O_3 in %	Dichte in g/cm^3	Temperaturwechselbeständigkeit	Max. Arbeitstemperatur in $^\circ\text{C}$	Elektrischer Widerstand in Ω / cm
Alsint 99,7 ¹⁾³⁾	99,7	3,80...3,93	gut	1700	10^{14}
Pythagoras 1800 ¹⁾³⁾	76	3,10	sehr gut	1600	10^{13}
Pythagoras ¹⁾³⁾	60	2,60	gut	1400	10^{13}
Silimantini 60 ¹⁾	73...75	2,35	sehr gut	1350	keine Angabe
Degussit Al23 ²⁾³⁾	99,5...99,7	3,7...3,95	gut	1950	10^{14} (RT)
Degussit Al24 ²⁾	99,5...99,7	3,4...3,6	sehr gut	1950	10^7 (1000 $^\circ\text{C}$)
Degussit Al25 ²⁾	99,5...99,7	2,8...3,1	sehr gut	1950	10^4 (1500 $^\circ\text{C}$)
¹⁾ Handelsname der Firma Haldenwanger ²⁾ Handelsname der Firma Friatec (ehemals Friedrichsfeld) ³⁾ Gasdichte Werkstoffe (alle anderen Werkstoffe sind mehr oder minder porös)					

Tab. 3-24: Eigenschaften von Isolationskeramikwerkstoffen

Veränderung der Thermospannung durch mechanische Verformung des Drahtes

Für die Bearbeitung metallischer Werkstoffe zur Herstellung von Thermoelementen ist es von großer Bedeutung, den Einfluss der Verformung auf die Thermokraft zu kennen. Hierzu wurden bereits früher umfangreiche Untersuchungen durchgeführt (Borelius, Tamman und Bandel). So besteht zwischen dem ziehharten und dem weichgeglühten Zustand eines Thermodrahtes ein Unterschied in der Thermokraft in der Größenordnung von ca. $1\mu\text{V/K}$. Dieser Effekt ist besonders bei Edelmetall-Thermopaaren zu berücksichtigen, da hier die auftretenden Thermokräfte von Natur aus klein sind, und sich durch den beschriebenen Effekt nennenswerte Messwertverfälschungen einstellen können. Auch das Tordieren (Verdrehen, Verdrillen) des Drahtes hat vergleichbare Auswirkungen.

Bildet man ein Thermopaar aus Drähten im ziehharten Zustand (Drähte, die keiner Rekristallisationsglühung unterzogen wurden), so wird sich über die Anwendungsdauer des Thermopaars eine nicht stabile Thermospannung einstellen, die auf die langsame Umwandlung des Drahtes vom harten in den weichgeglühten Zustand zurückzuführen ist. Bei der Herstellung von Thermoelementen, besonders aus Platin-Thermodraht, ist deshalb unbedingt darauf zu achten, dass der Draht vorher einer Stabilisierungsglühung (Weichglühung) unterzogen wird.

Auch mechanische Belastung des Thermodrahtes kann Störungen im Kristallgitteraufbau verursachen. So kann das Knicken des Drahtes über scharfe Kanten oder das mehrfache Biegen des Drahtes über sehr kleine Biegeradien, durchaus zu einer nennenswerten Veränderung der Thermospannung führen.

Veränderung der Thermospannung durch Grobkornbildung

Zu dünnem Draht gezogene metallische Werkstoffe zeigen bei längerer Anwendung in höheren Temperaturen den Effekt eines beschleunigten Korngrenzenwachstums. Dieses Wachstum führt zur Bildung immer größerer Körner, der sogenannten Grobkornbildung. Dies kann dazu führen, dass u. U. der gesamte Querschnitt eines dünnen Drahtes nur noch von sehr wenigen Körnern gebildet wird. Dadurch wird sowohl die mechanische Festigkeit des Drahtes deutlich reduziert, als auch seine Thermokraft verändert. Dieser Effekt wird vor allem bei den negativen Schenkeln der Thermopaare R und S beobachtet, die aus unlegiertem Platinwerkstoff bestehen. Aus diesem Grund sind manche Hersteller dazu übergegangen, Platin-Thermodraht auch in sogenannter Feinkornqualität anzubieten. Diesem Material sind spezielle Elemente zulegiert worden, die das Korngrenzenwachstum deutlich verlangsamen, ohne dabei die Thermospannung zu beeinflussen.

Änderung des Isolationswiderstandes

Temperaturfühler stellen im vereinfachten Ersatzschaltbild eine Schaltung aus einer Signalquelle und einem Netzwerk von Serien- sowie Parallelwiderständen dar (Bild 3-62). Die Serienwiderstände werden dabei im realen Temperaturfühler im wesentlichen durch die Widerstände der Zuleitungen und die Übergangswiderstände der Anschlussklemmen oder Steckkontakte gebildet. Die Parallelwiderstände resultieren aus dem nicht idealen Isolationsverhalten der verwendeten Isolationswerkstoffe, die zur elektrischen Isolierung der Kabel und Anschlussdrähte gegeneinander im Messeinsatz verwendet werden.

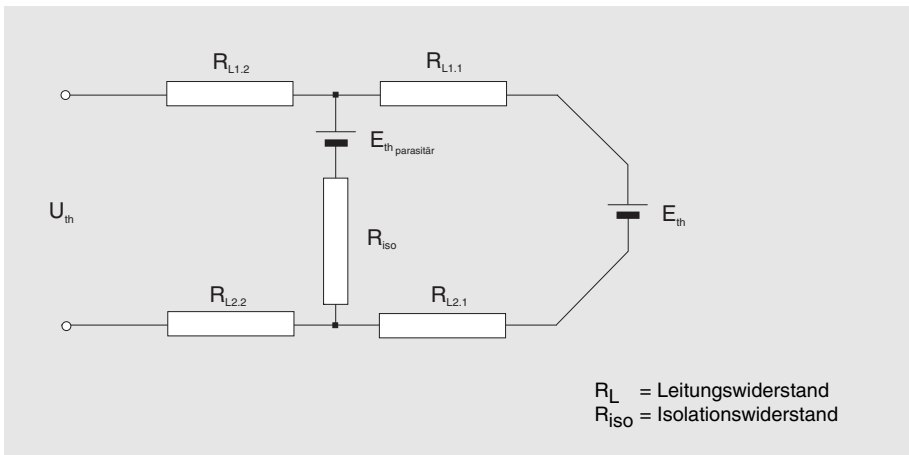


Bild 3-62: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Thermoelementes

Bei der Anwendung von Thermoelementen spielen veränderliche Serien-(Zuleitungs-)widerstände als Ursache für Alterungsprozesse nur eine untergeordnete Rolle, sofern sich diese nicht als Auswirkung einer sich fortsetzenden mechanischen Drahteinschnürung zeigen, die das Thermoelement durch Leiterbruch völlig außer Funktion setzen kann. Eine Verringerung des Isolationswiderstandes hingegen kann das Ausgangssignal eines Thermoelementes schwerwiegend verfälschen.

Die Reduzierung des Isolationwiderstandes kann dabei verschiedene Ursachen haben.

- Bei einfachen Thermoelementen, die aus isoliertem Thermodraht hergestellt werden, können die Isolationseigenschaften der Drahtisolierung bereits durch den einmaligen Einsatz bei überhöhten Temperaturen bleibend geschädigt und in ihrer Funktion unbrauchbar gemacht werden.
- Bei Thermoelementen, die als Messeinsatz unter Verwendung von mineralisierter Mantelleitung gefertigt sind, kann das Isolationsvermögen der verwendeten Isolierkeramik (Al_2O_3 oder MgO) durch eingedrungene und gebundene Feuchtigkeit im Keramikwerkstoff, stark eingeschränkt sein.

Die Feuchtigkeit kann schon bei der Fertigung der Produkte unbemerkt eindringen, z. B. wenn die verwendete mineralisierte Mantelleitung längere Zeit mit offenen Enden der normalen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt ist. Die verwendeten Keramikwerkstoffe sind stark hygroskopisch, und binden die Feuchtigkeit als Kristallwasser an sich. Aber auch während der Anwendungsdauer kann Feuchtigkeit nachträglich in ein Thermoelement eindringen, wenn dieses mechanisch beschädigt wird. Darüber hinaus nehmen die Isolationseigenschaften der genannten Materialien bei höheren Temperaturen von Natur aus stark ab (ca. um eine Zehnerpotenz/100 K), so dass bei Temperaturen im Bereich von 1000 °C und darüber, im eigentlichen Sinne nicht mehr von Isolatoren gesprochen werden kann.

Die Ursache dafür ist die mit hoher Temperatur zunehmende Ionen- und Elektronenleitfähigkeit aller keramischen Isolationsmaterialien. Eine deutliche Verringerung des Isolationswiderstandes führt aber unweigerlich zur Bildung von elektrischen Nebenschlüssen zwischen den einzelnen Schenkeln des Thermoelementes, wodurch die Signalquelle belastet und das Thermospannungssignal verfälscht wird.

Wesentlich kritischer wirken sich allerdings hier die sogenannten Nebenmessstellen (Sekundär-Messstellen) aus. Diese bilden sich, wenn die beiden Thermoschenkel eines Thermopaars über sich verringernde Isolationswiderstände eine elektrisch leitende Verbindung irgendwo innerhalb des Temperaturfühlers und somit eine weitere Messstelle bilden. Das Ausgangssignal des Thermoelementes ist dann eine Zusammensetzung aus den verschiedenen Thermospannungen, die an den unterschiedlichen Messstellen gebildet werden. Die Gefahr der Bildung von Nebenmessstellen ist dann besonders gegeben, wenn das Thermoelement von der eigentlichen Messstelle noch durch Bereiche geführt wird, in denen die Temperatur höher ist, als an der Messstelle selbst (Dampfkesselleitungen in Großkraftwerken, Bodenausmauerungen in Industrieöfen).

Das elektrische Isolationsvermögen ist selbstverständlich nicht nur vom verwendeten Isolationswerkstoff abhängig, sondern auch von der Geometrie (Durchmesser und Länge) der verwendeten Thermoelementkonstruktion. Daher ist es besonders bei sehr langen Thermoelementen, wie z. B. im Großkraftwerksbau, schwierig, hohe Isolationswiderstände zu realisieren. Für die Anwendung bei Temperaturen deutlich über 1000 °C ist der Einsatz von Thermoelementen aus mineralisolierter Mantelleitung nur noch eingeschränkt zu empfehlen. Hier ist die Verwendung von Thermoelementen zu bevorzugen, die in konventioneller Technik (Rohrausführung) aufgebaut sind. Die Isolationswerte der hier verwendeten Keramikkörper sind etwa um eine Zehnerpotenz höher, als die verwendeten weichen Isolationskeramiken der mineralisierten Mantelleitung. Dies liegt vorwiegend am unterschiedlichen Verdichtungsgrad der Werkstoffe.

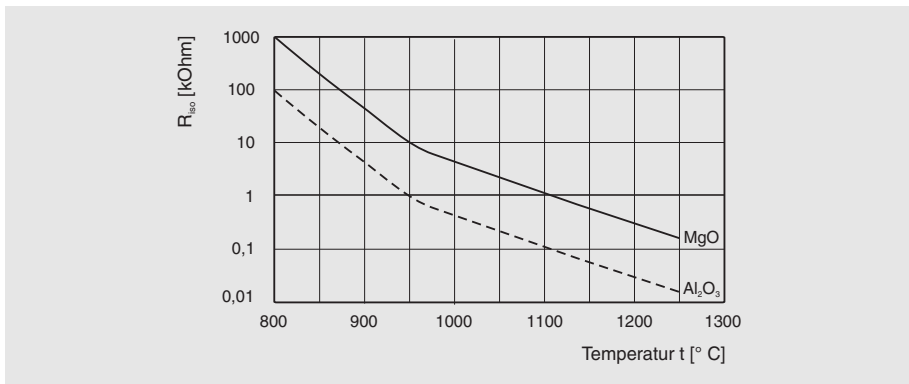


Bild 3-63: Abhängigkeit des Isolationswiderstandes von mineralisolierter Mantelleitung von der Einsatztemperatur

3.5.2 Driftmechanismen bei Widerstandsthermometern

Auswirkungen von Verunreinigungen auf den Temperaturkoeffizienten von Pt-Widerstandswerkstoffen

Wie bereits erwähnt ist für die Verwendung von Thermowerkstoffen ihre Reinheit bezüglich der geforderten Legierungszusammensetzung eine unabdingbare Voraussetzung. Der Platin-Widerstandsdraht für die Herstellung von Pt-Messwiderständen bildet hierbei keine Ausnahme.

Man unterscheidet grob zwischen zwei Anwendungsgruppen:

- Für die Herstellung von Temperaturfühlern, die die Forderungen der ITS 90 erfüllen sollen, wird Platin in spektral reiner Qualität benötigt. Temperaturfühler dieser Art dienen als Definitions- und Interpolationsinstrumente für die Realisierung der Internationalen Temperaturskala zwischen den Fixpunkten im Temperaturbereich von -189 °C (N₂-Punkt) bis 961 °C (Ag-Punkt).
- Für technische Widerstandsthermometer, wie sie in der EN 60751 definiert sind, wird physikalisch reines Platin verwendet, welches durch das gezielte Hinzulegieren von geeigneten Elementen auf den geforderten Temperaturkoeffizienten α „eingestellt“ wird.

Für diesen Temperaturkoeffizient (er entspricht der linearisierten Temperaturabhängigkeit des Materials im Temperaturbereich zwischen 0...100 °C) errechnet sich aus den Grundwerten der EN 60751 ein Wert von $3,8506 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Verunreinigungen, die bei der Herstellung oder während der Einsatzdauer des Temperaturfühlers ins Platin eindringen, verändern die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes und somit dessen Temperaturkoeffizient. Damit ergibt sich eine Abweichung von der Standard-Grundwertreihe. Der Widerstandsdraht wird quasi fortschreitend „vergiftet“. Die Folge ist ein Driften des Fühlers.

Ein typisches Problem, welches ebenfalls zur Vergiftung von Platin-Widerstandsdraht führt, ist das Eindiffundieren von Fremdstoffen aus dem Schutzrohrwerkstoff, oder aus den Mantelwerkstoffen der verwendeten mineralisierten Mantelleitung. Dieser Diffusionsvorgang findet bei niedrigeren Temperaturen praktisch nicht oder nur sehr langsam statt, nimmt aber besonders bei höheren Temperaturen in seiner Geschwindigkeit dramatisch zu. Metallische Schutzrohre aus Edelstahl sollten für Widerstandsthermometer hoher Temperaturstabilität darum nicht verwendet werden, wenn deren Einsatz über längere Zeit bei Temperaturen oberhalb von ca. 420 °C vorgesehen ist. Für den längeren Einsatz oberhalb der genannten Temperatur sind Schutzrohrwerkstoffe wie Quarzglas, hochreine Keramik oder mineralisierte Mantelleitung mit Platinmantel zu verwenden.

Ein typisches Kennzeichen für die auf Vergiftung des Widerstandswerkstoffes zurückzuführende Alterung, ist ein Ansteigen des R_0 -Wertes, begleitet von einem Abfallen des α -Wertes.

Die nachfolgende Tabelle zeigt den Einfluss von Verunreinigungen auf den α -Wert von physikalisch reinem Platin.

Element	$d\alpha \text{ (ppm}^{-1}\text{)}$
Fe	$-1,28 \times 10^{-6}$
Ni	$-0,16 \times 10^{-6}$
Ir	$-0,20 \times 10^{-6}$
Mn	$-0,21 \times 10^{-6}$
Rh	$-0,09 \times 10^{-6}$
Cu	$-0,35 \times 10^{-6}$
Pd	$-0,10 \times 10^{-6}$
Ag	$-0,15 \times 10^{-6}$
Au	$-0,07 \times 10^{-6}$
Pb	$-0,90 \times 10^{-6}$
Cr	$-3,25 \times 10^{-6}$

Tab. 3-25: Einfluss von Verunreinigungen auf den Temperaturkoeffizienten (α) von Platin

Drifteffekte aufgrund mechanischer Belastung des Sensorelementes im Einsatz

Nicht nur die Veränderung der chemischen Zusammensetzung des Widerstandswerkstoffes durch Fremdstoffdiffusion kann Ursache für instabile Temperaturfühler sein, auch mechanische Belastungen des Sensorelementes oder der gesamten Konstruktion können zu Veränderungen der Widerstandswerte führen. Mechanische Dauerschwingungen, besonders in Kombination mit höheren Einsatztemperaturen, setzen hier dem Temperaturfühler am deutlichsten zu. Es gibt zwei Effekte, die durch die beschriebene Belastung ausgelöst werden können.

So kann bei der Verwendung drahtgewickelter Messwiderstände (wire wound), bei denen die Messwicklung nicht schwingungsfest im Trägerkörper fixiert ist, der Kurzschluss zwischen einzelnen Wicklungen auftreten, woraus eine sprunghafte Reduzierung des R_0 -Widerstandswertes resultiert.

Das Sensorelement kann durch die Schwingungsbeaufschlagung starke Belastungen an den Anschlussbeinchen und der Verbindungsstelle zur Drahtverlängerung erfahren, die zur Einschnürung des Drahtquerschnittes führen. Im Extremfall können die Anschlussbeinchen abreißen. Ein vergleichbarer Effekt kann auch auftreten, wenn Widerstandsthermometer kontinuierlich starken Temperaturwechseln ausgesetzt sind und keine temperaturwechselstabile Konstruktion vorliegt. Hier arbeitet das Sensorelement bei zu geringer Passungstoleranz, aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen der verarbeiteten Werkstoffe, ständig auf Zug und Druck (Wechselbelastung) gegen die Anschlussdrähte.

Änderung der Zuleitungswiderstände

Bei Widerstandsthermometern in 2-Leiterschaltung ist der Zuleitungswiderstand ein direkter Anteil des Messwertes. Zur Korrektur des gemessenen Widerstandswertes auf den eigentlichen temperaturabhängigen Wert des Messwiderstandes, wird der Zuleitungswiderstand meist auf dem Temperaturfühler angegeben und kann durch den Anwender korrigierend mit dem Messwert verrechnet werden. Der Zuleitungswiderstand kann durch den Hersteller berücksichtigt werden, indem ein geeigneter Messwiderstand mit Untertoleranz (negative Istwertabweichung vom Sollwert) verwendet wird.

Ändert sich im Laufe der Anwendung des Temperaturfühlers allerdings der Widerstandswert der Zuleitung (z. B. durch Querschnittsveränderung der Drähte, oder Oxydation an Anschlussstellen u. ä.), so tritt diese Abweichung als driftende Messwertverfälschung auf, bleibt aber oftmals unbemerkt. Bei Widerstandsthermometern in 3- und 4-Leiterschaltung wird dieser Effekt messtechnisch kompensiert.

Werkstoff	R_{20} d = 0,6 mm in Ω/m	R_t/R_0 bei 400 °C	Messfehler bei 400 °C für d = 0,6 mm, 1 m lang	
			nicht abgeglichen	abgeglichen
Cu	0,06	2,75	0,48 K	0,3 K
Ag	0,06	2.70	0,47 K	0,29 K
NiCr	2,48	1,086	7,8 K	0,62 K
CuNi	1,77	0,996	5,1 K	0,02 K

Tab. 3-26: Messfehler durch Zuleitungswiderstände

Leiterwerkstoff	Außendurchmesser d in mm	Anzahl der Leiter	R/l in Ω/m
Cu	3	2	0,111
Cu	3	4	0,107
Cu	4,5	4	0,045
Cu	6	2	0,027
Cu	6	4	0,027
Cu	6	6	0,052

Tab. 3-27: Leiterwiderstände von Cu-mineralisolierter Mantelleitung bei Raumtemperatur

Änderung des Isolationswiderstandes

Widerstandsthermometer sind in ihrem Aufbau weitgehend vergleichbar mit Thermoelementen. Auch werden vergleichbare Werkstoffe und Materialien verwendet. Das elektrische Isolationsvermögen der verwendeten Isolationswerkstoffe kann sich aus verschiedenen Gründen im Einsatzbereich des Widerstandsthermometers verändern. Dies führt zur Bildung von parasitären Nebenschlüssen, die sich im Ersatzschaltbild als Parallelwiderstände zum eigentlichen Sensorwiderstand zeigen. Elektrisch gesehen wirken diese als Spannungsteiler.

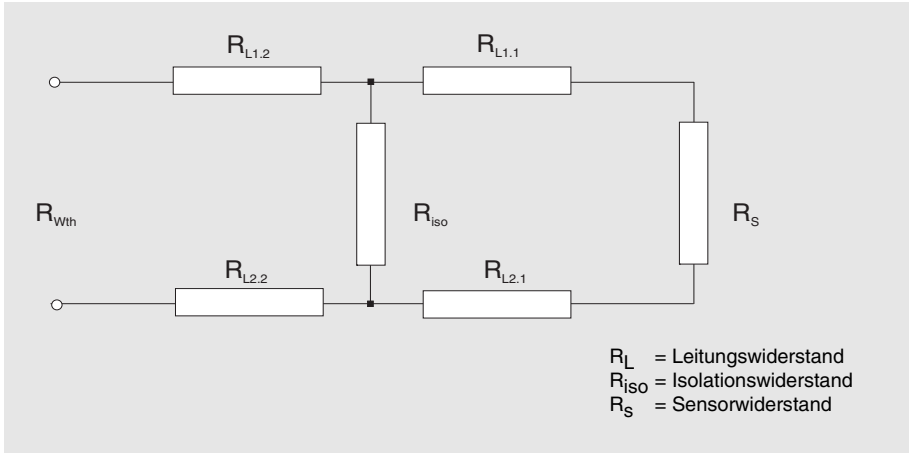


Bild 3-64: Elektrisches Ersatzschaltbild eines realen Widerstandsthermometers

Der resultierende Ableit-(Quer-)strom verfälscht das Messsignal zu niedrigen Werten hin. Der Einfluss eines „schlechten“ Isolationswiderstandes wird mit höheren Nominalwiderständen des Sensors (z. B. Pt1000 Ω) immer größer. Für Widerstandsthermometer, die bei hohen Temperaturen eingesetzt werden sollen, ist es in besonderen Fällen günstiger, auf R_0 -Widerstandswerte von 25 Ω oder 10 Ω auszuweichen.

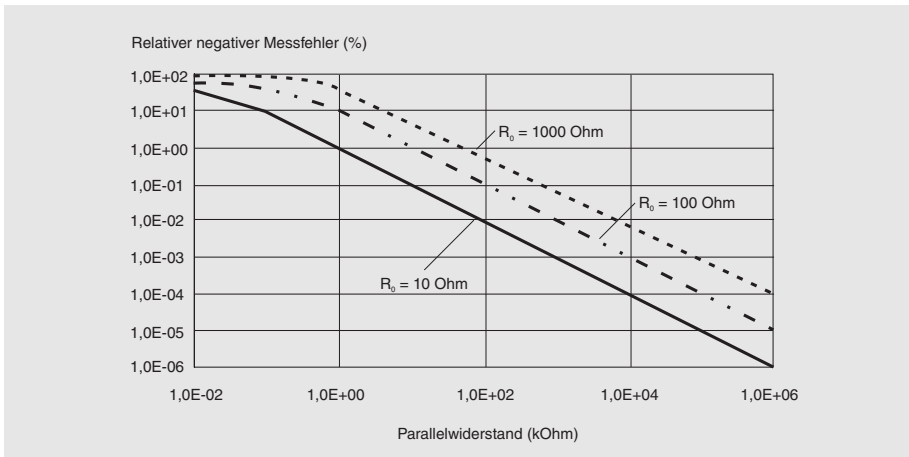


Bild 3-65: Relativer negativer Messfehler, verursacht durch Parallelwiderstand, resultierend aus nicht optimaler Isolation.

Es sei an dieser Stelle mit Nachdruck darauf hingewiesen, dass die regelmäßige Überprüfung des Isolationswiderstandes während der Einsatzdauer, besonders bei hohen Temperaturanwendungen, eine der wichtigsten qualitätssichernden Maßnahmen bei Widerstandsthermometern darstellt. Zumal die Bestimmung des R_{is} mit geringem Aufwand auch unter Einsatzbedingungen möglich ist. Die Forderungen der DIN EN 60751 bezüglich des einzuhaltenden Isolationswiderstandes sind hier wirklich nur als Minimalforderungen anzusehen. Ein Abfall des Isolationswiderstandes kann auf einen Riss hindeuten, durch den nicht nur Feuchtigkeit, sondern auch Schadstoffe eingedrungen sein können, die eine Veränderung der Charakteristik verursachen.

3.6 Fehlermöglichkeiten und Fehlerbeseitigung

Allgemeines

Im Folgenden werden die häufigsten Fehler und Möglichkeiten zu deren Behebung dargestellt. Die Aufstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Angaben beziehen sich nur auf die Temperaturfühler und die Zuleitungen. Auf die nachgeschaltete Instrumentierung wird hier nur insoweit eingegangen, als aus deren Prüfung Rückschlüsse auf die Funktion der Temperaturfühler gezogen werden können.

Schnellüberprüfung von Thermoelementen (TE) und Widerstandsthermometern (WTH) sowie den dazugehörigen Messkreisen im ausgebauten Zustand

- Erforderliche Instrumente:
Handmultimeter mit mV- und Ω -Bereich, Isolationsmesser mit 60...100 V = Spannung; alle Messungen bei Raumtemperatur.
- Bei Raumtemperatur wird Durchgang und Isolation geprüft; durch „Klopfen“ kann man Drahtbrüche feststellen.
- Ein TE ist unter Umständen als wesentlich in Ordnung zu betrachten, wenn $R < 20 \Omega$ ist (Draht $> 0,5 \text{ mm } \varnothing$); der Wert hängt vom Drahtquerschnitt und der Länge ab $R_{\text{iso}} \geq 100 \text{ M}\Omega$ (bei isolierten TP).
- Ein WTH ist als im wesentlichen in Ordnung zu betrachten, wenn $R \approx 110 \Omega$ (bei Pt100) $R_{\text{iso}} \geq 100 \text{ M}\Omega$.

Erwärmen der TE bzw. WTH, z. B. mit Gasflamme, auf ca. 200...400 °C (ohne Temperaturkontrolle) lässt weitere Rückschlüsse auf Unterbrechungen, Verpolungen (bei TE), zu niedrigen Isolationswiderstand, etc. zu.

Überprüfung im eingebauten Zustand

- **Zusätzlich** erforderliche Geräte:
mV-Quelle, Widerstandsdekade bzw. ein marktüblicher Pt100-Simulator
- TE: Zuleitung am Thermometer abklemmen; mit mV-Geber Thermospannung in den Messkreis einspeisen und Anzeige prüfen. Man kann feststellen, ob das TE oder der angeschlossene Messkreis fehlerhaft ist.
- WTH: Zuleitungen am Thermometer abklemmen; mit Widerstandsdekade den MW nachbilden, anschließen und Anzeige prüfen. Man kann feststellen, ob das WTH oder der angeschlossene Messkreis fehlerhaft ist.
- Weitere Prüfungen wie im vorherigen Absatz beschrieben.

Enthält das TE bzw. das WTH einen auswechselbaren Messeinsatz, diesen ausbauen und einen Prüf-Messeinsatz mit bekannten Werten einsetzen. Mit dieser Methode sind Rückschlüsse möglich, ob das Thermometer oder andere Komponenten des Messkreises die Ursache für den Messfehler sind.

Fehlertabelle für Thermoelemente und Widerstandsthermometer		
Fehler	Wahrscheinliche bzw. mögliche Ursache	Abhilfe
Störungen des Messsignals (keine stabile Anzeige)	a) elektrische/magnetische Einstreuungen	<ul style="list-style-type: none"> – galvanisch getrennten Messumformer einbauen – mindestens 0,5 m Abstand der Mess- zu Leistungsleitungen bei Parallelverlegung – elektrostatische Abschirmung durch an einem Punkt geerdete Folie/Geflecht – Verdrillen der Adern (Paare) gegen magnetische Einstreuungen – rechtwinklige Kreuzungen von Mess- mit störenden Leistungsleitungen
	b) Erdschleifen	<ul style="list-style-type: none"> – nur ein Erdungspunkt im Messkreis oder Messsystem „schwebend“ (nicht geerdet)
	c) Abnahme des Isolationswiderstandes	<ul style="list-style-type: none"> – Messeinsatz austauschen – Thermometer/Messeinsatz trocknen, da vermutlich Feuchte eingedrungen; ausheizen und neu versiegeln (nur beim Hersteller möglich)
Temperaturfühler reagiert zu langsam (Ansprechzeit), Fehlanzeigen	a) falscher Einbauort <ul style="list-style-type: none"> – im Strömungsschatten – Einfluss einer störenden Wärmequelle 	<ul style="list-style-type: none"> – Einbauort so wählen, dass das Medium seine Temperatur ungestört auf den Temperaturfühler übertragen kann und der Einfluss einer störenden Wärmequelle unterbunden wird
	b) falscher Einbau <ul style="list-style-type: none"> – zu geringe Eintauchtiefe – schlechte Wärme-kopplung – zu große Wärmeableitung z. B. über Halsrohr 	<ul style="list-style-type: none"> – Eintauchtiefe mindestens Thermoelement + $5 \times d$ (Flüssigkeiten) bis $20 \times d$ (Gase) (d = äußerer Schutzrohrdurchmesser) – Wärmekontakte, vor allem bei Oberflächenmessungen, durch passende Kontaktflächen und/oder Wärmeübertragungsmittel sicherstellen (z. B. Wärmeleitpaste, Oberfläche schleifen) – Einfluss reduzieren durch geeignete Wärmedämmung (Isolation)
	c) Schutzrohr zu dick	<ul style="list-style-type: none"> – Verfahrenstechnisch kleinstmögliches Schutzrohr wählen; Ansprechzeit in erster Näherung proportional dem Querschnitt bzw. Volumen des Thermometers, abhängig von Wärmeübergangszahlen und Luftspalten im Aufbau. Letztere mit Kontaktmittel (Öle, Fette) füllen (wenn möglich)
	d) Ablagerungen auf dem Schutzrohr (mit thermisch isolierender Wirkung)	<ul style="list-style-type: none"> – bei Inspektionen entfernen – wenn möglich, anderes Schutzrohr, andere Einbaustelle wählen

Fortsetzung: Fehlertabelle für Thermoelemente und Widerstandsthermometer		
Fehler	Wahrscheinliche bzw. mögliche Ursache	Abhilfe
Unterbrechungen im Temperaturfühler	a) Vibrationen	<ul style="list-style-type: none"> – verstärkte Federn beim Messeinsatz – Verkürzung der Einbaulänge – Verlegung der Messstelle (wenn möglich) – Spezialkonstruktion von Messeinsatz und Schutzrohr
	b) Thermischer Schock	– temperaturwechselbeständigen Temperaturfühleraufbau wählen
Stark korrodiertes oder abressiv abgetragenes Schutzrohr	– falsches Schutzrohrmaterial gewählt	– defektes Schutzrohr analysieren und besser geeigneten Werkstoff wählen; zusätzlichen Oberflächenschutz vorsehen (z. B. Bepanzerung oder exzentrisch geb. Schutzrohr, Prallstab)

Spezifische Fehlertabelle bei Thermoelementen

Fehler	Wahrscheinliche bzw. mögliche Ursache	Abhilfe
Zu niedrige Temperaturanzeige bei sehr dünnem Thermoelement	Instrument mit niedrigem Eingangs- bzw. Innenwiderstand, hoher Zuleitungswiderstand	<ul style="list-style-type: none"> – Leitungsabgleich – Instrument mit hohem Eingangs-widerstand wählen
Schwankende Temperaturanzeige bei sonst einwandfreiem Messkreis-aufbau	<ul style="list-style-type: none"> – Vergleichsstellen-Temperatur bzw. elektrische Simulation nicht konstant (thermisch/elektrische Vergleichsstelle) 	<ul style="list-style-type: none"> – Vergleichsstellen-Temperatur bzw. Vergleichsstellensimulation muss konstant gehalten werden
Temperaturanzeige-fehler wird mit zunehmender Temperatur größer (Anzeige zu niedrig)	abnehmender Isolations-widerstand (wirkt als Nebenschluss, verringert EMK des Thermopaars)	<ul style="list-style-type: none"> – empfohlene Isolations-Widerstände bei 20 °C $\geq 100 \text{ M}\Omega$, bei 500 °C $\geq 2 \text{ M}\Omega$ – Austauschen des Thermoelement-Messeinsatzes, anschließend gegen Feuchte versiegeln
Starke Abweichungen der Temperatur-anzeige von den Tabellenwerten	<ul style="list-style-type: none"> – parasitäre Spannungen (Thermospannungen, galvanische Spannung) – falsche Material-kombinationen – falsche Linearisierung zugrunde gelegt – schlechte elektrische Kontakte 	<ul style="list-style-type: none"> – Thermopaare und Leitungen prüfen, ggf. austauschen
Starke Abweichungen der Temperatur-anzeige von den Tabellenwerten	<ul style="list-style-type: none"> – falsche Ausgleichs-leitung bzw. falsch gepolte Ausgleichs-leitung 	<ul style="list-style-type: none"> – prüfen, ob richtige Ausgleichsleitung richtig gepolt ist – Bei Verwendung von Ausgleichsleitung: Temperatur der Anschlussstellen max. 200 °C. Bei > 100 °C Anschlussstellen auf gleicher Temperatur.
Anzeige ändert sich im Laufe der Zeit	<ul style="list-style-type: none"> – chemische Einflüsse auf das Thermopaar, vor allem bei höheren Temperaturen 	<ul style="list-style-type: none"> – defektes Thermometer austauschen, evtl. durch geeignetes Thermopaar ersetzen (z. B. Grünfäule bei Typ K → Ersatz durch Typ N) – Messstelle wandert mit dem „gesunden“ Material in kältere Bereiche, evtl. Thermoelement tiefer eintauchen, Luftspülung einbauen (O₂-Zufuhr)
	<ul style="list-style-type: none"> – thermische Alterung des Thermopaars 	<ul style="list-style-type: none"> – größere Drahtstärke wählen, um den Alterungsprozess zu verzögern – In der Regel zeigt ein gealtertes Thermopaar niedrigere Temperaturen an als ein neues. Wichtige Messstellen regelmäßig überprüfen – regelmäßige Rekalibrierung

Fortsetzung: Spezifische Fehlertabelle bei Thermoelementen		
Fehler	Wahrscheinliche bzw. mögliche Ursache	Abhilfe
Anzeigedisplay zeigt Raumtemperatur an (Vergleichsstelle im Gerät)	– Leitungsbruch	– Durchgang überprüfen
Negative Temperaturanzeige	– Thermoelement falsch gepolt	– Thermoelement umpolen
Anzeige um 20...25 °C falsch	– Element vom Typ L als J linearisiert oder umgekehrt	– Linearisierung korrigieren
Anzeige, obwohl Temperaturfühler abgeklemmt	<ul style="list-style-type: none"> – Einkopplung von elektromagnetischen Störungen auf die Ausgleichsleitung – parasitäre galvanische Spannungen (Nebemessstelle) durch Feuchtigkeit in der Ausgleichsleitung 	– Ausgleichsleitung trocknen

Spezifische Fehlertabelle bei Widerstandsthermometern

Fehler	Wahrscheinliche bzw. mögliche Ursache	Abhilfe
Temperaturanzeige generell zu hoch	– nicht vernachlässigbare Leitungswiderstände zu hoch, nicht abgeglichen	wenn noch möglich: – Verkabelung mit größerem Querschnitt vornehmen – Leitungsabgleich – Verwendung von Fühlerkopfmessumformern – Umstellung auf 3- oder 4-Leiterschaltung – Zuleitung abkürzen
	– Eigenerwärmung durch zu hohen Messstrom	– geringeren Messstrom verwenden (empfohlen 1 mA)
Temperaturanzeige veränderlich mit schwankender Umgebungstemperatur	– Thermometer in 2-Leiterschaltung; die Leitung ist starken Temperaturänderungen ausgesetzt	– umstellen auf 3-Leiterschaltung, welche Temperatureinfluss der Umgebung weitgehend ausschaltet – umstellen auf 4-Leiterschaltung (Einfluss des Zuleitungswiderstandes wird vollständig eliminiert)
Temperaturanzeige- fehler wird mit zunehmender Temperatur größer (Anzeige zu niedrig)	abnehmender Isolationswiderstand, wirkt als Nebenschluss zum MW	– R_{iso} ca. 0,1 M Ω parallel 100 Ω ergibt einen Fehler in Größenordnung der Toleranzklasse B Empfohlen: R_{iso} bei 20 °C: ≥ 100 M Ω R_{iso} bei 500 °C: ≥ 2 M Ω (Mindestanforderung nach DIN EN 60751) – defektes Thermometer austauschen
Abweichungen der Temperaturanzeige von den Tabellenwerten (parasitäre und galvanische EMK's)	– schlechtes Leitungsmaterial, Verunreinigungen, Feuchte – Temperaturdifferenzen zwischen den Verbindungsstellen der Leitungsadern – Korrosion der Anschlussklemme im Anschlusskopf	– Installation überprüfen – Anschlussstellen thermisch isolieren (gleichmäßige Temperatur)
Anzeige ändert sich im Laufe der Zeit	– thermische Alterung (Drift des Messwiderstands)	– für Hochtemperaturen geeignete Konstruktion wählen – regelmäßige Rekalibrierung – ggfs. Austausch, falls erforderlich

4 Berührungslose Temperaturmessung im Feldeinsatz

4.1 Vorteile und Nutzen beim Einsatz der Infrarotmesstechnik

Ergänzend zur klassischen, berührenden Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern tritt immer häufiger die berührungslose Temperaturmessung mit Infrarot-Thermometern an deren Stelle.

Dabei ist die Infrarot-Messtechnik keine neue Erfindung – seit Jahrzehnten wird sie bereits erfolgreich in Industrie und Forschung eingesetzt – doch haben in jüngster Zeit eingeführte Innovationen die Kosten gesenkt, die Zuverlässigkeit erhöht und den Sensoren immer kleinere Abmessungen gegeben. All diese Faktoren haben die Infrarot-Technologie für neue Anwendergruppen und Einsatzgebiete interessant gemacht.

Vorteile der berührungslosen Temperaturmessung

- Schnelle Messmethode im ms-Bereich (dadurch Zeitersparnis) oder die Möglichkeit mehrerer aufeinanderfolgender Messungen, wodurch ein höherer Informationsgewinn erzielt wird (z. B. Temperaturfeldbestimmung).
- Messung ist an bewegten Objekten durchführbar (Bandprozesse, Walzen, usw.).
- Messung an gefährlichen oder schwer zugänglichen Stellen (Hochspannung führende Teile, große Messentfernung).
- Hohe Messtemperaturen über 1300 °C sind kein Problem. Dort haben Kontaktthermometer nur eine begrenzte Lebensdauer.
- Rückwirkungsfrei d. h. dem Messobjekt wird keine Energie entzogen, man nimmt keinen Einfluss auf das Messobjekt. Speziell bei schlechten Wärmeleitern wie Plastik und Holz ergibt sich damit eine hohe Messgenauigkeit und keine Verfälschung der Messwerte im Vergleich zur Berührung mit Kontaktthermometern.
- Keine mechanische Einwirkung auf die Oberfläche. Dadurch verschleißfrei, beispielsweise Lackoberflächen werden nicht zerkratzt bzw. es können weiche Oberflächen (geschäumte Materialien, Elastomere) gemessen werden. Verunreinigungen, speziell im hygienisch sterilen Bereich, sind ausgeschlossen.

Nachdem nun einige wesentliche Vorteile genannt sind, bleibt die Frage, was beim Einsatz von Infrarot-Thermometern zu beachten ist:

- Das Objekt muss optisch (infrarotoptisch) für das Infrarot-Thermometer sichtbar sein. Starker Staub oder Rauch beeinträchtigen die Messung sowie feste Hindernisse, z. B. geschlossene metallische Reaktionsgefäße, lassen im Inneren natürlich keine Messung zu.
- Die Optik des Messkopfes muss vor Staub und kondensierenden Flüssigkeiten geschützt werden.
- Es lassen sich in der Regel nur Oberflächentemperaturen messen, wobei die unterschiedlichen Abstrahlungseigenschaften verschiedener Werkstoffoberflächen beachtet werden müssen.

Zusammenfassung: Die Hauptvorteile sind Schnelligkeit, Rückwirkungsfreiheit und der große Temperaturbereich bis 3000 °C.

4.2 Grundlagen und Wirkungsweise

Ein IR-Thermometer lässt sich gut mit dem menschlichen Auge vergleichen. Die Linse des Auges stellt die Optik dar, durch welche die Strahlung vom Objekt zur lichtempfindlichen Schicht, der Netzhaut gelangt. Dort findet eine Umwandlung in ein Signal statt, welches zum Gehirn geleitet wird. Bei den Infrarot-Thermometern ist ebenfalls eine Linse dafür verantwortlich, dass Wärmestrahlung des Messobjektes auf einen strahlungsempfindlichen Sensor fällt, der diese Strahlung in entsprechende elektrisch auswertbare Spannungen wandelt.

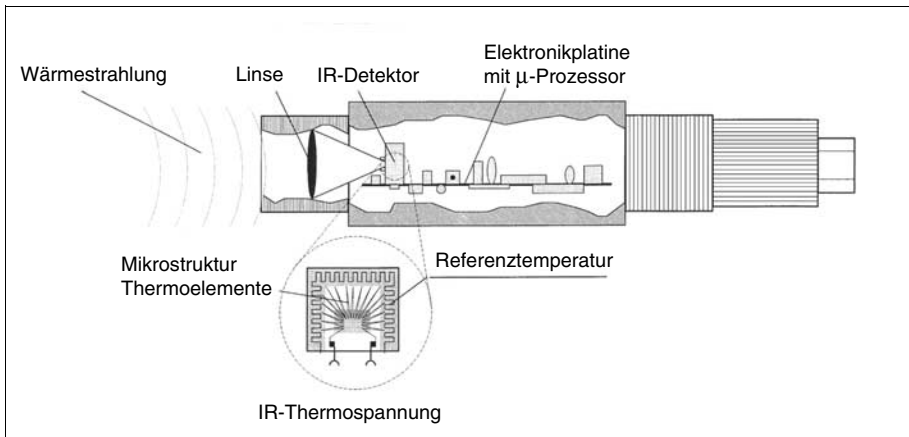


Bild 4-1: Prinzipieller Aufbau eines Infrarot-Messsystems (IR)

4.2.1 Physik der Wärmestrahlung

Jeder Körper mit einer Temperatur (T) über dem absoluten Nullpunkt sendet entsprechend seiner Temperatur infrarote Strahlung, so genannte Eigenstrahlung, aus. Ursache dafür ist die innere mechanische Molekülbewegung. Die Intensität dieser Bewegung hängt von der Temperatur dieses Körpers ab. Da Molekülbewegungen gleichzeitig Ladungsbewegungen darstellen, wird eine elektromagnetische Strahlung (Photonenteilchen) ausgesandt. Diese Photonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit und gehorchen den bekannten optischen Gesetzmäßigkeiten. Sie lassen sich umlenken, mittels Linsen bündeln oder können von spiegelnden Flächen reflektiert werden. Das Spektrum dieser Wärmestrahlung erstreckt sich von 0,7 bis ca. 1000 μm Wellenlänge. Dieser Bereich ist für das menschliche Auge nicht sichtbar, da er oberhalb des roten Bereichs des sichtbaren Lichtes liegt. Man nennt ihn deshalb lateinisch "infra"-rot.

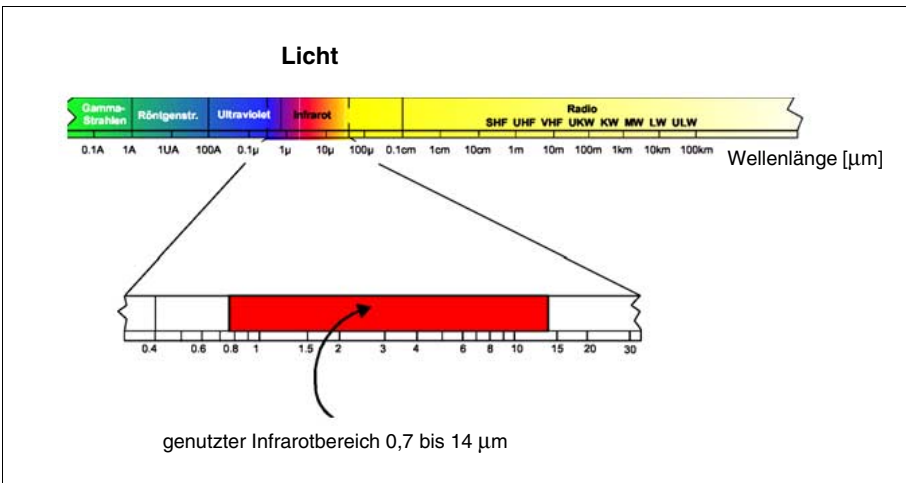


Bild 4-2: Das elektromagnetische Spektrum, mit dem messtechnisch nutzbaren Infrarotbereich

Wie erwähnt, sendet jeder Körper diese Strahlung aus. In Bild 4-3 sind typische Strahlungskurven eines Körpers bei unterschiedlichen Temperaturen aufgezeigt. Man sieht, dass heiße Körper nicht nur in dem eben beschriebenen infraroten Bereich ($> 0,7 \mu\text{m}$) Strahlung aussenden, ein Teil des Spektrums liegt auch im sichtbaren Bereich. Das ist der Grund, warum Menschen in der Lage sind, sehr heiße Objekte (über 600 $^{\circ}\text{C}$) als rot- bis weißglühend zu sehen. So können erfahrene Stahlarbeiter an Hand der Farbe des heißen Metalls die Temperatur ziemlich genau abschätzen.

Das klassische Glühfadenpyrometer wurde in der Stahl- und Eisenindustrie schon ab 1930 als funktionierendes Messsystem eingesetzt. Im Bild 4-3 ist ebenfalls zu sehen, dass sich das Strahlungsmaximum mit steigender Objekttemperatur zu immer kürzeren Wellenlängen verschiebt und sich die Kurven eines Körpers bei verschiedenen

Temperaturen nicht schneiden.

Diese Zusammenhänge wurden von den Physikern Stefan und Boltzmann 1879 erkannt und erlauben hieraus eine eindeutige Temperaturbestimmung von Messobjekten anhand der vorliegenden Strahlungskurve.

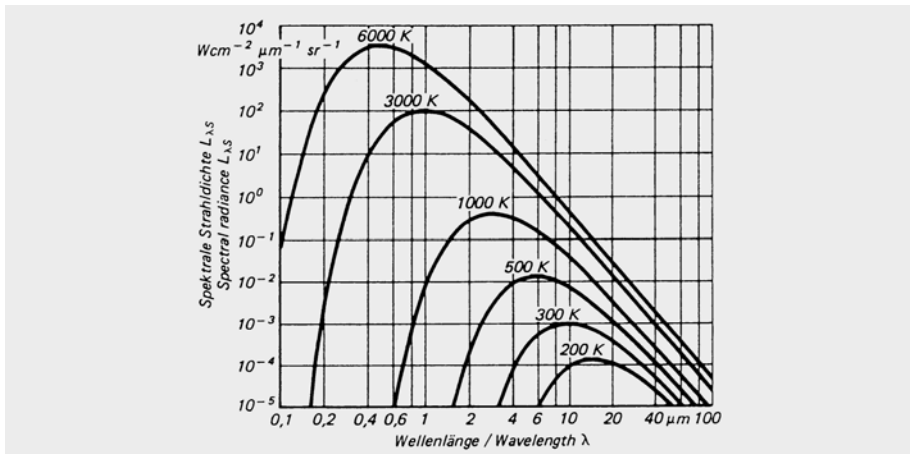


Bild 4-3: Strahlungscharakteristik eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Temperatur

Auf Basis dieser Erkenntnisse baut die Infrarot-Messtechnik auf. Sieht man sich Bild 4-3 an, sollte das Ziel darin bestehen, das Infrarot-Thermometer so auszulegen, dass möglichst viel Energie (entspricht der Fläche unter einer Kurve) bzw. Signal vom Messobjekt ausgewertet werden kann. Bei hohen Temperaturen ist dies schon mit einem schmalen Wellenlängenbereich möglich, bei niedrigen Temperaturen wird die Energie eines größeren spektralen Bereiches (z. B. 7...14 μm) verwendet.

Ein weiterer Grund, Geräte für verschiedene Wellenlängenbereiche zu haben, ist die Abstrahlcharakteristik von einigen Materialien, so genannten nichtgrauen Strahlern (Glas, Metalle und Kunststofffolien). Bild 4-3 zeigt Kurven vom Ideal, dem so genannten Schwarzen Strahler oder auch Schwarzen Körper (engl.: Blackbody). Viele Körper emittieren aber weniger Strahlung bei gleicher Temperatur. Das Verhältnis aus dem realen Abstrahlwert und dem des Schwarzen Strahlers wird Emissionsgrad e genannt und kann maximal 1 (Körper entspricht dem idealen Schwarzen Strahler) und minimal 0 betragen. Körper, deren Emissionsgrad kleiner 1 ist, werden graue Strahler genannt. Körper, deren Emissionsgrad zusätzlich temperatur- und wellenlängenabhängig ist, nennt man nichtgraue Strahler.

Physikalisch gesehen gilt nach dem Energieerhaltungssatz, dass sich die Summe der Abstrahlung aus Absorption (A), Reflexion (R) und Transmission (T) zusammensetzt und als Summe "Eins" ergibt (siehe Gleichung 1 und Bild 4-4).

$$A + R + T = 1 \quad (1)$$

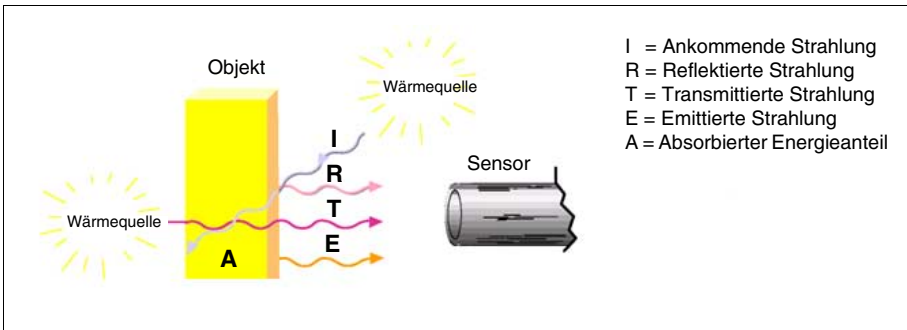


Bild 4-4: Realer grauer Strahler

Feste Körper haben keine Transmission im infraroten Bereich ($T=0$). Dann ergibt sich aus Gleichung 1 für die Absorption und damit Emission:

$$A \Leftrightarrow E = 1 - R \quad (2)$$

Ideale „Schwarze Strahler“ weisen auch keine Reflexion ($R = 0$) auf, so dass $E = 1$ ist. Viele Nichtmetalle wie z. B. Holz, Kunststoff, Gummi, organische Materialien, Stein oder Beton haben nur gering reflektierende Oberflächen und deshalb hohe Emissionsgrade zwischen ε 0,8 und ε 0,95. Metalle dagegen, insbesondere mit polierten bzw. glänzenden Oberflächen, können bei etwa ε 0,1 liegen. Diesem Umstand wird bei den Infrarot-Thermometern durch entsprechende Möglichkeiten zur Einstellung des Emissionsfaktors Rechnung getragen, siehe auch Bild 4-5.

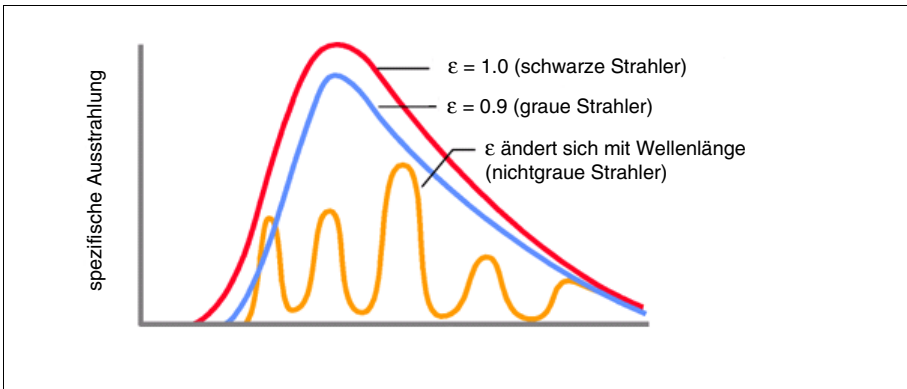


Bild 4-5: Spezifische Ausstrahlung bei verschiedenen Emissionsgraden

4.2.2 Ermittlung des Emissionsgrades

Ob Festkörper, Flüssigkeiten oder Gase, jedes Messobjekt stellt sich für einen Infrarotsensor individuell und spezifisch dar. Ursache sind die material- und oberflächen-spezifischen Gegebenheiten. Es gibt verschiedene Methoden, diesen Einfluss des Emissionsgrades zu bestimmen. Man kann den Emissionsgrad für eine Reihe häufig verwendeter Materialien aus einer Tabelle entnehmen. Emissionsgradtabellen helfen auch, den für dieses Material passenden Wellenlängenbereich und damit das richtige Messgerät zu finden. Diese Tabellenwerte sollten speziell bei Metallen nur als Orientierung genutzt werden, da der Oberflächenzustand (z. B. poliert, oxidiert oder verzun-dert) den Emissionsgrad mehr beeinflussen kann, als die verschiedenen Werkstoffe selbst. Weiter besteht die Möglichkeit, den Emissionsgrad für ein spezielles Material auf verschiedene Weise selbst zu bestimmen. Dazu benötigt man ein Pyrometer mit Emissionsgradeinstellung.

1. Eine Probe des Materials wird auf eine bekannte Temperatur erhitzt, die mit einem Kontaktthermometer (z. B. Thermoelement) sehr genau ermittelt werden kann. Anschließend wird die Objekttemperatur mit dem Infrarot-Thermometer gemessen. Dann wird der Emissionsgrad solange verändert, bis die Temperatur der des Kontaktthermometers entspricht. Dieser Emissionsgrad wird nun für alle zukünftigen Messungen von Objekten aus diesem Material beibehalten.
2. Bei relativ geringen Temperaturen (bis 260 °C) werden spezielle Kunststoffaufkleber mit bekanntem Emissionsgrad auf dem Messobjekt befestigt und die Temperatur des Aufklebers mit dem Infrarot-Thermometer und dem entsprechenden Emissionsgrad $\varepsilon = 0,95$ bestimmt. Anschließend wird die Oberflächentemperatur des Objektes ohne Aufkleber gemessen und der Emissionsgrad so lange verstellt, bis der korrekte Temperaturwert angezeigt wird. Der so ermittelte Emissionsgrad wird dann für alle Messungen an Objekten aus diesem Material verwendet.

3. Erzeugung eines Schwarzen Strahlers mit Hilfe eines Probekörpers aus dem zu messenden Material. Dazu wird ein Loch in das Objekt gebohrt. Die Tiefe des Loches sollte mindestens das Fünffache des Durchmessers der Bohrung betragen. Der Durchmesser muss der Größe des Messfleckes des verwendeten Messgerätes entsprechen. Falls der Emissionsgrad der Innenwände größer als 0,5 ist, beträgt der Emissionsgrad des Hohlraumstrahlers jetzt etwa 1 und die in dem Loch gemessene Temperatur ist die korrekte Temperatur des Messobjektes. Wenn das Infrarot-Thermometer jetzt auf die Oberfläche des Objektes gerichtet wird, kann der Emissionsgrad verändert werden, bis die Temperaturanzeige mit dem zuvor am „Schwarzen Strahler“ ermittelten Wert übereinstimmt. Der so erhaltene Emissionsgrad ist nun für alle Messungen am gleichen Material verwendbar.
4. Wenn das Messobjekt beschichtet werden kann, wird eine matte schwarze Farbe aufgetragen, für die ein Emissionsgrad von etwa 0,95 angegeben ist. Gemessen wird die Temperatur dieses „Schwarzen Strahlers“, wobei anschließend, wie zuvor beschrieben, der Emissionsgrad eingestellt wird.

4.2.3 Messung von Metallen

Der Emissionsgrad von Metallen ist von der Wellenlänge und der Temperatur abhängig. Da Metalle häufig reflektieren, besitzen sie tendenziell einen niedrigeren Emissionsgrad, was unterschiedliche und unzuverlässige Messergebnisse zur Folge haben kann. In diesen Fällen ist es wichtig, ein Instrument auszuwählen, welches die Infrarot-Strahlung bei einer bestimmten Wellenlänge und in einem bestimmten Temperaturbereich misst, bei dem die Metalle einen möglichst hohen Emissionsgrad haben. Bei vielen Metallen vergrößert sich der Messfehler mit der Wellenlänge, so dass die kürzeste für die Messung verfügbare Wellenlänge genutzt werden sollte, siehe Bild 4-6.

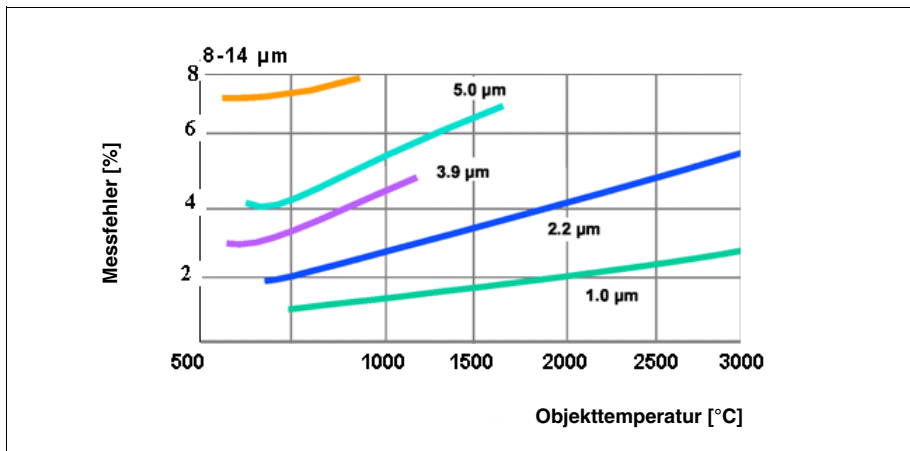


Bild 4-6: Messfehler bei 10 % falsch eingestelltem Emissionsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge und Objekttemperatur

Die optimale Wellenlänge für hohe Temperaturen bei Metallen liegt mit etwa **0,8...1,0 μm** an der Grenze zum sichtbaren Bereich. Wellenlängen von **1,6, 2,2 und 3,9 μm** sind ebenfalls noch sinnvoll.

4.2.4 Temperaturmessung an Kunststoffen

Viele Kunststoffe sind von Haus aus durchsichtig, transparent für sichtbare, aber auch für infrarote Strahlung. Die Transmissionsgrade von Kunststofffolien variieren mit der Wellenlänge und verhalten sich proportional zu ihrer Dicke. Dünne Materialien sind durchlässiger als dicke Kunststoffe. Für eine optimale Temperaturmessung an solchen Folien ist es wichtig, eine Wellenlänge auszuwählen, bei der der Transmissionsgrad annähernd Null ist. Einige Kunststoffe (Polyäthylen, Polypropylen, Nylon und Polystyrol) sind bei 3,43 μm undurchlässig, andere (Polyester, Polyurethan, FEP und Polyamid) bei 7,9 μm . Bei dickeren ($> 0,4 \text{ mm}$) oder stark pigmentierten Folien sollte eine Wellenlänge zwischen 8 und 14 μm gewählt werden.

Besteht trotzdem Unsicherheit, empfiehlt es sich, dem Infrarotgerätehersteller eine Probe des Kunststoffes schicken, um die für die Messung optimale spektrale Bandbreite zu bestimmen. Bei fast allen Kunststofffolien liegt ein Reflexionsgrad zwischen 5 % und 10 % vor ($\varepsilon = 0,9...0,95$).

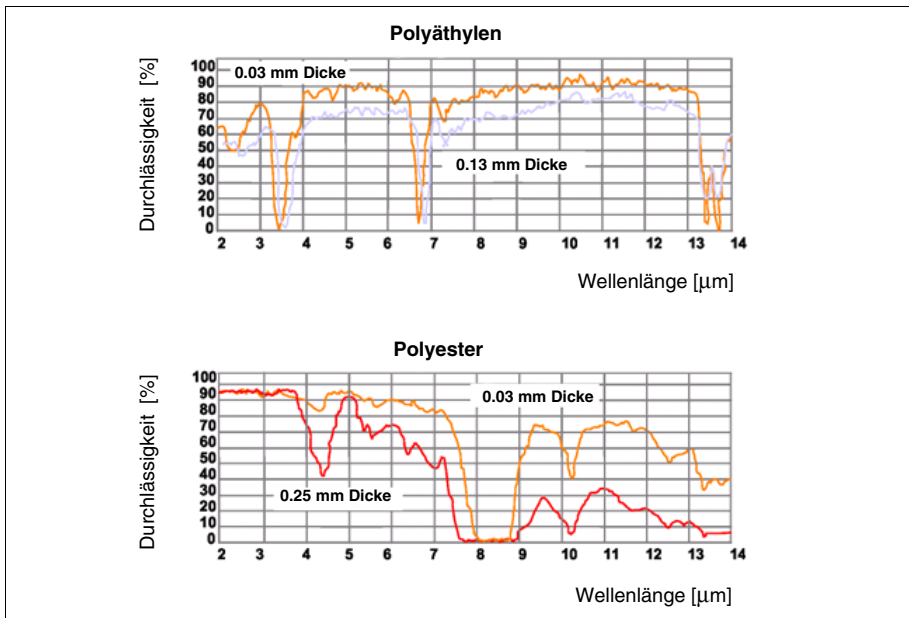


Bild 4-7: Spektrale Durchlässigkeit von Polyäthylen- und Polyester-Kunststofffolien

Unabhängig von der Dicke ist Polyäthylen bei 3,43 μm fast und Polyester bei 7,9 μm vollkommen undurchlässig.

4.2.5 Messung an Glas

Bei der Temperaturmessung von Glas mit einem Infrarot-Thermometer sind sowohl Reflexion als auch Transmission zu berücksichtigen. Durch sorgfältige Auswahl der Wellenlänge ist es möglich, sowohl die Oberfläche des Glases, als auch in der Tiefe die Temperatur zu messen. Bei Anwendungen für Messungen unterhalb der Oberfläche ist ein Sensor für 1,0; 2,2 oder 3,9 μm Wellenlänge einzusetzen. Für Oberflächentemperaturen wird ein Sensor für 5 μm empfohlen. Bei niedrigen Temperaturen sollten 8...14 μm genutzt und zur Kompensation der Reflexion der Emissionsgrad auf 0,85 eingestellt werden.

Zusammenfassung:

Jeder Körper sendet infrarote Strahlung aus, die für unser Auge erst bei Temperaturen oberhalb 600 °C sichtbar ist (z. B. glühendes Eisen). Der Wellenlängenbereich reicht von 0,7...1000 μm . Schwarze Strahler absorbieren und emittieren 100 % der Strahlung, was ihrer Eigentemperatur entspricht. Alle anderen Körper werden mit ihrem Abstrahlverhalten dazu ins Verhältnis gesetzt. Dieses Verhältnis wird Emissionsgrad genannt.

4.3 Die typische Infrarot-Messstelle

4.3.1 Die Übertragungsstrecke

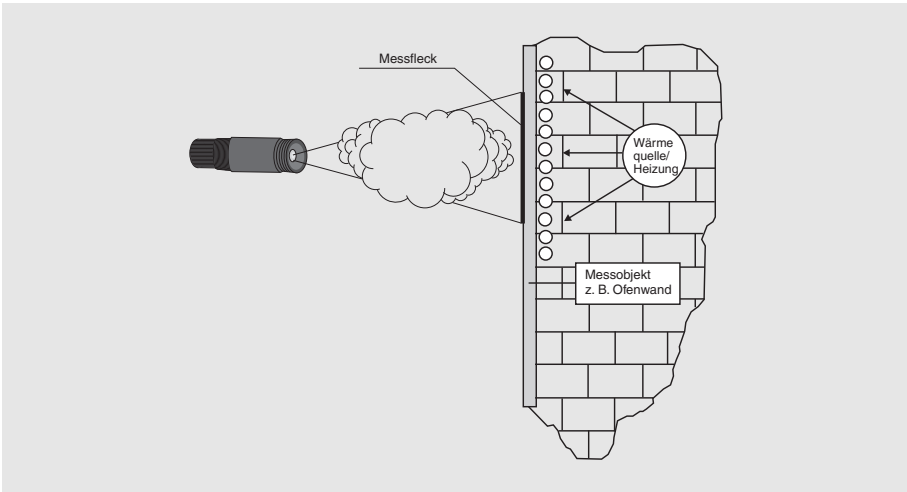


Bild 4-8: Typische Infrarot-Messstelle

In der Regel befindet sich in der Übertragungsstrecke zwischen Detektor und Messobjekt Umgebungsluft, deren Transmissionsverhalten für eine zuverlässige Messung zu berücksichtigen ist. Einige atmosphärische Bestandteile wie Wasserdampf und Kohlendioxid absorbieren infrarote Strahlung bestimmter Wellenlängen und bewirken somit Transmissionsverluste. Wenn man diese Absorptionsmedien außer acht lässt, wird unter Umständen eine Temperatur angezeigt, die unter der tatsächlichen Objekttemperatur liegt. Glücklicherweise gibt es im Infrarotspektrum jedoch „Fenster“, die diese Absorptionsbänder nicht enthalten. Im Bild 4-9 ist die Transmissionskurve einer 1 m langen Luftstrecke dargestellt. Typische Messfenster, in denen Infrarotstrahlung nahezu ungehindert passieren kann sind: 1,1...1,7 μm , 2...2,5 μm , 3...5 μm und 8...14 μm . Aus diesem Grund werden bei den handelsüblichen Infrarot-Thermometern diese Wellenlängen zur Auswertung herangezogen.

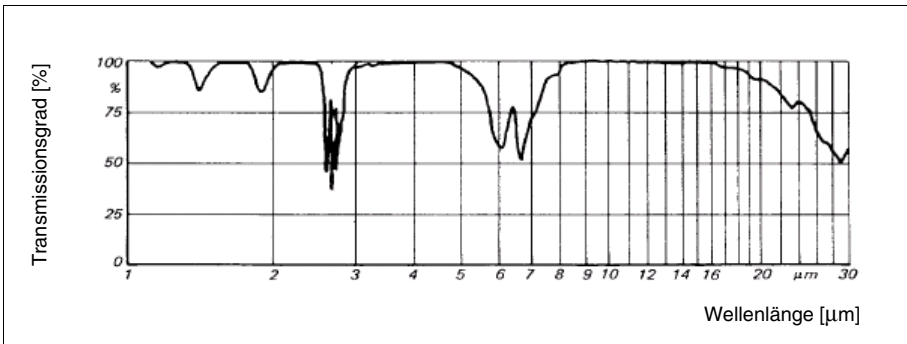


Bild 4-9: Transmissionsgrad einer 1 m langen Luftstrecke bei 32 °C und rel. Feuchte 75 %

Weitere Einflussgrößen wie Staub, Rauch und Schwebstoffe in der Atmosphäre können zur Verschmutzung der Optik und damit zu falschen Messwerten führen. Um Ablagerungen von Schwebstoffen zu verhindern, werden als Zubehör so genannte Luftblasvorsätze angeboten. Das sind in der Regel vorschraubbare Rohrstutzen mit Druckluftanschluss. Die Luft sorgt für einen Überdruck vor der Optik und hält somit Schmutzteilchen fern. Treten während des Messvorganges starke Staub- oder Rauchentwicklungen auf und beeinträchtigen das Messergebnis, sollten Quotientenpyrometer zum Einsatz kommen.

4.3.2 Fremdstrahlung und hohe Umgebungstemperaturen

Gleichfalls zu berücksichtigen sind Wärmestrahlungsquellen in der Umgebung des Messobjektes. So könnte die Temperaturmessung von Metallstücken in einem Industrieofen durch die höheren Temperaturen der Ofenwände verfälscht werden. Diese Wirkung der Umgebungstemperatur auf das Messergebnis wird von vielen Infrarot-Messgeräten durch eine entsprechende Kompensation berücksichtigt. Andernfalls würde für das Messobjekt ein zu hoher Temperaturwert angezeigt werden. Ein korrekt eingestellter Emissionsgrad in Verbindung mit einer automatischen Umgebungstemperaturkompensation gewährleistet die genauesten Messergebnisse.

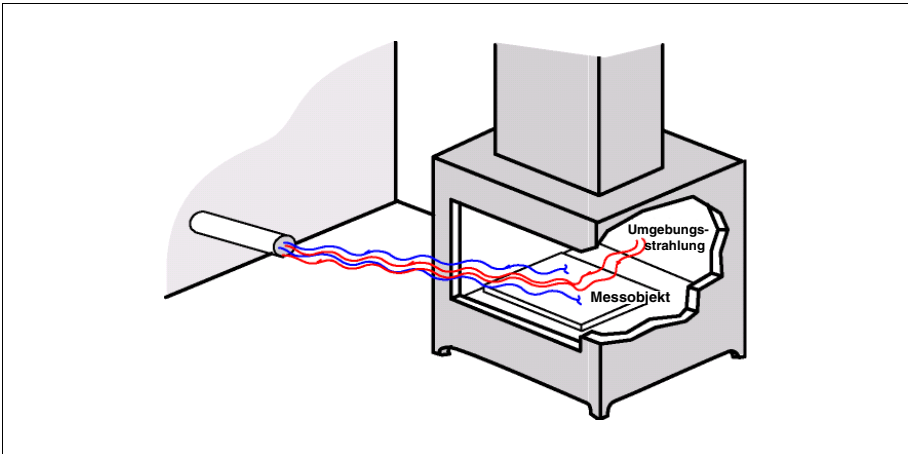


Bild 4-10: Fremdstrahlungsquellen-Einfluss auf das Messergebnis

Infrarot-Sensoren sind elektronische Bauteile mit teilweise empfindlichem Charakter. Diese können nur innerhalb bestimmter **Betriebstemperaturbereiche** arbeiten. Bei einigen Sensoren sind bis zu 85 °C als obere Grenze zulässig. Oberhalb der zulässigen Betriebstemperatur müssen Luft- bzw. Wasserkühlgehäuse verwendet und spezielle Anschlusskabel für den Hochtemperatureinsatz vorgesehen werden. Beim Einsatz einer Wasserkühlung ist es oft günstig, diese zusammen mit dem Luftblasvorsatz zu verwenden, um die Kondenswasserbildung auf der Optik zu verhindern.

4.3.3 Optischer Strahlengang, Schutzgläser und Fenstermaterial

Das optische System eines Infrarotthermometers fängt die von einem kreisförmigen Messfleck abgestrahlte infrarote Energie auf und fokussiert sie auf einen Detektor.

Dabei ist zu beachten, dass das Messobjekt diesen Messfleck voll ausfüllt. Sonst „sieht“ das Infrarot-Thermometer auch noch Temperaturstrahlung aus dem Hintergrund, was den Messwert verfälscht, siehe Bild 4-11.

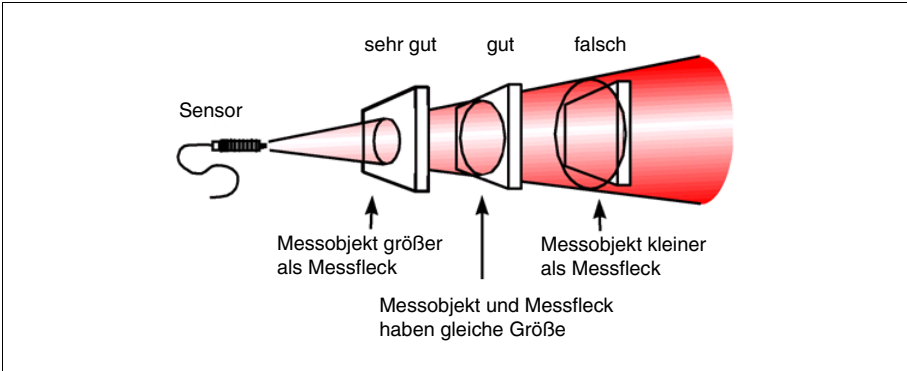


Bild 4-11: Darstellung Messfleckgröße

Die optische Auflösung ist definiert als Verhältnis zwischen der Entfernung des Messgerätes zum Messobjekt und dem Messfleckdurchmesser. Je größer dieser Wert, desto besser ist die optische Auflösung des Messgerätes und desto kleiner kann das Messobjekt bei gegebener Entfernung sein.

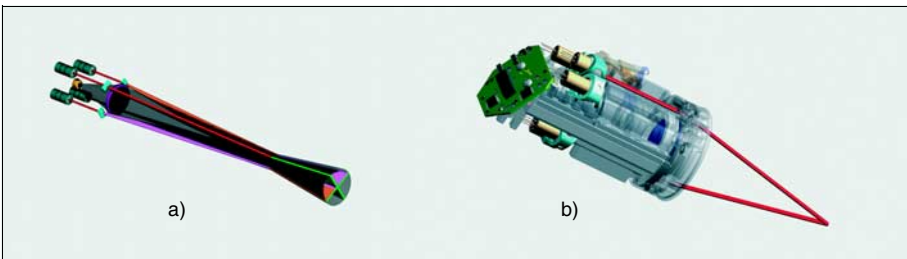


Bild 4-12: a) Hochleistungsoptik in Kombination mit Kreuzlaserserviertechnik für mehr Präzision
b) Scharfpunktoptik mit 1 mm-Messfleck und Laserservier zur Messung feinsten Strukturen

Die Optik selbst kann eine Spiegeloptik oder eine Linsenoptik sein. Linsen lassen sich entsprechend ihres Materials nur für bestimmte Wellenlängenbereiche einsetzen sind aber aus konstruktiven Gründen die bevorzugte Lösung.

Neueste Trends bei Visiertechniken

Neue Messprinzipien und Visiertechniken ermöglichen einen immer präziseren Einsatz von Infrarottemperaturmessgeräten. Entwicklungen aus dem Bereich der Festkörperlaser werden adaptiert, indem Messfleckgrößen mit Hilfe von Mehrfachlaseranordnungen markiert werden. Dabei werden die wahren Messfleckgrößen im Objektfeld z. B. mittels Kreuzlaservisiertechniken angezeigt. Bei anderen Geräten ersetzen Videokamerachips aufwendige optische Visiersysteme.

Entwicklung von Hochleistungsoptiken in Kombination mit Kreuzlaservisiertechniken

Einfache, kostengünstige Hand-Infrarotthermometer verwenden Ein-Punkt-Laserpointer, um mit einem gewissen Parallaxenfehler die Mitte des Messflecks zu kennzeichnen. Dabei bleibt es dem Anwender überlassen, anhand des Messfleck-Diagrammes und der geschätzten Entfernung die Messfleckgröße zu schätzen. Nimmt das Messobjekt nur einen Teil des Messflecks ein, werden Temperaturerhöhungen nur als Mittelwert zwischen dem heißen Flächenanteil und dem, diese Fläche umgebenden, kalten Anteil dargestellt. Hat beispielsweise eine elektrische Verbindung aufgrund eines korrodierten Kontaktes einen höheren Ohmschen Widerstand und erwärmt sich somit in unzulässiger Weise, wird dies bei kleinen Objekten und zu großen Messflecken nur als geringfügige Erwärmung dargestellt, so dass potentiell gefährliche Situationen nicht erkannt werden. Um Messflecken in ihrer Größe richtig anzuzeigen, wurden optische Visiere eingeführt, die in ihrem Fadenkreuz eine Größenkennzeichnung haben und so ein exaktes Visieren erlauben.

Aufgrund der wesentlich bequemerem und sichereren Handhabbarkeit von Laserpyrometern hat man versucht, mit Hilfe von Laserbeleuchtungstechniken die Messfleckgröße unabhängig von der Entfernung entsprechend den im Messfleck-Diagramm dargestellten Verhältnissen anzuzeigen. Zwei windschiefe, von der Optik ausgehende Laserstrahlen beschreiben näherungsweise die Verengung des Messstrahls bzw. dessen Aufweitung in größeren Entfernungen. Allerdings erfolgt die Durchmesser-Angabe des Messflecks dann nur mit zwei Punkten an dessen Umfang. Designbedingt ändert sich die Winkelposition dieser Laserpunkte auf dem Messkreis, was ein Visieren oftmals erschwert.

Das Fadenkreuz-Prinzip

Durch Nutzung neuer Laserbeleuchtungs-Technologien ist es gelungen, Messflecken von Infrarotthermometern als größenrichtiges Fadenkreuz, dessen Dimensionen exakt dem Messfleck entsprechen, darzustellen. Dabei werden vier symmetrisch um den infrarotoptischen Messkanal angeordnete Laserdioden mit Liniengeneratoren versehen, die in dem durch die Optik bestimmten Scharfpunkt-Abstand eine Linie definierter Länge erzeugen. Paarweise gegenüberstehende Liniengeneratoren überlagern im Scharfpunkt die von ihnen projizierten Laserlinien vollständig, so dass ein Mess- bzw. Fadenkreuz entsteht, welches exakt den Messfleck-Durchmesser beschreibt. Bei kürzeren bzw. längeren Messentfernungen erfolgt diese Überlagerung nur noch teilweise, so dass sich für den Nutzer die Linienlänge und damit die Größe des Messkreuzes

verändert. Mit Hilfe dieser Technologie ist es somit erstmals möglich, die präzisen Abmessungen des Messflecks übersichtlich zu erfassen. Damit verbessert sich die praktische Anwendbarkeit von Geräten mit gutem optischen Leistungsvermögen erheblich.

Schutzgläser und Fenstermaterial

Für die Messung in geschlossenen Reaktionsbehältern, Öfen oder Vakuumkammern ist es in der Regel notwendig, durch ein geeignetes Messfenster hindurch zu messen. Bei der Auswahl eines Fenstermaterials ist darauf zu achten, dass die Transmissionswerte des Fensters auf die spektrale Empfindlichkeit des Sensors abgestimmt sind. Bei hohen Temperaturen kommt zumeist Quarzglas zum Einsatz. Bei niedrigen Temperaturen im 8...14 µm-Band ist die Verwendung eines speziellen Infrarot-durchlässigen Materials wie Germanium, Amtir oder Zinkselenit notwendig.

Neben der spektralen Empfindlichkeit sind bei der Wahl des Fensters weitere Parameter zu berücksichtigen, wie Durchmesser des Fensters, Temperaturanforderungen, maximale Fensterdruckdifferenz, Umgebungsbedingungen sowie die Möglichkeit, es beidseitig sauber zu halten. Ebenso wichtig ist es, Transparenz im sichtbaren Bereich zu haben, um das Gerät besser auf das Messobjekt (z. B. im Vakuumbehälter) ausrichten zu können.

Fenstermaterial/ Eigenschaften	Saphire Al ₂ O ₃	Quarzglas SiO ₂	CaF ₂	BaF ₂	AMTIR	ZnS	ZnSe	KRS5
Empfohlener Infrarot-Wellenlängenbereich in µm	1...4	1...2,5	2...8	2...8	3...14	2...14	2...14	1...14
Max. Fenster-temperatur in °C	1800	900	600	500	300	250	250	k. A.
Transmission im sichtbaren Bereich	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja
Beständigkeit gegen Feuchte, Säuren, Ammoniakverbindg.	Sehr gut	Sehr gut	wenig	wenig	gut	gut	gut	gut
Geeignet für Vakuumanwendungen	ja	ja	ja	ja	./.	ja	ja	ja

Tab. 4-1: Verschiedene Fenstermaterialien im Überblick

Die Transmission eines Fensters hängt wesentlich von seiner Dicke ab. Für ein Fenster mit 25 mm Durchmesser, das einer Druckdifferenz von einer Atmosphäre standhalten soll, ist eine Dicke von 1,7 mm ausreichend.

Zusammenfassung:

Wie bei einem Fotoapparat bestimmt die Leistungsfähigkeit der Optik (z. B. Teleobjektiv), welche Größe von Messobjekten noch aufgelöst bzw. gemessen werden kann. Das Distanzverhältnis (Messentfernung : Messfleckdurchmesser) charakterisiert die Leistungsfähigkeit der Optik beim Infrarot-Thermometer. Der Messfleck muss für eine genaue Messung vom Messobjekt voll ausgefüllt sein. Sind zusätzlich Schutzfenster zwischen Messgerät und Messobjekt notwendig, ist auf die richtige Auswahl des Fenstermaterials zu achten. Dabei spielen Wellenlängenbereich und Einsatzbedingungen eine wesentliche Rolle.

4.4 Anzeige und Schnittstellen

Wichtig für den Anwender sind die verfügbaren Schnittstellen und Arten der Messwertanzeige. Die bei einigen, insbesondere Handgeräten, direkt vorhandene Anzeige/Bedienfeld-Kombination kann als Primärausgang des Messgerätes betrachtet werden. Analoge oder digitale Ausgänge dienen der Ansteuerung von zusätzlichen Anzeigen in der Messwarte oder können zu Regelzwecken verwendet werden. Der direkte Anschluss von Datenschreibern, Druckern und Rechnern ist ebenso möglich.

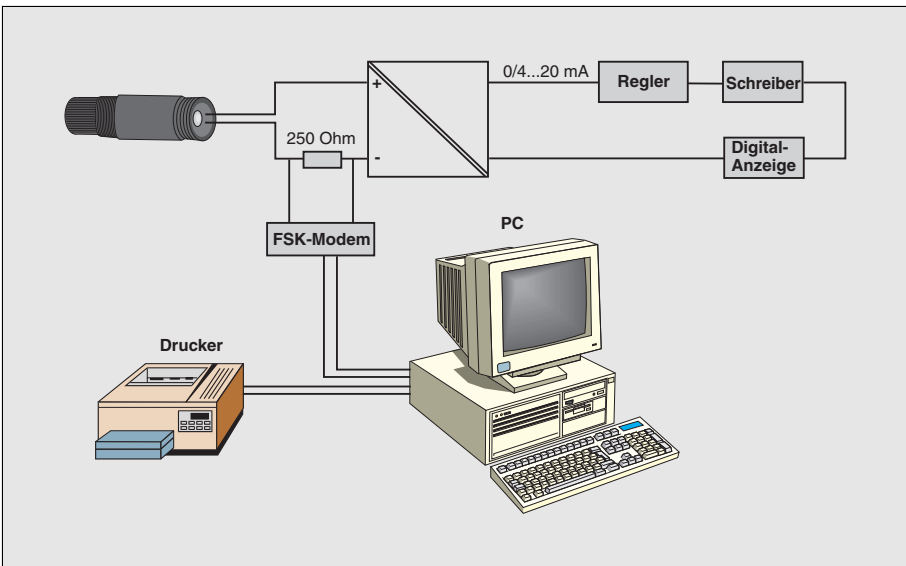


Bild 4-13: Beispiel für die elektrische Verschaltung von Infrarot-Messsystemen

Industrielle Bussysteme spielen eine immer größere Rolle und erlauben dem Anwender mehr Flexibilität. So kann man von der Schaltwarte aus die Sensoren einstellen, ohne den Fertigungsprozess unterbrechen zu müssen. Ebenfalls möglich ist die Veränderung von Parametern, wenn auf der gleichen Fertigungslinie unterschiedliche Pro-

dukte laufen. Ohne diese Feineinstellung müsste jede Veränderung der Sensorparameter, wie zum Beispiel Emissionsgrad, Messbereich oder Grenzwerte, manuell am Sensor selbst vorgenommen werden.

Da die Sensoren aber oft an schwer zugänglichen Stellen montiert sind, gewährleistet der intelligente Sensor eine kontinuierliche Prozessüberwachung und -steuerung bei minimalem Arbeitskräfteeinsatz. Bei Eintritt einer Störung – zu hohe Umgebungstemperaturen, Kabelunterbrechungen, Ausfall von Komponenten – erscheint automatisch eine Fehlermeldung.

4.5 Applikationsbeispiele

Konnten anfänglich nur hohe Temperaturen ab 700 °C bei den klassischen Bereichen Glas- und Metallherstellung gemessen werden, haben sich im Laufe der Jahre weitere Applikationsfelder, speziell im Niedertemperaturbereich, erschlossen.

- **Metall- und Legierungsherstellung**
(Schmelzen, Gießen, Walzen, Härten, Schmiede, Glühen, Schweißen, Ziehen, Sintern)
- **Zement- und Kalkbrennöfen, Drehrohröfen**
- **Feuerraummessung in Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen**
- **Glasindustrie** (Glaswanne, Feeder, Floatglaslinie)
- **Nahrungs- und Genussmittel**
Frosten, Backen, Frittieren, Sterilisieren, Abfüllen, Verpacken)
- **Textilindustrie** (Trocknen, Fasern)
- **Papierindustrie** (Beschichten, Trocknen)
- **Kunststoffe** (Vergießen, Formen, Granulate)
- **Kfz-Industrie**
- **Wartung und Service**
- **Chemische Industrie**

5 Messsignalumsetzung und -auswertung

5.1 Einsatz von Messumformern in der Temperatur-Messtechnik

Messumformer haben die Aufgabe, das elektrische Signal eines Sensors zu verstärken, zu korrigieren und gegebenenfalls galvanisch zu trennen. Das so aufbereitete Signal kann nun leicht über weite Strecken bis zur Ein-/Ausgangsebene eines Leitsystems oder einer Steuerung übertragen werden. Die Temperaturmessung unterscheidet sich jedoch in einem wesentlichen Punkt von allen anderen Messgrößen. Das elektrische Signal der als Primärsensor genutzten Thermoelemente oder Widerstände ist vergleichsweise groß, so dass eine sensornahe Signalverstärkung hier nicht zwingend erforderlich ist. Aus diesem Grund haben sich in der Temperatur-Messtechnik drei grundsätzlich verschiedene Montagearten (Orte) für die Messumformer durchgesetzt:

Die **Schaltschrankmontage** ist die älteste bekannte Montageart eines Messumformers. Übliche Bauformen sind hierbei die 19"- bzw. die DIN-Tragschiententechnik oder auch die integrierte Lösung in der Ein-/Ausgangsebene von Reglern, Schreibern oder Steuerungen. Für die direkte **Feldmontage** geeignete Messumformer bringen ihr eigenes, robustes Feldgehäuse mit. Der Feld-Messumformer kann dadurch auch in rauen Industrieumgebungen ohne besondere Schutzmaßnahmen in der Nähe des Sensors montiert werden. Als **Fühlerkopfmontage** bezeichnet man die integrierte Montage des Messumformers im Anschlusskopf eines Temperaturfühlers. Messumformer, die für diese Montageart vorgesehen sind, werden als Fühlerkopf-Messumformer bezeichnet.

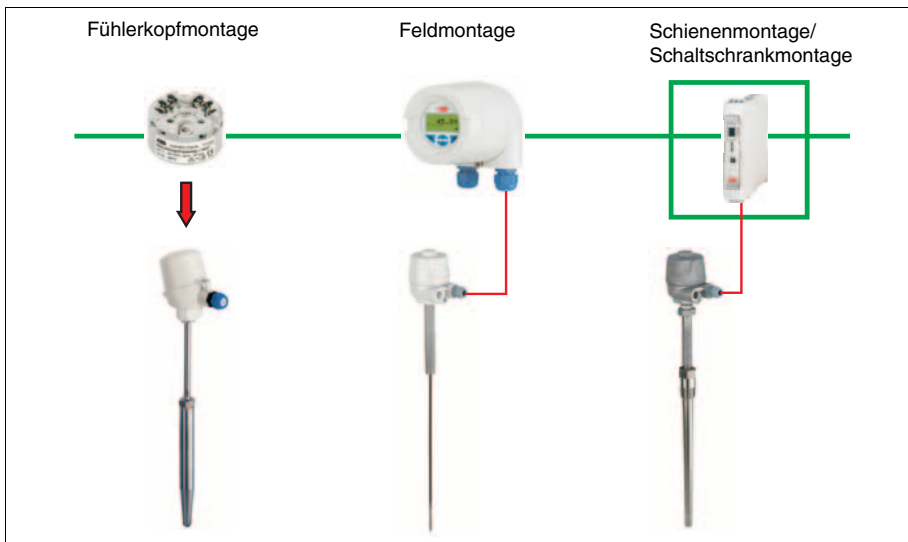


Bild 5-1: Die drei Montagearten von Messumformern

Als Temperaturfühler wird die vollständige Messeinrichtung bestehend aus Schutzrohr und austauschbarem Messeinsatz bezeichnet. Je nach gewünschter Montageart des Messumformers wird der Temperaturfühler entweder mit einer Klemmenebene oder mit einer Vorrichtung zur direkten Aufnahme des Fühlerkopf-Messumformers ausgestattet. Der Vorteil der im Schaltraum montierten Messumformer liegt in ihrer leichteren Zugänglichkeit im Reparaturfall. Aufgrund der immer robuster werdenden Elektronik tritt dieser Vorteil jedoch immer mehr in den Hintergrund.

Der Trend der modernen Instrumentierungstechnik geht deshalb dahin, Messumformer direkt in die Nähe des Sensors zu bringen. Je kürzer die empfindlichen Messleitungen sind, je näher der Messumformer also an der Messstelle montiert wird, um so geringer ist die Gefahr einer Störspannungseinstreuung auf das Eingangssignal. Bei kurzen Entfernungen zwischen Temperaturfühler und Messumformer vereinfacht sich darüber hinaus die bei Thermoelementen erforderliche Verdrahtung mit Ausgleichsleitung (siehe Kapitel 5.2). Das sind klare Vorteile, die für die Kopf- oder Feldmontage eines Temperatur-Messumformers sprechen. Auf der anderen Seite stellt die fühlernahe Montage in rauen Industrieumgebungen hohe Anforderungen an den inneren Aufbau und die Robustheit des Messumformers.



Bild 5-2: Messumformer im Feldgehäuse mit Anzeige- und Bedienmodul und großer Klemmenebene

Die Entscheidung, ob der Messumformer in Feld- oder Kopfmontage ausgeführt werden soll, hängt von den lokalen Gegebenheiten in der Anlage ab. Messumformer für Feldmontage, wie z. B. der TTF300, bieten den Vorteil hoher Robustheit und Servicefreundlichkeit. Da der Montageort nicht an die oftmals schwer zugänglichen Messstellen gebunden ist, können alle Inbetriebnahme- und Servicearbeiten bequem durchgeführt werden. Eine große Klemmenebene und das integrierte Anzeige- und Bedienmodul unterstreichen diesen Vorteil. Die erforderliche Robustheit des Messumformers wird gleich durch mehrere Maßnahmen sichergestellt. Einerseits ist seine Elektronik vollständig vergossen, andererseits ist der Messumformer in einer separaten, integrierten Kammer, getrennt von der Anschlussebene, montiert. Somit ist die Elektronik auch bei geöffnetem Gehäuse ideal geschützt. Messumformer für Fühlerkopfmontage, wie z. B. der TTH300, werden direkt in den Kopf des Temperaturfühlers integriert. Die Elektronik ist ebenfalls komplett vergossen und erlaubt die Nutzung einer lokalen Anzeige. Bei der integrierten Fühlerkopfmontage entfällt die Notwendigkeit eines zusätzlichen, getrennt montierten Messumformergehäuses, wodurch sich die Planungs- und Installationskosten erheblich reduzieren.

5.2 Thermospannungs- und Widerstandsmessung

In einem Thermoelement wird die durch den Seebeck-Effekt hervorgerufene Thermo- spannung als Messeffekt ausgenutzt (siehe Kapitel 2.2.3). Die Messung der Tempe- ratur über die Thermospannung ist im eigentlichen Sinne eine Differenzmessung zwischen dem heißen Ende des Thermopaars und der Vergleichsstellentemperatur. Für eine korrekte Messung ist die elektrische Verbindung zur Vergleichsstelle immer mit dem jeweiligen Material des Thermoelementschenkels oder geeigneter Ausgleichs- leitung auszuführen. Für die weitere Verdrahtung wird dann Kupferleitung verwendet. Wegen $U_M = U_1 - (U_2 + U_3)$ kann nur dann eine genaue Aussage über die Messstellen- spannung U_1 gemacht werden, wenn die Vergleichsstellenspannung $U_V = (U_2 + U_3)$ bekannt ist. Zur Messung von Absoluttemperaturen muss also immer die Temperatur der Vergleichsstelle T_V bekannt sein.

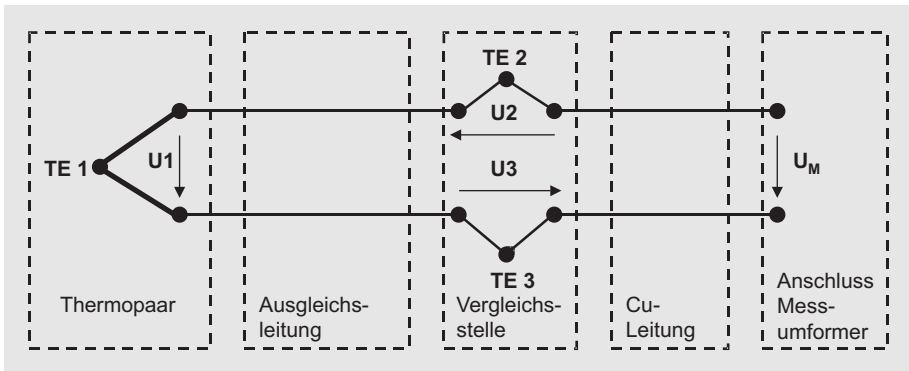


Bild 5-3: Thermospannungsmessung

Bei der **externen Vergleichsstelle** befindet sich der Übergang vom Thermoelement bzw. von der Ausgleichsleitung auf die Kupferleitung, außerhalb des Temperatur- Messumformers. Die Temperatur der Vergleichsstelle T_V wird z. B. durch eine integrierte Heizung auf einen konstanten Wert geregelt. Dieser Wert ist zu dem aus der Spannung U_M abgeleiteten Temperaturwert zu addieren, um die Temperatur am heißen Ende des Thermopaars zu erhalten.

Moderne Temperatur-Messumformer haben eine **interne Vergleichsstelle**, die den Messaufbau für den Anwender erheblich vereinfacht. Die Thermoelementschenkel bzw. die Ausgleichsleitungen werden direkt bis zum Messumformer verlegt. Die Vergleichsstelle wird hierbei durch die Klemmen des Messumformers gebildet. Ihre Temperatur T_V wird mit einem integrierten Temperatursensor erfasst und für die interne Korrektur im Messumformer verwendet. Der Messumformer kann somit die Temperatur am heißen Ende des Thermopaars direkt ermitteln.

Widerstandsmessung

Der in einem Widerstandsthermometer ausgenutzte Messeffekt ist die temperaturabhängige Zunahme eines Platin-Widerstandes (siehe Kapitel 2.2.4). Der Widerstand wird durch Einprägen eines konstanten Stromes und Messen des Spannungsabfalls erfasst. Nach dem Ohmschen Gesetz sind Widerstand und Spannung zueinander proportional. Die Spannung ist also ein direktes Maß für den Widerstand und damit die Temperatur. Es werden drei Schaltungsvarianten unterschieden.

Bei der **Zwei-Leiterschaltung** wird über eine Konstantstromquelle ein Strom über den temperaturabhängigen Widerstand R_T geleitet. Die an R_T abfallende Spannung wird dann von dem Temperatur-Messumformer gemessen und umgewandelt. Das Messergebnis wird jedoch durch die Reihenwiderstände der Messleitung ($R_{L1} + R_{L2}$) und die Übergangswiderstände der Anschlussklemmen ($R_{K1} + R_{K2}$) verfälscht.

Die Zwei-Leiterschaltung ist daher selbst für im Fühlerkopf montierte Messumformer nur bedingt geeignet. Leitungslängen und Anschlussklemmen lassen sich zwar niederohmig ausführen und mit Hilfe eines statischen Korrekturwertes im Messumformer kompensieren. Der temperaturabhängige Teil des Widerstandes der Messleitung bleibt hierbei jedoch immer unberücksichtigt. Insbesondere bei dünnen und langen Messführern bzw. Messleitungen, wird hierdurch eine Fehlmessung von mehreren °C verursacht. Fazit: Die Zwei-Leiterschaltung ist für genaue Temperaturmessung nicht geeignet.

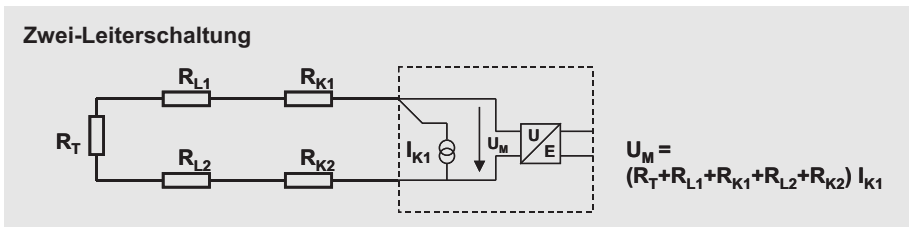


Bild 5-4: Schaltbild einer Zwei-Leiterschaltung

Bei der **Drei-Leiterschaltung** werden zwei Konstantstromquellen benutzt, um den Nachteil der zuvor beschriebenen Zwei-Leiterschaltung zu kompensieren. Wie in der Zwei-Leiterschaltung wird die Stromquelle I_{K2} zur Messung des temperaturabhängigen Widerstandes R_T einschließlich der Leitungs- und Klemmenwiderstände genutzt. Mit der zusätzlichen Stromquelle I_{K1} und einer dritten Zuleitung werden die Leitungs- und Klemmenwiderstände separat erfasst. Mit der Annahme exakt gleicher Leitungs- und Klemmenwiderstände in allen drei Zuleitungen lässt sich ihr Einfluss auf die Genauigkeit der Temperaturmessung eliminieren.

Genau diese Annahme erweist sich jedoch in der Praxis oftmals als fehlerhaft. Es kann nicht immer sichergestellt werden, dass die Klemmenwiderstände den gleichen Übergangswiderstand haben. Allein durch Oxidation der Anschlussklemmen im Laufe des Einsatzes kann sich der Übergangswiderstand der einzelnen Klemmen unterschiedlich

verändern. Dies kann auch bei der Drei-Leiterschaltung zu einer nicht zu vernachlässigenden Fehlmessung führen.

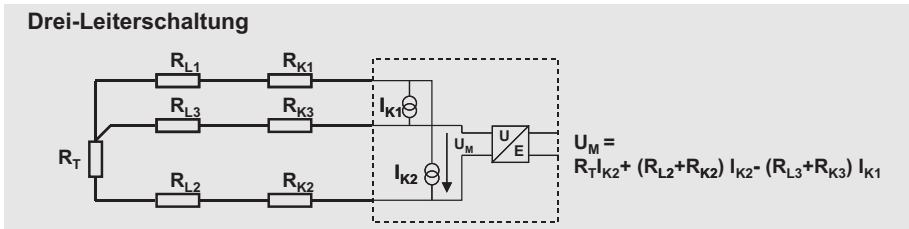


Bild 5-5: Schaltbild einer Drei-Leiterschaltung

Die **Vier-Leiterschaltung** vermeidet alle vorgenannten Nachteile. Auch hier wird über eine Konstantstromquelle ein Strom über den temperaturabhängigen Widerstand R_T geleitet. Der für die Temperaturmessung benötigte Spannungsabfall am Widerstand R_T wird jedoch über zwei zusätzliche Leitungen hochohmig abgegriffen. Somit fließt bei der Messung des Spannungsabfalls nur ein vernachlässigbar geringer Strom und die Leitungs- und Klemmenwiderstände R_{L1} , R_{K1} , R_{L2} , R_{K2} verfälschen das Messergebnis nicht. Die Vier-Leiterschaltung ist somit die Schaltung, die bei hochgenauer Temperaturmessung immer eingesetzt wird.

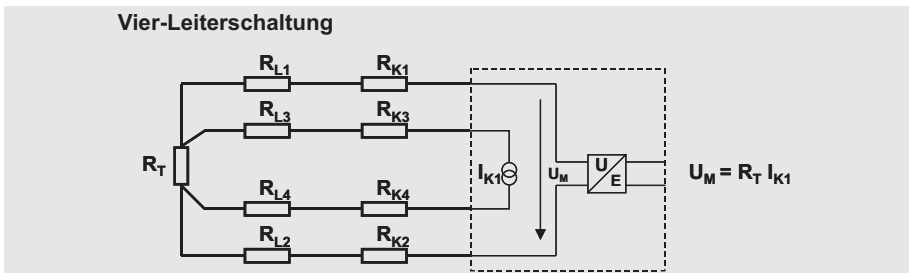


Bild 5-6: Schaltbild einer Vier-Leiterschaltung

Moderne Messumformer unterstützen heute Thermospannungs- und Widerstandsmessung sowie alle oben beschriebenen Schaltungsarten in einem einzigen Gerät. Dem Anwender steht somit immer die für ihn optimale Messtechnik zur Verfügung. Bei der Thermospannungsmessung wird in der Prozessindustrie nahezu ausschließlich mit der komfortableren internen Vergleichsstelle gearbeitet. Die externe Vergleichsstelle kann aber immer dann sinnvoll eingesetzt werden, wenn hochpräzise Vergleichsstellentemperaturen von unter 0,1 K erforderlich sind. In Anbetracht der Summe aller Fehler einer Temperaturmesskette (siehe Kapitel 5.10) ist diese Anwendung jedoch dem Laborbereich vorbehalten. Bei der Widerstandsmessung sollte aufgrund der unumstrittenen Vorteile grundsätzlich die Vier-Leiterschaltung zum Einsatz kommen. Der Nachteil der Drei-Leiterschaltung sollte daher nur dann in Kauf genommen werden, wenn die Zahl der für die Widerstandsmessung zur Verfügung stehenden elektrischen Leitungen geometrie- oder anlagenbedingt eingeschränkt werden muss.

5.3 Energieversorgung von Temperatur-Messumformern

Der Messumformer ist ein Messgerät, das ein analoges Eingangssignal in ein analoges und/oder ein digitales Ausgangssignal wandelt.

Messumformer enthalten aktive elektronische Bauelemente und benötigen demzufolge Hilfsenergie, um ihre Funktion erfüllen zu können. Die Anzahl der Leitungen für Hilfsenergie und Ausgangssignal kennzeichnet die Versorgungstechnik (Speisung) der Messumformer. Diese als 2-/3-/4-Leitertechnik bezeichnete Versorgungstechnik ist nicht zu verwechseln mit der in Kapitel 5.2 beschriebenen Widerstandsmessung in 2-/3-/4-Leiterschaltung.

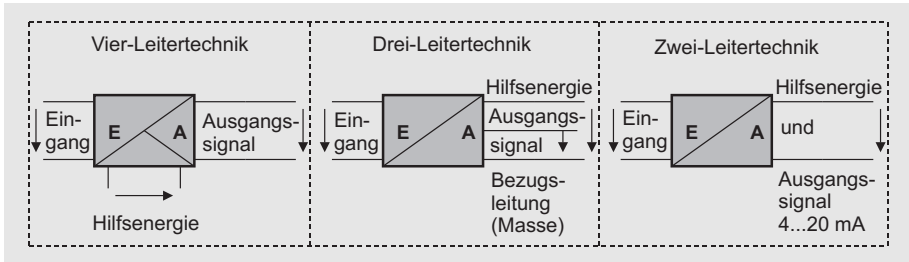


Bild 5-7: Energieversorgungstechniken bei Messumformern

Die **Vier-Leitertechnik** wird ausschließlich im Schaltschrank eingesetzt. Hier stehen typische Hilfsenergien von 230 V AC, 110 V AC, 24 V AC oder 24 V DC zur Verfügung. Für Energieversorgung und Ausgangssignal werden vier Leitungen benötigt. Die Stromkreise für den Eingang, den Ausgang und Hilfsenergie des Messumformers sind gegeneinander galvanisch getrennt. Typische Ausgangssignale sind 0...5 V, 0...10 V, 0...20 mA und 4...20 mA. Oft findet man in Messumformern in Vier- oder Drei-Leitertechnik zusätzliche digitale Ausgänge, die beispielsweise zur Fehler- oder Grenzwertmeldung genutzt werden können.

Die **Drei-Leitertechnik** wird ebenfalls ausschließlich im Schaltschrank eingesetzt. Durch die Benutzung einer gemeinsamen Leitung (Masse) kann die vierte Leitung eingespart werden. Die typische Hilfsenergie ist hier 24 V DC. Aufgrund der eingesparten Leitung sind nur noch Eingang und Ausgang gegeneinander galvanisch getrennt ausgeführt. Typische Ausgangssignale sind 0...5 V, 0...10 V, 0...20 mA und 4...20 mA.

Die **Zwei-Leitertechnik** ist in Messumformern für die Feld- oder Fühlerkopfmontage heute Standard. Bei dieser Art der Energieversorgung sind die zwei Leiter für die Hilfsenergie mit den Leitern für das Ausgangssignal identisch, was den Verdrahtungsaufwand gegenüber der Drei-Leitertechnik nochmals reduziert. Weil auch am Messbereichsanfang dem Messumformer Hilfsenergie zugeführt werden muss, darf die untere Bereichsgrenze des Ausgangssignals nicht Null werden (true zero), sondern sie muss einen Wert größer als Null annehmen (live zero). Aus diesem Grund verwendet man hier das Einheitsstromsignal 4...20 mA. Das live zero-Signal erlaubt zusätzlich eine einfache Leitungsüberwachung (siehe „Fehlerüberwachung“ auf Seite 181). Die typische Hilfsenergie für diese Versorgungstechnik ist 24 V DC.

5.4 Prinzipieller Aufbau von Temperaturmessumformern

Der Messumformer ist ein Messgerät, das ein analoges Eingangssignal in ein genormtes, analoges oder digitales Ausgangssignal wandelt. Je nach Aufgabenstellung steht dieses Signal dann in der Messkette zur weiteren Verarbeitung in einem Regler und/oder zur Anzeige zur Verfügung.

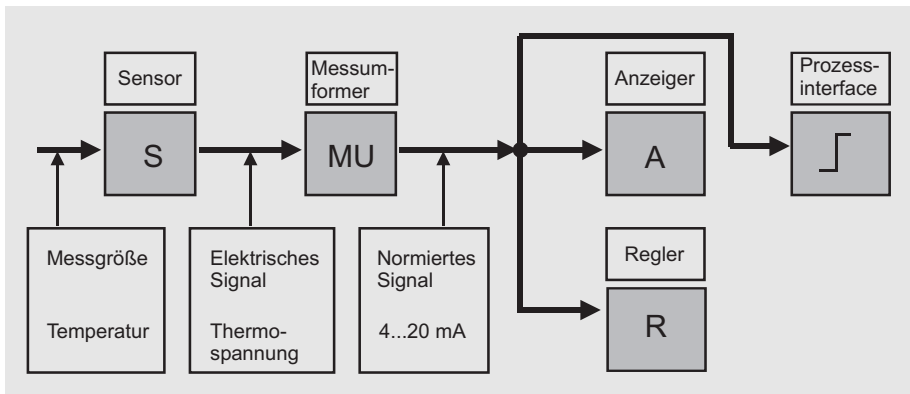


Bild 5-8: Die Komponenten der industriellen Temperaturmesskette

Messumformer für Temperatur arbeiten nach dem Strommessverfahren (Lindeck-Roh-te, besser stromgegekoppelter Verstärker) und liefern meist einen eingepprägten Gleichstrom von 4...20 mA als Ausgangssignal. Die Kennlinien von Widerstandsther-mometern bzw. Thermoelementen sind nicht linear. Eine weitere Aufgabe der Messumformer ist daher die Linearisierung, um ein zur Temperatur proportionales Ausgangssignal zu erhalten. Zusätzliche Anforderungen an einen Temperatur-Mess-umformer sind einstellbare Messbereiche, Fühlerbruchüberwachung, Messkreissignal-kontakt sowie die Bereitstellung von galvanischen Trennungen zwischen Eingang, Ausgang und Energieversorgung (Hilfsenergie).

Temperatur-Messumformer in 4-Leitertechnik

Der nachfolgend abgebildete Temperatur-Messumformer ist sowohl für die mV-Signal-messung (Thermoelemente) als auch für die Widerstandsmessung (Pt100) geeignet. Er formt die Eingangsgrößen in ein proportionales eingepprägtes Gleichstromsignal von 0...20 mA bzw. 4...20 mA oder in ein Spannungssignal von 0...10 V um. Die Anpassung an die Messgröße erfolgt entweder über einen werkseitigen Abgleich oder über austauschbare Messbereichseinheiten.

Der Temperaturmessumformer in 4-Leitertechnik besteht aus einem Schaltregler (1), der die Energieversorgung (Hilfsenergie) für den Messumformer gleichrichtet und stabilisiert. Über eine galvanisch, zum Eingang und Ausgang des Messumformers getrennte Energieversorgung (2), wird die Eingangs- und Ausgangsschaltung mit Spannung versorgt. Zusätzliche Schaltungsgruppen sind Verstärker (3), Messbereichseinheit (4), galvanische Trennung (6), Ausgangsstufe (7) und Grenzsinalgeber (8).

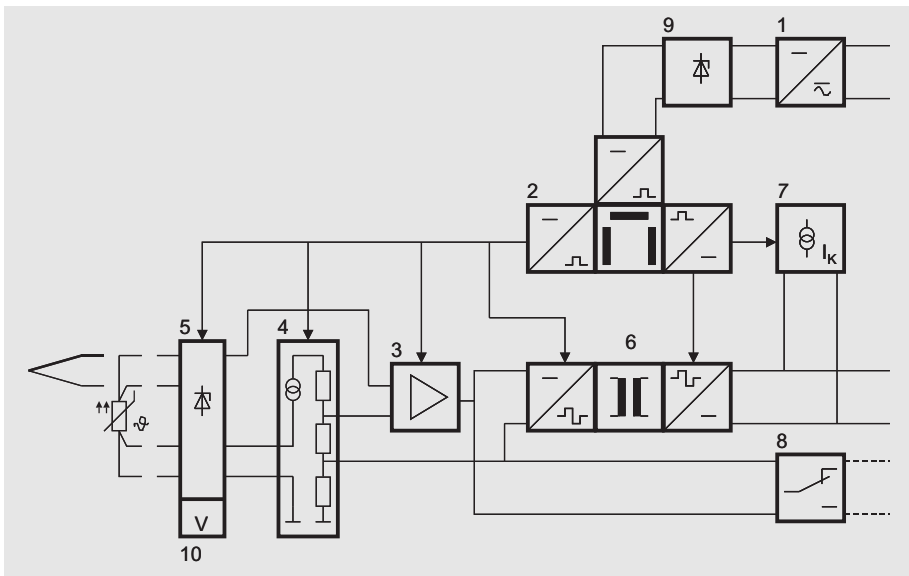


Bild 5-9: Prinzipschaltung eines Temperatur-Messumformers in 4-Leitertechnik

Messumformer in explosionsgeschützter Ausführung sind mit einer Begrenzung (5) für die Eigensicherheit des Eingangsstromkreises, einer Hilfsspannungsbegrenzung (9) und der galvanischen Trennung (6) ausgerüstet. Eine andere explosionsgeschützte Ausführung ist im Eingang und Ausgang eigensicher und hat zusätzlich im Ausgangsstromkreis eine elektronische Strom- und Spannungsbegrenzung. Bei dieser Ausführung ist keine galvanische Trennung zwischen Eingang und Ausgang notwendig.

Das Eingangssignal wird über die Messbereicheinheit (4) dem Verstärker (3) zugeführt, der ein eingepprägtes Gleichstromsignal liefert. Bei eingebauter galvanischer

Trennung (6) wird das Gleichstromsignal zerhackt, durch einen Trennübertrager entkoppelt und durch eine Gleichrichterschaltung mit Bürdenwandler wieder in einen eingprägten Gleichstrom umgeformt. Dieses Signal ist unipolar. Für die Umformung in ein bipolares Stromsignal oder in eine Spannung ist die Ausgangsstufe (7) erforderlich.

Die Vergleichsstellenkorrektur (10) für Thermoelemente überwacht die Temperatur an den Anschlussklemmen des Temperatur-Messumformers und berücksichtigt diese bei der Messung.

Der Grenzsinalgeber (8) hat einen einstellbaren Schalterpunkt in Arbeits- oder Ruhestromschaltung. Bei rein analog arbeitenden Temperatur-Messumformern ist dieser Schalterpunkt mit Hilfe eines Potentiometers einstellbar. Bei digitalen Temperatur-Messumformern werden der Schalterpunkt sowie auch die Temperaturmessbereiche und der angeschlossene Sensor sowie dessen Anschlussschaltung über eine Konfigurationssoftware eingestellt.

Temperatur-Messumformer in Zwei-Leitertechnik

In ihrer elektrischen Funktion können diese Messumformer, von den beiden Anschlussklemmen her gesehen, als passive Widerstands-Zweipole betrachtet werden. Der Messumformer verhält sich wie ein veränderlicher Widerstand, der seinen Wert solange ändert, bis der Strom im Messkreis der Messgröße entspricht. Der Grundanteil von 4 mA dient der Versorgung der elektronischen Schaltung des Messumformers. Diesem Grundanteil ist der Signalpegel von 4..20 mA überlagert. Der Messstrom ist also ein eingprägter Strom mit einem Signalpegel von 16 mA, in dem sich die Information des Messwertes verbirgt.

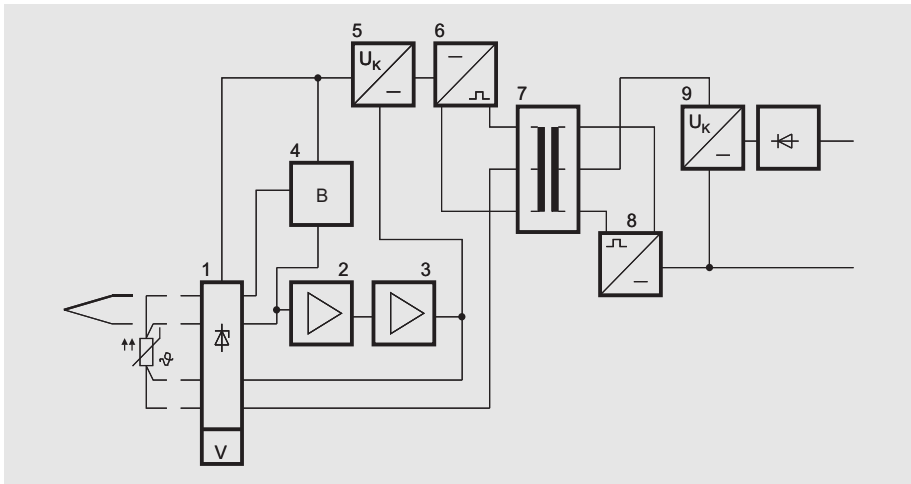


Bild 5-10: Prinzipschaltung eines Temperatur-Messumformers in 2-Leitertechnik

Der dargestellte Messumformer ist für dieselben Eingangssignale ausgelegt, wie der 4-Leiter-Messumformer. Er formt die Eingangsgröße in das eingeprägte Gleichstromsignal von 4...20 mA um. Die Anpassung an die Messgröße und den Messbereich erfolgt durch den werksseitigen Abgleich mit Präzisionswiderständen.

Steilheit und Nullpunkt sind ebenfalls mit Präzisionswiderständen werksseitig abgeglichen. Der Verzicht auf Potentiometer und der komplette Verguss der Elektronik sorgen für eine unübertroffene Robustheit und Langzeitstabilität dieser Ausführungsform. Messumformer für Widerstandsthermometer sowie Messumformer für Thermoelemente sind nach diesem Prinzip aufgebaut.

Das Eingangssignal wird über die Messart und Messbereich bestimmende Eingangsschaltung (1) dem Verstärker (2) zugeführt und in der Endstufe (3) in einen eingepägten Gleichstrom umgeformt. Die Konstantspannungsquelle versorgt die Schaltungsteile mit einer stabilisierten Spannung.

Fehlerüberwachung

Die Fehlerüberwachung übernimmt bei Messumformern eine wichtige Rolle. Sensorbruch, Sensorkurzschluss und Messbereichsüber- und -unterschreitungen müssen sicher erkannt werden. Die Signalisierung dieser Fehler erfolgt ebenfalls über das 4..20 mA-Ausgangssignal. Heute können Messumformer mit einem Grundstrom von $< 3,5$ mA versorgt werden. Somit ist es möglich, Messumformer herzustellen, die auch die Bereiche außerhalb 4..20 mA zur Informationsübertragung nutzen. Mit der Fehlerüberwachung (4) wird das Ausgangssignal bei Kurzschluss oder Unterbrechung des Messkreises wahlweise unter den Anfangs- oder über den Endwert gesteuert.

Messbereichsüberschreitung oder -unterschreitung sind Fehlermeldungen, die einen ungewollten Zustand des zu überwachenden Prozesses signalisieren. Fühlerbruch und Fühlerkurzschluss dagegen sind Fehlermeldungen, die eine Überprüfung und Reparatur des Temperaturfühlers erforderlich machen. Für die Behebung dieser Fehler sind also unterschiedliche Korrekturmaßnahmen erforderlich. Die NAMUR (Normungs-Ausschuss der Mess- und Regelungstechnik) hat daher in einer Empfehlung Bereichsgrenzen außerhalb des 4..20 mA-Messbereichs definiert, die eine sichere Trennung von Messbereichsfehler und Temperaturfühlerfehler erlauben (Bild 5-11). Somit kann bereits im Vorfeld die richtige Korrekturmaßnahme eingeleitet werden.

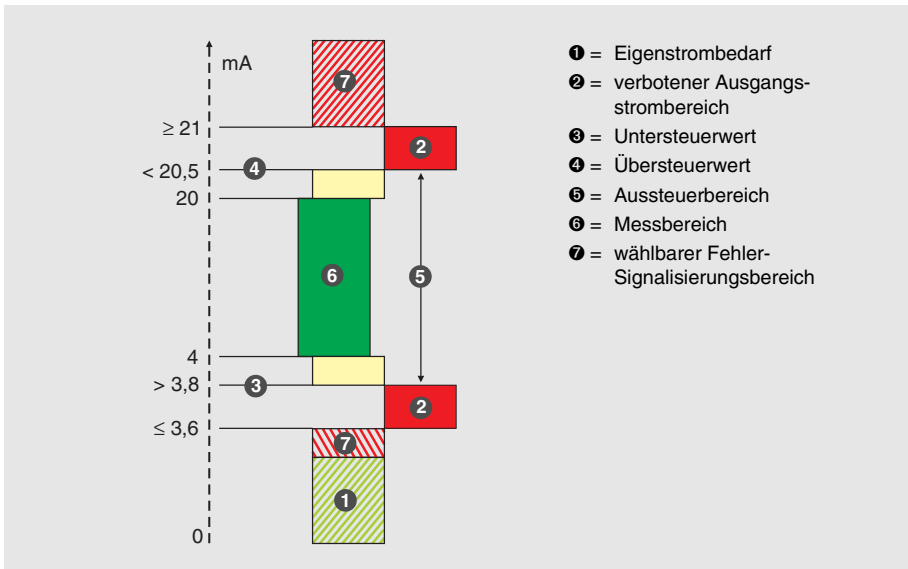


Bild 5-11: NAMUR-Grenzen zur Fehlersignalisierung eines Messumformers in Zwei-Leitertechnik (NAMUR-Empfehlung NE43)

Grundsätzlich kann sowohl der Bereich > 21 mA, als auch der Bereich $< 3,6$ mA zur Fehlersignalisierung genutzt werden. Idealerweise wird das Verhalten im Fehlerfall jedoch möglichst so gewählt, dass es bei einem Fehler nicht zu einer Verletzung nachgeschalteter Grenzwertüberwachungen kommen kann. Darüber hinaus können bei parametrierbaren Messumformern unterschiedliche Fehler oftmals frei zugeordnet werden. So können beispielsweise Fehler, die die Anlage abschalten sollen, auf einen Stromwert > 21 mA gelegt werden. Fehler, die nur einen Alarm auslösen sollen, können auf einen Stromwert von $< 3,6$ mA gelegt werden. Hierbei ist zu beachten, dass ein Ausfall der Hilfsenergie oder ein Bruch der 4...20 mA-Schleife (nicht zu verwechseln mit Bruch des Sensors) immer einen Strom von 0 mA bewirkt. Eine Signalisierung dieser Fehler kann daher immer nur über den Analogeingang der Steuerung erfolgen.

Linearisierung

Die Kennlinien von Thermoelementen und Widerstandsthermometern sind im allgemeinen nicht linear. Der Linearitätsfehler ist in den meisten Fällen größer als alle anderen Fehler (Hysterese, Verstärkung, Alterung usw.). Da die Kennlinien bekannt sind, kann der Messfehler durch Verwendung der Umkehrfunktion der Kennlinien kompensiert werden. In der Praxis zeigt es sich, dass es ausreichend ist, die Kennlinie durch lineare Stücke zu nähern. Wie die Geradenstücke zu wählen sind, hängt vom expliziten Verlauf der Kennlinie ab. In Bild 5-12 wird die Kennlinie $U_A(T)$ zunächst durch eine Gerade oder durch drei lineare Stücke für äquidistante Temperaturen und für optimierte Temperaturabschnitte, für welche die Abweichung der Geraden vom Kennlinienverlauf minimal wird, angenähert.

Für analoge Messumformer beschreitet man den Weg, für jedes Geradenstück einen Operationsverstärker mit definierter Verstärkung zu verwenden. Mit diesem Verfahren kann man Gesamtfehler der Temperatur-Messumformer von etwa 0,1 % des Messbereichs erzielen.

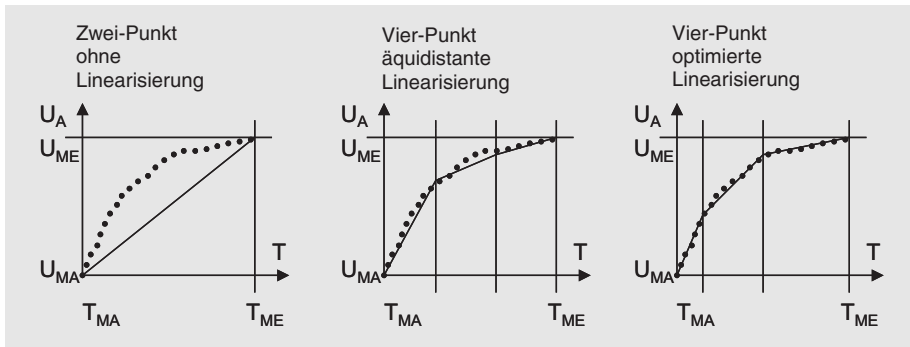


Bild 5-12: Linearisierung einer Sensorkennlinie mit Polygonzug

Bei digitalen Temperatur-Messumformern mit Microcontroller wird die Linearisierung mit Hilfe der Software (Firmware) über die direkte Berechnung der Umkehrfunktion der Polynome der Kennlinie von genormten Temperatursensoren geleistet. Durch diese Technologie ist der Linearisierungsfehler bei digitalen Messumformern geringer als der von analogen.

5.5 Parametrierbare Temperatur-Messumformer

Analoge Messumformer sind für einen Sensortyp und für einen Messbereich fest eingestellt. Bei Wechsel von Sensortyp oder Messbereich muss auch der Messumformer getauscht werden. Ein parametrierbarer Messumformer dagegen ist über die Änderung der Parametrierdaten an seine neue Messaufgabe anpassbar. Für die Anlagenplanung ist es somit möglich, Messumformer einzusetzen, die erst bei Inbetriebnahme auf den benötigten Messbereich eingestellt werden müssen. Dies erleichtert und verkürzt die Zeit der Planung und verringert die Ersatzteilhaltung. Parametrierbare Messumformer helfen die Service- und Wartungsaufwendungen und damit die cost of ownership deutlich zu reduzieren.

Blockschaltbild

Das folgende Blockschaltbild zeigt den typischen Aufbau eines parametrierbaren Temperatur-Messumformers. Der Messumformer enthält zwei Microcontroller. Im Primärkreis sowie im Sekundärkreis arbeitet ein Controller mit einer für den Kreis eigenen Software (Firmware). Im Primärkreis wird der Multiplexer gesteuert, der den Wert des Sensors, der Referenz und der Vergleichsstelle durchschaltet. Die Signale gelangen zum Analog/Digital-Wandler und werden vom Microcontroller ausgelesen. Filterfunktionen und Sensorbruchüberwachungen werden ebenfalls von diesem Controller übernommen. Das digitalisierte Signal gelangt über einen Übertrager auf den Microcontroller des Sekundärkreises. Der Übertrager sorgt unter anderem für die galvanische Trennung zwischen Primärkreis und Sekundärkreis.

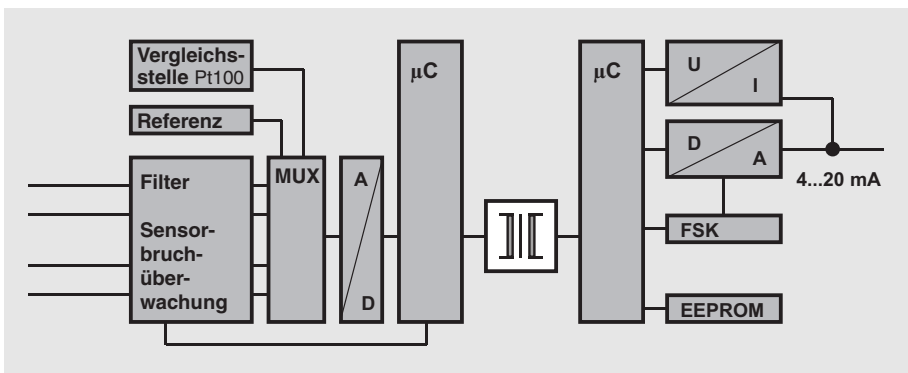


Bild 5-13: Blockschaltbild eines digitalen Temperatur-Messumformers

Der zweite Microcontroller im Sekundärkreis steuert den Digital/Analog-Wandler und ist für den Datenaustausch mit der Kommunikations- und Parametriersoftware zuständig. In einem EEPROM befindet sich die hierfür benötigte Software (Firmware). Ein I/U-Wandler versorgt den Messumformer aus dem 4...20 mA-Signal mit Hilfsenergie. Über das gleiche 4...20 mA-Signal wird mit Hilfe einer FSK-Schnittstelle die Kommunikation zu einem übergeordneten System (PC) sichergestellt.

Wie in der nachfolgenden Softwarestruktur zu erkennen ist, können auch zwei Sensoren an den Messumformer angeschlossen werden. Mittelwert- und Differenzbildung von zwei Sensorsignalen sind so auf dem Ausgangssignal abbildbar.

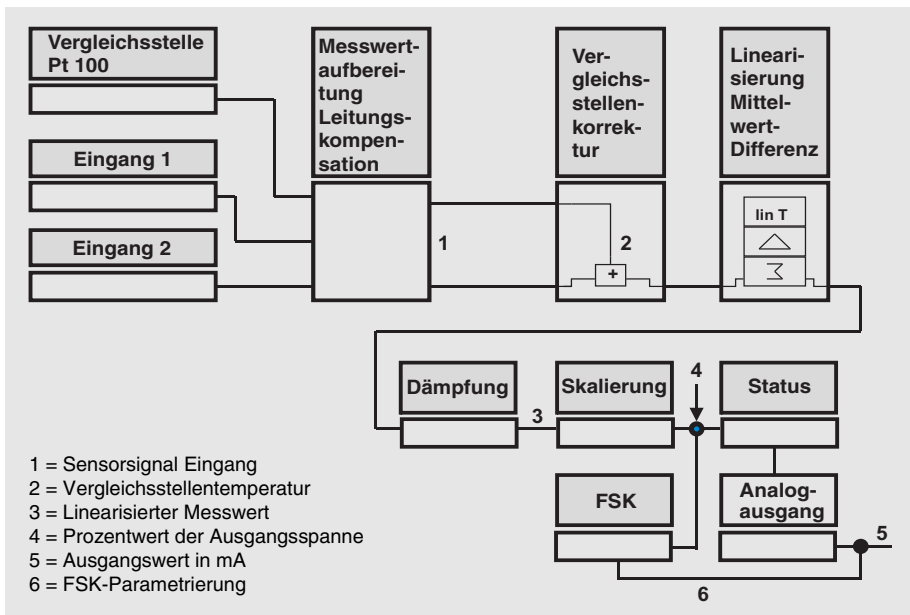


Bild 5-14: Softwarestruktur eines digitalen Temperatur-Messumformers

Kennlinieneingabe

In einem parametrierbaren Messumformer sind alle für die gängigsten Messaufgaben relevanten Kennlinien abgelegt. Hierzu gehören die Grundwertreihen für die üblichen Messwiderstände und Thermopaare, die bei der Einstellung des Messumformers einfach ausgewählt werden.

Ein Pt100-Widerstandsthermometer in der Genauigkeitsklasse Typ B hat eine von der Temperatur abhängige erlaubte Messabweichung, die bei 400 °C mehrere K betragen kann (siehe Bild 3-5). Für Messungen mit Widerstandsthermometern kann die mit der einfachen Auswahl einer Standardkennlinie erreichbare Genauigkeit daher nie besser als die erlaubte Messabweichung des Sensors sein. Parametrierbare Messumformer, wie der TTH300, bieten daher die Möglichkeit die exakte Kennlinie eines zuvor ausgemessenen Temperaturfühlers über die Koeffizienten der Callendar Vandusen-Gleichung einzugeben (Polynom siehe Kapitel 3.1.5).

Für Kennlinien mit monotonen Kurvenformen besteht darüber hinaus die Möglichkeit, eine spezifische Freistilkennlinie mit z. B. 32 oder 64 Stützstellen einzugeben. Dies ermöglicht die Anpassung des digitalen Messumformers an beliebige Sensoren oder die Kalibrierung bzw. Justierung einer gesamten Messkette. Hierbei wird der zu kalibrierende Sensor zusammen mit dem Messumformer und dem dazugehörigen Speisegerät gegen ein „Normal“ verglichen. Das mit einer Abweichung behaftete Ausgangssignal der Messkette wird im Messumformer korrigiert. Somit ist eine Kennlinienabweichung über die gesamte Messkette von $< \pm 0,05 \text{ K}$ möglich.

Diagnose

Parametrierbare Messumformer verfügen über umfangreiche Möglichkeiten zur Erkennung und Signalisierung von Fehlern. Um dem Anwender eine effiziente Fehlerbehebungsstrategie zu ermöglichen, wurden die Fehlerarten durch die NAMUR nach Ursache und Dringlichkeit der Fehlerbehebung klassifiziert. Hierbei wird zwischen Sensor-, Messumformer-, Konfigurations/Kalibrierungs- und Messbereichsfehlern unterschieden. Anhand der jeweils zugeordneten Dringlichkeitsstufe entscheidet der Messumformer welcher Fehler mit höchster Priorität zu melden ist. Leitsysteme verwenden die Klassifizierung zur geeigneten Darstellung der Diagnose in ihren Inbetriebnahme-, Bedien- und Beobachtungs- oder Asset-Managementsystemen. Somit erhält der Anwender immer die wichtigste Information an der richtigen Stelle zum richtigen Zeitpunkt.

Standard
<ul style="list-style-type: none"> • Sensorfehler (Bruch oder Kurzschluss) • Gerätefehler • Messbereichsüber-/unterschreitung • Simulation aktiv
Erweitert
<ul style="list-style-type: none"> • Alarmwertüber-/unterschreitung • Sensor-Backup aktiv (Ausfall Sensor 1 oder Sensor 2) • Nullpunkt-Span-Abgleich aktiv • Versorgungsspannungs-Unterschreitung • Messumformer-Umgebungstemperatur-Überschreitung ($> 85 \text{ °C}$) • Speicher • Anzeiger • Schreibschutz • „Schleppzeiger“ für Sensortemperatur und Elektroniktemperatur

Tab. 5-1: Diagnose und Fehlerklassifizierung des Messumformers TTH300

Driftwarnung und Redundanzumschaltung

Rekalibrierung und Zertifizierung sind übliche Vorgänge für Messstellen, die einer Messmittelüberprüfung unterliegen. Zweikanalige Messumformer, wie der TTH300, können hier helfen, die Verfügbarkeit zu steigern oder Serviceintervalle zu verlängern. Für die Driftwarnung werden Temperaturfühler mit zwei integrierten Messstellen eingesetzt. Neben seiner eigentlichen Messaufgabe vergleicht der Messumformer ständig die Differenz der beiden unterschiedlichen Messstellen. Ist die Abweichung größer als ein vorgegebener Wert, so gibt er selbständig Alarm. Der Anwender wird so durch den Messumformer über die Notwendigkeit einer erneuten Kalibrierung informiert. Die Zahl der manuellen Überprüfungen wird deutlich reduziert, da eine Kalibrierung nur dann durchgeführt werden muss, wenn sie auch wirklich erforderlich ist.

Zur Erhöhung der Verfügbarkeit werden oft Temperaturfühler mit zwei redundanten Sensoren eingesetzt. Bei einkanaligen Messumformern muss bei Ausfall eines Sensors die Messstelle durch manuelles Umklemmen wieder in Betrieb genommen werden. Zweikanalige Messumformer erlauben dagegen den direkten Anschluss von zwei unabhängigen Pt100-Messstellen. Über die integrierte „hot swap“-Funktion wird bei Ausfall einer Messstelle der Fehler durch den Messumformer sicher erkannt und gemeldet sowie sprungfrei auf das redundante Element umgeschaltet. Die Verfügbarkeit der Messstelle wird somit erheblich erhöht, da die Reparatur der redundanten Messstelle erst beim nächsten, geplanten Serviceeinsatz erforderlich ist. Zusammengefasst verringern zweikanalige Messumformer die Service- und Wartungsaufwendungen erheblich.

5.6 Kommunikationsschnittstellen

Parametrierbare Messumformer mit klassischer 4...20 mA-Signalübertragung verfügen über eine digitale Kommunikationsschnittstelle. Diese Schnittstelle wird primär für die Diagnose oder die Anpassung des Messumformers an seine Messaufgabe verwendet, während der analoge Ausgang weiterhin für die schnelle Messwertübertragung genutzt werden kann. Man unterscheidet bei parametrierbaren Messumformern Schnittstellen, die nur zur lokalen Parametrierung oder aber zur Fernparametrierung geeignet sind. Messumformer mit Feldbusschnittstelle dagegen haben in der Regel keinen analogen Ausgang mehr. Messsignal, Diagnose und Konfigurationsdaten werden daher digital über den Feldbus übertragen.

Lokale Parametrierung

Bei lokalen Kommunikationsschnittstellen (LKS) hat der Messumformer häufig neben den Anschlüssen für das 4...20 mA-Signal einen separaten, herstellerspezifischen Parametrieranschluss. Über einen Adapter lassen sich die Geräte direkt an das Parametriergerät anschließen. Bedingung ist, dass Messumformer und Parametriergerät nur wenige Meter voneinander entfernt sind.

Diese Art der lokalen Parametrierung findet man hauptsächlich bei Messumformern, die für die Schaltaumontage vorgesehen sind sowie bei preiswerten Fühlerkopf-Messumformern. Die Parametrierung wird hier üblicherweise nur einmal vor der Inbetriebnahme des Messumformers, z. B. in der Werkstatt, vorgenommen. Eine kontinuierliche Überwachung des Messumformers ist aufgrund der nur lokal nutzbaren Schnittstelle nicht sinnvoll möglich. Änderungen der Parametrierung oder Überprüfungen des Messumformers bei Serviceeinsetzen sind nur mit Hilfe von transportablen Parametriergeräten möglich.

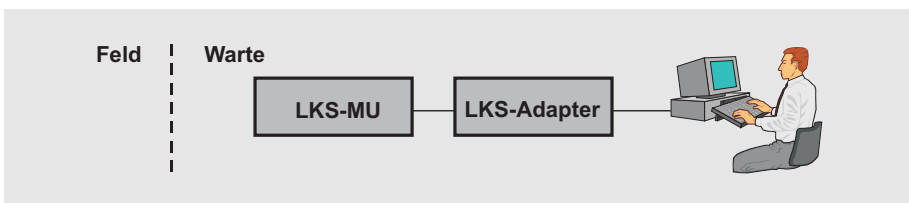


Bild 5-15: LKS-Parametrierschnittstellen

Fernparametrierung

Wenn der Messumformer auch aus großer Entfernung parametrierbar oder überwacht werden soll, dann kommen Messumformer mit FSK-Kommunikation zum Einsatz (FSK = Frequency Shift Keying/Frequenzumtastung). Hierbei wird dem analogen 4...20 mA-Signal eine Frequenz von 1200 Hz bzw. 2200 Hz überlagert. Diese Art der Datenübertragung basiert auf dem Kommunikationsstandard Bell 202.

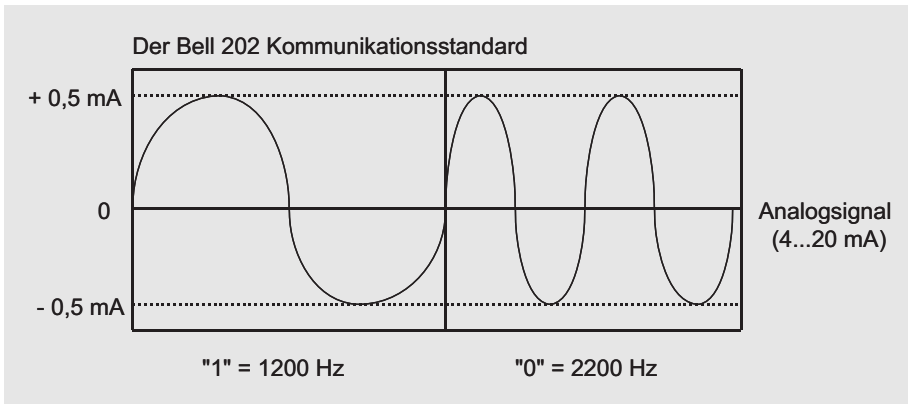


Bild 5-16: Kommunikationsstandard Bell 202

Die beiden Frequenzen beinhalten die Bitinformation 1 bzw. 0. Man erhält eine echte simultane Kommunikation mit einer Reaktionszeit von ca. 500 ms pro Messwert. Weil der Signalmittelwert der Schwingung Null ist, beeinträchtigt die FSK-Kommunikation das analoge Signal nicht. Für die Parametrierung von Messumformern ist ein FSK-Modem notwendig.

Das HART-Protokoll

Das HART-Protokoll (**H**ighway **A**dressable **R**emote **T**ransducer, d. h. Protokoll für bus-adressierte Feldgeräte) arbeitet mit der oben genannten Technik. Mit dem HART-Protokoll steht eine industrieerprobte digitale Kommunikationsmöglichkeit für Feldgeräte zur Verfügung. Weltweit gibt es eine HART-Nutzergruppe. Alle namhaften Firmen der MSR-Technik sind hier Mitglied. HART folgt dem Basis-Referenzmodell für die Kommunikation offener Systeme (OSI), entwickelt von der Internationalen Organisation für Standardisierung (ISO).

Für die einfache Parametrierung von HART-Geräten wird die Punkt-zu-Punkt Betriebsart genutzt. Während der Konfiguration ist es notwendig, dass das angeschlossene HART-Gerät immer mit Hilfsenergie versorgt wird. Hierzu stehen geeignete Konfigurationsadapter oder Speisetrenner zur Verfügung. Das nachfolgende Bild zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Punkt-zu-Punkt Betriebsart

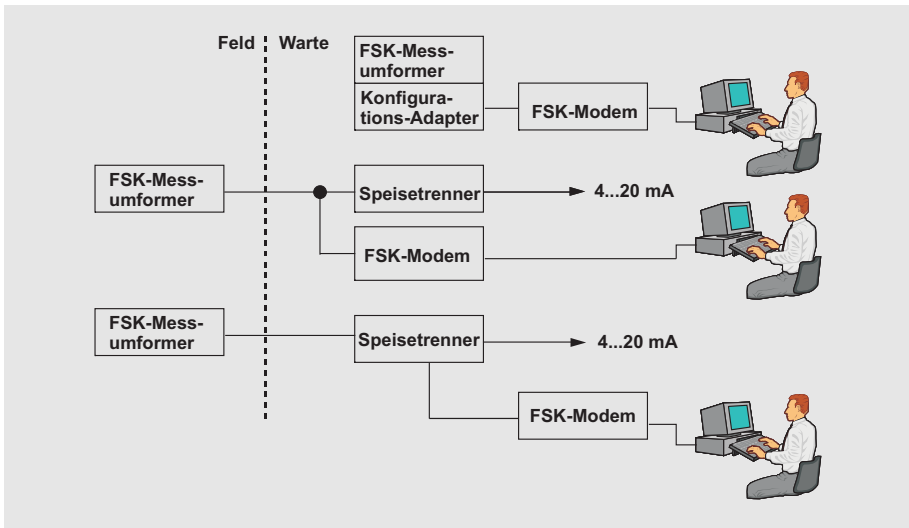


Bild 5-17: FSK-Parametrierung

Die herstellerspezifischen Konfigurationsadapter nehmen den HART-Temperatur-Messumformer auf und versorgen ihn mit einer Hilfsenergie. Das FSK-Modem wird für die Wandlung der FSK-Information in ein PC-taugliches Format genutzt. Mit diesem Aufbau lässt sich der Messumformer noch vor der eigentlichen Inbetriebnahme im Feld ohne große Verdrahtungsaufwendungen in der Warte konfigurieren. Sind die Temperatur-Messumformer bereits im Feld montiert, so ist eine Parametrierung mit einem Handheldterminal (HHT) auch ohne Beeinflussung des 4...20 mA-Nutzsignals möglich. Das FSK Modem ist hierbei im HHT integriert. Die Hilfsenergieversorgung erfolgt über das Speisegerät im Schaltraum.

Gemäß HART-Spezifikation muss immer eine Bürde von mindestens 250 Ω in die 4...20 mA-Schleife eingebaut sein. Hierdurch wird sichergestellt, dass der niedrige Innenwiderstand einer Energieversorgung (Speisegerät) das HART-Signal nicht kurzschließen kann. Bei älteren Speisegeräten oder einfachen Netzteilen muss man daher die Leitung auftrennen und den Widerstand einbringen. Heutige HART-Speisetrenner haben diese Bürde bereits integriert. Außerdem sind sie für die FSK-Signale durchlässig. Ein einfacher Anschluss von Handheldterminals oder FSK-Modems ist daher sowohl auf der Feld- als auch auf der Wartenseite möglich. Viele dieser Speisetrenner besitzen Steckbuchsen, damit zum Anschluss von Terminals oder Modems der Messsignal- oder Speisekreis nicht aufgetrennt werden muss. Sind dagegen in einer Anlage Speisetrenner eingebaut, die keine Durchlässigkeit für FSK-Signale besitzen, so muss das FSK-Modem zwischen Speisetrenner und Temperatur-Messumformer eingebracht werden. In jeder HART-Zusammenschaltung sind zwei Anzeige-Bediengeräte zugelassen. Ein Primäres, im Allgemeinen ein Leitsystem, und ein Sekundäres, z. B. ein Handheldterminal oder ein Laptop.

HART im Multi-Drop-Modus

Im Multi-Drop-Modus sind Messumformer mit FSK-Schnittstelle auch busfähig. Für die Buskommunikation wird ebenfalls die zweiadrige Leitung des 4...20 mA-Signals genutzt. Diese Busbetriebsart erfordert lediglich ein einziges Adernpaar, sowie eine Hilfsenergie für bis zu 15 Feldgeräte. Werden die angeschlossenen Geräte in dieser Betriebsart konfiguriert, wird ihr Ausgangsstrom auf 4 mA festgesetzt. Die Geräte kommunizieren jetzt nur noch digital. Ihr analoges Ausgangssignal ist also nicht mehr zur Signalübertragung verwendbar. Das Einschleifen eines Schreibers oder eines analogen Anzeigers ist demzufolge nicht mehr möglich.

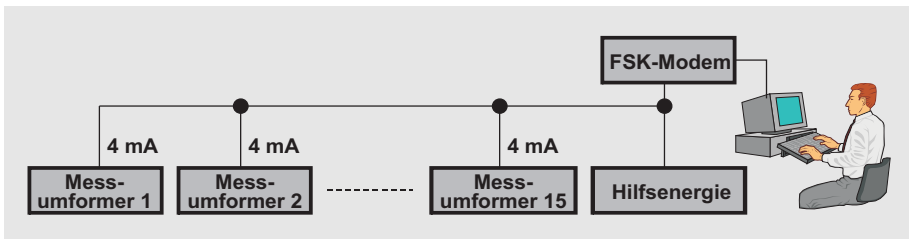


Bild 5-18: Busbetriebsart Multi-Drop

Bei dieser Betriebsart stehen die Übertragung von Parametrier- und Diagnosedaten im Vordergrund. Da über das HART-Protokoll nur etwa 2 Messwerte pro Sekunde digital übertragen werden können, findet diese Anwendung nur in langsamen Prozessen, wie z. B. der Überwachung weit entfernter Anlagen, wie Pipelines oder Tankanlagen statt.

HART-Multiplexer

Über FSK-Multiplexer ist es ebenfalls möglich, mehrere Messumformer an ein einziges Parametriergerät anzuschließen. Es sind so mehrere hundert HART-Feldgeräte von einer zentralen Stelle erreichbar. Hierdurch wird die Inbetriebnahme vereinfacht und Wartung ist im Betriebszustand der Anlage möglich. So lassen sich HART-Messumformer beispielsweise in den Simulations-Mode versetzen, wobei das 4...20 mA-Signal auf einen festen, frei parametrierbaren, Stromwert eingestellt ist. Damit ist es möglich, die Stromschleife zu testen, ohne jedoch den Messwert aus dem Auge zu verlieren. Die Messstellen-Parametrierdaten können auf dem Parametriergerät abgespeichert werden. Fällt ein Messumformer aus, so kann ein Ersatzgerät mit den Daten des defekten Gerätes parametrierbar werden. Für die Erhebung von Diagnose- und Asset Management-Daten ist dies eine brauchbare Funktion. So lassen sich schnelle Reaktionszeiten im Servicefall verwirklichen. Die so erreichbare Funktionalität kann jedoch nur als Zwischenschritt zu Feldbussystemen mit offenen Feldbusprotokollen angesehen werden.

Feldbussysteme

Durch den Einsatz der Feldbus-Technik ändert sich die Art der Instrumentierung. Wurde bei der analogen 4...20 mA-Technik von jedem Messumformer eine zweiadrige Leitung bis in den Schaltraum verlegt, so ist beim Feldbus lediglich eine einzige zweiadrige Leitung für die Anbindung von bis zu 32 Temperatur-Messumformern nötig.

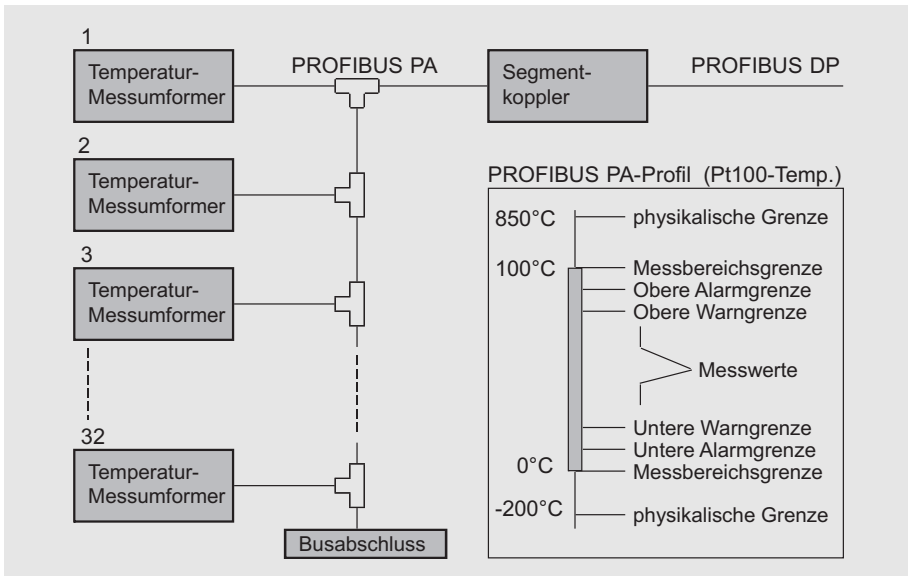


Bild 5-19: PROFIBUS PA-Installation mit PROFIBUS PA-Profil

Die vorstehende Abbildung zeigt am Beispiel des PROFIBUS PA eine Installation von 32 Temperatur-Messumformern. Da es sich hier um einen Feldbus handelt, ist es notwendig, diesen am Ende mit einem Busabschluss zu versehen. Als Übertragungsmedium wird ein verdrehtes zweiadriges Kupferkabel mit Schirm verwendet. Gerätetausch und Erweiterung sind während des Betriebes möglich. Mit der einheitlichen Übertragungsrate von 31,25 Kbaud lassen sich Entfernungen von bis zu 1900 m überbrücken.

Über einen Segmentkoppler können die Temperatur-Messumformer auf einfache Weise in PROFIBUS DP-Netze integriert werden. Die Segmentkoppler haben ein einfaches Übersetzungsverhältnis der Baudrate von 1:3. Somit ist die Übertragungsgeschwindigkeit des PROFIBUS DP bei Verwendung dieser Segmentkoppler auf 93,75 kbit pro Sekunde (93,75 Kbaud) festgelegt. Will man dieses feste Übersetzungsverhältnis zwischen PA und DP umgehen, kann man statt des Segmentkopplers einen DP/PA-Link einsetzen. Dieser lässt, abhängig von der gewählten Leitungslänge des PROFIBUS DP, die volle Übertragungsgeschwindigkeit zu.

Was auf dem europäischen Markt durch die Aktivitäten der PNO (**Profibus-Nutzer-Organisation**) realisiert wird, wird auf dem amerikanischen Markt durch die FF (Fieldbus Foundation) betrieben. Die beiden Organisationen haben ein zueinander nicht kompatibles Busprotokoll. Lediglich die busgespeiste Übertragungsphysik gemäß IEC 1158-2 und die Datenübertragungsrate 31.25 kbit pro Sekunde sind bei PROFIBUS PA und bei FOUNDATION Fieldbus identisch.

Feldbus-Profil

Das PROFIBUS PA-Profil ermöglicht die Austauschbarkeit und Interoperabilität der Feldgeräte von verschiedenen Herstellern. Es ist integraler Bestandteil von PROFIBUS PA und kann bei der PROFIBUS-Nutzerorganisation bezogen werden. Das PA-Profil besteht aus einem Rahmendatenblatt, in dem die für alle Gerätetypen gültige Festlegungen enthalten sind, und Gerätedatenblättern, in denen die für den jeweiligen Gerätetyp spezifischen Vereinbarungen getroffen werden.

Die Profile verwenden standardisierte Funktionsblöcke. Die Beschreibung des Geräteverhaltens erfolgt dabei durch die Festlegung von normierten Variablen, mit denen die Eigenschaften der Messumformer detailliert beschrieben werden. Jedem Gerät muss eine GSD (**Geräte Stamm Daten** oder **Generic Slave Data**) beiliegen, die die spezifischen Gerätedaten beinhaltet. Diese Datei wird benötigt, um das darin beschriebene Gerät in die Buskommunikation einzubinden. Dieser Vorgang wird über Software-Tools von verschiedenen Herstellern unterstützt. Jedes Gerät muss die in den PROFIBUS PA-Profilen festgelegten Parameter bereitstellen.

Messwerte werden in einem Transducer-Block (TR) standardisiert berechnet und über einen AI-Block an den PROFIBUS-Master gesendet. Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Parameter eines AI-Blocks. Für Aktoren werden AO-Blöcke verwendet.

Parameter	Read	Write	Funktion
Out	●		Aktueller Messwert der Prozessvariablen
PV_SCALE	●	●	Skalierung der Prozessvariablen
PV_FTIME	●	●	Anstiegszeit des Funktionsblock-Ausgangs in s
ALARM_HYS	●	●	Hysterese der Alarmfunktion in % des Messbereichs
HI_HI_LIM	●	●	Obere Alarmgrenze
HI_LIM	●	●	Obere Warnungsgrenze
LO_LIM	●	●	Untere Warnungsgrenze
LO_LO_LIM	●	●	Untere Alarmgrenze
HI_HI_ALM	●		Status der oberen Alarmgrenze mit Zeitstempel
HI_ALM	●		Status der oberen Warnungsgrenze mit Zeitstempel
LO_ALM	●		Status der unteren Warnungsgrenze mit Zeitstempel
LO_LO_ALM	●		Status der unteren Alarmgrenze mit Zeitstempel

Tab. 5-2: In PROFIBUS PA-Profilen festgelegte Parameter eines AI-Blocks

Aus den verschiedenen Parametern ist ersichtlich, dass hier nicht nur die Messwerte, sondern auch Warn- und Alarminformationen übertragen werden. Mit der digitalen Übertragung der Messwerte ist zusätzliche eine höhere Genauigkeit erzielbar, da eine Abbildung des Messbereiches auf die Spanne eines 4...20 mA-Stromes entfällt. Man kann somit auch große Messbereiche definieren, ohne eine Genauigkeitseinbuße in Kauf nehmen zu müssen.

Parametrierprogramme

Für die verschiedenen Geräte der unterschiedlichen Hersteller stehen auch spezifische Parametrierprogramme zur Verfügung. Einige Firmen haben für ihre Gerätepalette ein einheitliches Parametrierprogramm. Sie erlauben unter einer gemeinsamen Bedienoberfläche (GMA-Standard) die Parametrierung und das Auslesen von Messwerten und Diagnoseinformationen verschiedener Messumformer.

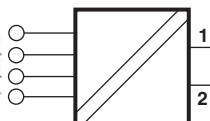
5.7 Temperatur-Messumformer in explosionsgefährdeten Bereichen

Die Möglichkeit der Montage von Messumformern in explosionsgefährdeten Anlagen ist eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz in der chemischen, petrochemischen und verfahrenstechnischen Industrie. Bau, Errichtung und Betrieb müssen hierbei nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik erfolgen und gehandhabt werden. Betriebsmittel, die in explosionsgefährdeten Bereichen der Zone 0 und 1 sowie in staubgefährdeten Bereichen der Zone 20 und 21 eingesetzt werden, müssen eine Baumusterprüfbescheinigung einer benannten Stelle (Notified Body) besitzen. Diese wird ausgestellt, wenn für den Bau der Betriebsmittel die gültigen Normen für die jeweilige Zündschutzart angewendet wurden.

Von der Konzeption des Explosionsschutzes hängt nicht nur der Aufbau der im explosionsgefährdeten Bereich montierten Geräte ab, sie hat auch Konsequenzen für den Aufbau aller anderen Komponenten der Messkette. Bild 5-20 und Bild 5-21 zeigt den Aufbau typischer Messketten für den Einsatz von Temperatur-Messumformern in explosionsgefährdeten Bereichen.

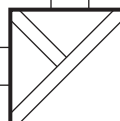
Feld (explosionsgefährdeter Bereich)

Warte (sicherer Bereich)



Zwei-Leitertechnik, Messumformer eigensicher
z. B. II 2(1)G EEx [ia] ib IIC T6

Energieversorgung
24 ... 230 V UC

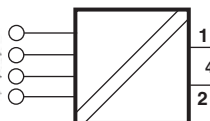


Aktiver Speisetrenner, Eingang eigensicher
z. B. II (2)G [EEx ib] IIC

Eigensichere Installation: Ex-Temperatur-Messumformer (Zwei-Leitertechnik)
mit Ex-Eingangs-Speisetrenner

Feld (explosionsgefährdeter Bereich)

Warte (sicherer Bereich)

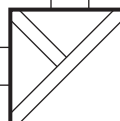


Zwei-Leitertechnik, Messumformer eigensicher
z. B. II 2(1)G EEx [ia] ib IIC T6



Ex-Sicherheitsbarriere
z. B. II (2)G [EEx ib] IIC

Energieversorgung
24 ... 230 V UC

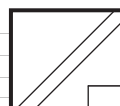
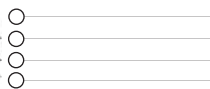


Aktiver Speisetrenner
Nicht-Ex

Eigensichere Installation: Ex-Temperatur-Messumformer (Zwei-Leitertechnik)
mit zwischengeschalteter Ex-Sicherheitsbarriere und -Speisetrenner

Feld (explosionsgefährdeter Bereich)

Warte (sicherer Bereich)



Energieversorgung
24 V DC

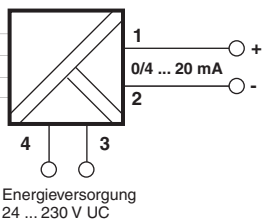
Drei-Leitertechnik, Messumformer eigensicherer Eingang
z. B. II (1)G [EEx ia] IIC oder II (2)G [EEx ib] IIC

Eigensichere Installation: Ex-Temperatur-Messumformer (Drei-Leitertechnik)

Bild 5-20: Einsatz von Temperatur-Messumformern in explosionsgefährdeten Bereichen

Feld (explosionsgefährdeter Bereich)

Warte (sicherer Bereich)

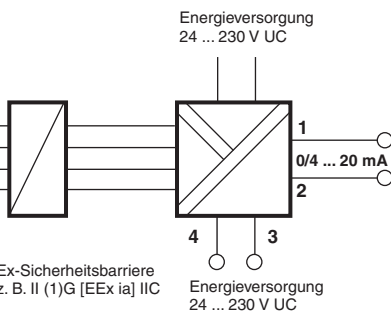


Vier-Leitertechnik, Messumformer eigensicherer Eingang
z. B. II (1)G [EEx ia] IIC oder II (2)G [EEx ib] IIC

Eigensichere Installation: Ex-Temperatur-Messumformer (Vier-Leitertechnik)

Feld (explosionsgefährdeter Bereich)

Warte (sicherer Bereich)



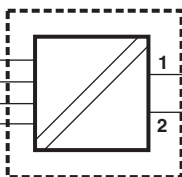
Ex-Sicherheitsbarriere
z. B. II (1)G [EEx ia] IIC

Vier-Leitertechnik, Messumformer
Nicht-Ex

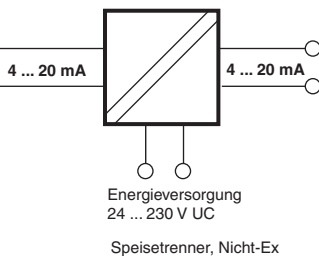
Eigensichere Installation: Ex-Temperatur-Messumformer (Vier-Leitertechnik) mit vorgeschalteter Ex-Sicherheitsbarriere

Feld (explosionsgefährdeter Bereich)

Warte (sicherer Bereich)



Zwei-Leitertechnik, Messumformer mit
druckfest gekapseltem Gehäuse mit
Störfall-Leistungsbegrenzung für den
Temperaturfühler, z. B. II 1/2G EEx d IIC T6



Speisetrenner, Nicht-Ex

Druckfest gekapselter Ex-Temperatur-Messumformer (Zwei-Leitertechnik) mit Speisetrenner

Bild 5-21: Einsatz von Temperatur-Messumformern in explosionsgefährdeten Bereichen

Soll der Messumformer im Ex-freien Schaltraum montiert werden, so reicht es aus, wenn ein eigensicherer Eingangskreis im Messumformer vorhanden ist. Ist dies nicht der Fall, so kann Eigensicherheit durch speziell für Temperaturfühler geeignete Sicherheitsbarrieren erreicht werden. Messumformer für diese Anwendung sind häufig in Drei- oder Vier-Leitertechnik ausgeführt. Da hier die Energieversorgung integriert ist, entfällt die Notwendigkeit eines separaten Speisegerätes. Messumformer für die Feld- oder Fühlerkopfmontage sind immer in Zwei-Leitertechnik ausgeführt. Für die Zündschutzart Eigensicherheit wird die benötigte Hilfsenergie entweder durch Speisegeräte mit integrierter galvanischer Trennung oder durch Netzteile mit vorgeschalteten Barrieren bereitgestellt. Die Aufgabe der Speisegeräte oder Barrieren ist hierbei, die für die Eigensicherheit benötigte Energiebegrenzung sicherzustellen. Für die Montage in der Zündschutzart Druckfeste Kapselung sind dagegen einfache Netzteile und Messumformer ohne besondere Schutzmaßnahmen ausreichend, da der Explosionsschutz in diesem Fall durch druckfest gekapseltes Gehäuse im Feld sichergestellt wird.

Der Einsatz der Messtechnik muss für den Betreiber möglichst ohne Einschränkung erfolgen können. Wenn beispielsweise ein Gerätetausch im explosionsgefährdeten Bereich auch unter Spannung möglich sein soll, dann hat sich die Schutzart Eigensicherheit als vorteilhaft erwiesen. Bei Verwendung von für den Ex-Bereich zugelassenen, eigensicheren Handheldterminals können diese ebenfalls unter Spannung mit dem Messumformer im Feld verbunden werden. Somit ist die zuvor beschriebene Kommunikation auch in Ex-Anlagen ohne Einschränkungen möglich.

Energieversorgung für programmierbare Messumformer

Bei nicht-explosionsgefährdeten Anlagen kann ein Zweileiter-Messumformer aus einer normalen Gleichspannungsquelle von 12...36 V gespeist werden. Oftmals wird hier eine mit Masse verbundene Bürde eingeschleift, an der dann die Signalspannung abgenommen wird. Durch die hierbei entstehende galvanische Kopplung der Messkreise zweier Messumformer kann es jedoch zu Fehlströmen kommen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die angeschlossenen Temperatur-Messumformer keine galvanische Trennung zwischen Ein- und Ausgangskreis besitzen. Um hier Abhilfe zu schaffen ist der Einsatz von Speisegeräten ratsam.

Ein modernes Speisegerät hat vier prinzipielle Aufgaben:

- Einspeisung des eigensicheren Messkreises unter Berücksichtigung des für die HART-Kommunikation erforderlichen Innenwiderstandes
- Entkopplung des eigensicheren Feldstromkreises vom nichteigensicheren Wartenstromkreis
- Galvanische Trennung
- Bürdenwandlung

Das Speisegerät stellt an den Eingangsklemmen die Speisespannung U_S zur Verfügung, die durch den Leitungswiderstand R_L am Messumformer (1) auf U_M reduziert wird. Die Eingangsschaltung (3) hat einen Speiseeingang und ist bei der explosionsgeschützten Ausführung mit einer Ex-Begrenzung (2) bestückt. Ein ausreichender

Innenwiderstand ermöglicht die HART-Kommunikation im Speisekreis, auch ohne dass ein externer 250 Ohm Widerstand vorgesehen werden muss. Das anschließende Kennlinienmodul (4) arbeitet je nach Aufgabenstellung proportional oder linearisierend. Bei neueren Speisetrennern fehlt dieses Modul, da die Linearisierung des Messsignals schon im Messumformer durchgeführt wird.

Das so verarbeitete Signal gelangt über die galvanische Trennstufe (5) zum Ausgangsverstärker (6). Die galvanische Trennung ist für das überlagerte HART-Signal transparent. Die Spannungsversorgung über Schaltregler mit Gleichrichter (8), Ex-Begrenzung (9) und Netzteil (10) ist gegen Eingangskreis bzw. Speisestromkreis und Ausgangskreis galvanisch getrennt.

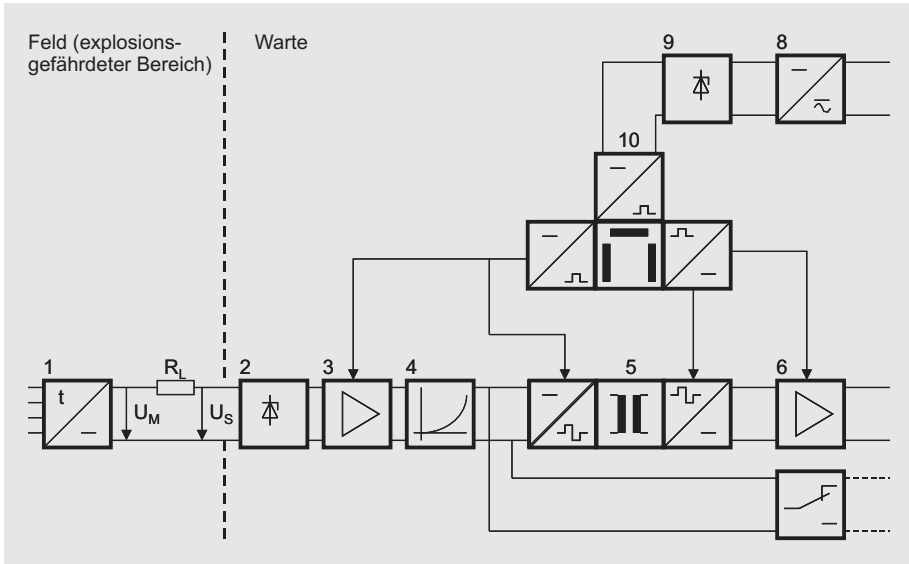


Bild 5-22: Zweileiter-Messumformer und Speisetrenner in Ex-Ausführung

Bei der Zusammenschaltung von Messumformern und Speisegeräten sind folgende Bedingungen einzuhalten:

$$U_M \leq U_S - 22 \text{ mA} \times R_L$$

U_M = Mindestbetriebsspannung des Messumformers

U_S = Mindestspeisespannung des Speisegerätes

R_L = Leitungswiderstand zwischen Messumformer und Speisegerät (Schleife)

Falls weitere Geräte, wie z. B. Anzeiger, in die 4...20 mA-Schleife eingebaut werden, ist der Innenwiderstand (Bürdenwiderstand) dieser Geräte zum Leitungswiderstand R_L zu addieren. Programmierbare Messumformer, wie der TTH300 oder der TTF300, steuern ihre integrierte Anzeige über eine digitale Schnittstelle an. In diesem Fall wird die hierzu benötigte Energie bereits über die Betriebsspannung U_M sichergestellt. Sie braucht daher nicht separat berücksichtigt werden. Als maximal möglicher Strom wird bei der Berechnung der Mindestspannung 22 mA angenommen, da der Bereich oberhalb 20 mA in modernen Messumformern zur Fehlermeldung genutzt wird. (siehe Kapitel 5.4).

Die Eigensicherheit der Zusammenschaltung ist eingehalten, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

eigensicheres Betriebsmittel plus Kabel z.B. ABB-Messumformer		zugehöriges Betriebsmittel z.B. Speisetrenner/SPS-Eingang	
U_i	\geq	U_o	
I_i	\geq	I_o	
P_i	\geq	P_o	
$L_i + L_c$ (Kabel)	\leq	L_o	
$C_i + C_c$ (Kabel)	\leq	C_o	

Das Speisegerät kann als 19"-Steckkarte für den Einbau in 19"-Gehäuse, in Schnapp-technik für die Schienenmontage und in Stecktechnik für den Baugruppenträger eingesetzt werden. Aufgrund der kostengünstigen Verdrahtung tritt die Anwendung der Stecktechnik immer mehr in den Vordergrund.

Energieversorgung für Feldbus-Messumformer

Eine Feldbus-Barriere schützt das Hauptsegment des Feldbusses vor Fehlern angeschlossener Feldgeräte und sichert somit die Verfügbarkeit des Feldbusses. Sie bietet folgende Funktionen und Vorteile:

- Galvanische Trennung zwischen der Hauptleitung und den Stichleitungen schützt vor Problemen, die durch Potentialunterschiede und Potentialausgleichs-
fehlströme auftreten können.
- Die Kurzschlussstrombegrenzung an den Ausgängen verhindert Fehlereinflüsse im Feldbussegment. Das Segment arbeitet weiter.
- Anschlussmöglichkeit von bis zu vier eigensicheren (EEx i) Feldgeräten.
- Kaskadierung von bis zu vier Feldbus-Barrieren pro Feldbussegment.

- Es werden keine zusätzlichen Verteilerboxen benötigt. An der letzten Feldbus-Barriere kann ein schaltbarer Abschlusswiderstand aktiviert werden.
- Installation in explosionsgefährdeten Bereichen (ATEX-Zulassung für Zone 1 und 2).
- Einfacher Ex-Loop-Check durch FISCO-Design.

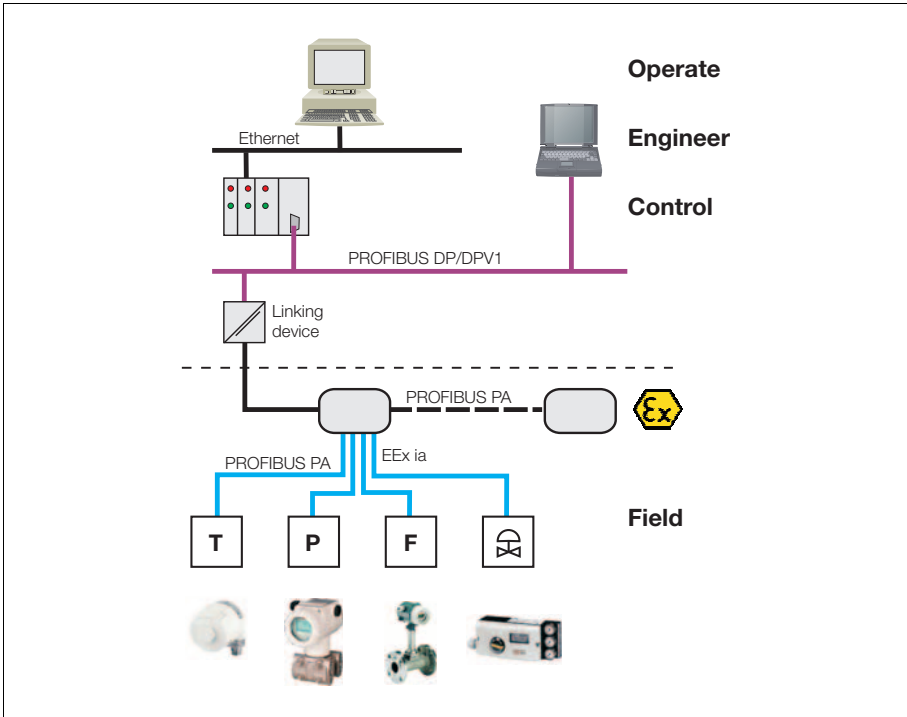


Bild 5-23: Feldbusspeisung mit einer Feldbus-Barriere

5.8 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Für die EMV (Elektro-Magnetische Verträglichkeit) der Temperatur-Messumformer ist die EG-Richtlinie 2004/108 EG (ehemals 89/336/EWG) maßgebend. In der internationalen Norm IEC 61326 werden die Anforderungen gemäß EMV definiert. Die Standards sind in der IEC 801-1 bis IEC 801-6 und IEC 61000-4-1 bis IEC 61000-4-17 definiert.

Zusätzlich zu den Fachgrundnormen findet man auch Produktnormen, die von den verschiedenen Geräten eingehalten werden müssen. Neben den Anforderungen der EMV-Richtlinie gibt es auch die besonderen Anforderungen der chemischen Industrie, welche in der sogenannten NAMUR-Empfehlung (NE 21) festgelegt sind und die Anforderungen der Fachgrundnormen einschließen bzw. diese überschreiten.

Die häufigsten Ursachen von Störungen sind elektrischer oder elektromagnetischer Natur:

- Schwankungen oder kurzzeitige Unterbrechung der Versorgungsspannung
- Entladung statischer Elektrizität
- Elektromagnetische Felder
- Transiente Überspannungen von Impulsgruppen (Burst) auf der Versorgungs- oder Signalleitung
- Transiente Überspannungen von energiereichen Einzelimpulsen

Verursacher von Störsignalen sind oft elektrische und elektronische Schalter, Relais, Schütze, Frequenzumrichter, Leuchtstoffröhren, Magnetventile, Motoren, Funkgeräte, aber auch atmosphärische Störer, z. B. Blitze. Insbesondere die Entladung statischer Elektrizität und elektromagnetische Felder werden oftmals durch den Produktionsprozess selbst hervorgerufen.

Das Störverhalten beurteilt die Reaktion eines Gerätes auf eine Störung, und zwar nach drei Bewertungskriterien:

A. keine Funktionsminderung

Bei vorwiegend analogen Geräten sind erkennbare Beeinträchtigungen innerhalb der Fehlergrenzen zulässig. Rein digitale Geräte dürfen keine erkennbaren Auswirkungen zeigen.

B. Funktionsminderung

Es wird die Beeinträchtigung der Funktion während der Zeitdauer der Störeinwirkung ermittelt. Funktionsminderungen sind während dieser Dauer zulässig. Danach muss sich der Ursprungszustand jedoch wieder selbständig und ohne bleibende Schäden herstellen.

C. Funktionsverlust

Ermittelt wird der Funktionsverlust mit Beginn der Störeinwirkung bis zum automatischen Wiederanlauf oder bis zur manuellen Wiederinbetriebnahme. Bei Über- oder Unterschreiten der Toleranzwerte müssen die Geräte einen automatischen Wiederanlauf ermöglichen oder einschaltbereit in definierter Sicherheitsstellung stehen.

Für die Unterdrückung von elektromagnetischen Störungen ist bei der Installation bauseitig für entsprechende Maßnahmen zu sorgen.

Maßnahmen	Vorgaben und Empfehlungen
Stromversorgung	<ul style="list-style-type: none">– galvanisch getrennt– symmetrisch– erdfrei
Montage	<ul style="list-style-type: none">– Energie- und Signalleitungen getrennt verlegen– Messgeräte nicht in der Nähe von elektromagnetischen Störern montieren– Bei Installation im Freien für ausreichenden Blitzschutz sorgen
Kabelschirm	<ul style="list-style-type: none">– Für ausreichenden Potenzialausgleich sorgen– Ausgleichströme im Schirm ausschließen– Kabelschirm bevorzugt beidseitig auflegen– Kabelschirm großflächig auf kürzestem Weg über die Gerätegehäuse erden

Moderne elektronische Messumformer haben in der Regel das bestmögliche Störverhalten A. Sie entsprechen auch den erhöhten NAMUR Anforderungen und Richtlinien bzw. übertreffen diese sogar. Bei schlechtem Potenzialausgleich oder EMV-belastetem Anlagenpotenzial sind die zugesagten Eigenschaften jedoch nicht immer leicht erreichbar. In dem Fall kann es helfen, den niederohmigen Schirm vom Anlagenpotenzial galvanisch getrennt auszuführen und nur einseitig auf Erdpotenzial zu legen.

5.9 Temperatur-Messumformer in der Interface-Technik

Häufig reicht die einfache Funktionalität der Ein-/Ausgabebaugruppen von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) oder Prozessleitsystemen (PLS) nicht aus, so dass eine zusätzliche Signalanpassungsebene erforderlich wird. Dies kann zum Beispiel der Fall sein, wenn Temperaturmessungen, Messumformerspeisungen, galvanische Trennungen, Bürdenanhebungen oder eigensichere Signalstromkreise für explosionsgefährdete Bereiche benötigt werden. Diese Funktionen werden durch geeignete Interface-Baugruppen bereitgestellt.

Analoge Interface-Technik

Bei der analogen Interface-Technik benötigt man für jedes Signal eine 2-adrige Leitung. Die übergeordneten Systeme besitzen jedoch oft 8- oder 16-kanalige Eingangskarten. Um auf die Eingangskarten dieser Systeme zu gelangen, ist eine systemeigene Rangierung notwendig. Werden die Signalleitungen über eine größere Entfernung verlegt, so rangiert man die einzelnen Leitungspaare auf Stammleitungen. Um den Verdrahtungs- und Rangieraufwand zu reduzieren, setzt man Interface-Baugruppen auf vorverdrahteten Modulträgern ein. Verdrahtungsebene und Funktionsebene sind zunächst voneinander getrennt. Ohne Module ist somit eine schnelle Überprüfung der Verdrahtung möglich. Einfache Stecktechnik erlaubt anschließend die schnelle Bestückung der Modulträger bzw. der Einzelsockel.

Digitale Interface-Technik

In der Automatisierungs- und Verfahrenstechnik müssen die benötigten Feldsignale oft aus weit verteilten Anlagenbereichen gesammelt werden. Mit der klassischen, analogen Punkt-zu-Punkt-Verdrahtungstechnik, bei der alle Signale in der Regel über 2 Leitungen übertragen werden, sind lange Kabelwege, eine Vielzahl von Verteilerkästen und Rangierverteiler erforderlich. Dieser Aufwand ist bei der dezentralen, digitalen Interface-Technik (Remote I/O) erheblich reduziert.

Alle Ein-/Ausgabemodule sind busfähig ausgeführt, so dass sie über einen Buskoppler (Gateway) mit dem offenen Feldbus verbunden werden können. Auf dem Modulträger werden die Daten über einen schnellen, redundanten internen Bus zwischen dem Buskoppler und den E/A-Modulen ausgetauscht. Die Rangierung, also die Zuordnung der Feldsignale, erfolgt dann per Software. Der steckbare Buskoppler ermöglicht die Anpassung an den verwendeten Feldbus. Jeder Buskoppler enthält ein komplettes Prozessabbild aller angeschlossenen Feldsignale. Das übergeordnete Prozessleitsystem oder die Steuerung kommunizieren nur über diesen externen Feldbus mit den Buskopplern. Aufwändige Verdrahtung und Rangierung können entfallen.

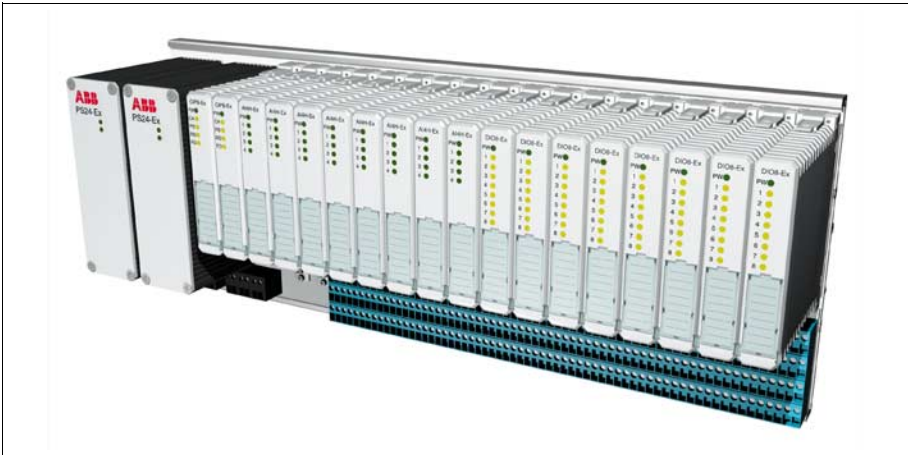


Bild 5-24: Digitale Interface-Baugruppen S900

Buskoppler und die nachgeschalteten Ein-/Ausgangsmodule bilden einen Knoten. Größere Teilnehmerzahlen werden durch den Aufbau weiterer Knoten erreicht. Die Zykluszeiten für den internen Kommunikationsbus liegen im Bereich von wenigen Millisekunden. Die Anzahl der Knoten, Buslänge und Zykluszeit der externen Busstruktur hängen von dem verwendeten Bussystem ab. Jeder Buskoppler stellt einen Teilnehmer dar. Um die Teilnehmerzahl am Feldbus zu erweitern, wird der Bus von einem zum anderen Buskoppler (Busknoten) weitergeführt. Um die Verfügbarkeit der Ein-/Ausgabemodule zu erhöhen, kann man den Feldbusanschluss redundant auslegen. Die analogen Ein-/Ausgabebaugruppen sind für die HART-Kommunikation ausgelegt. Alle wichtigen Messgrößen, Diagnose und Konfiguration der angeschlossenen HART-Feldgeräte sind auch über den Bus verfügbar und können im Prozessleitsystem bereitgestellt werden. Das Parametrieren von HART-Messumformern direkt aus dem Leitsystem über den Feldbus, durchgängig durch die Remote-I/O-Ebene bis zu den HART-Geräten, stellt damit kein Problem dar. Die an ein Remote-I/O-System angeschlossenen Temperatur- oder HART-Messumformer sind somit den Feldbus-Messumformern in ihrer Funktionalität vergleichbar.

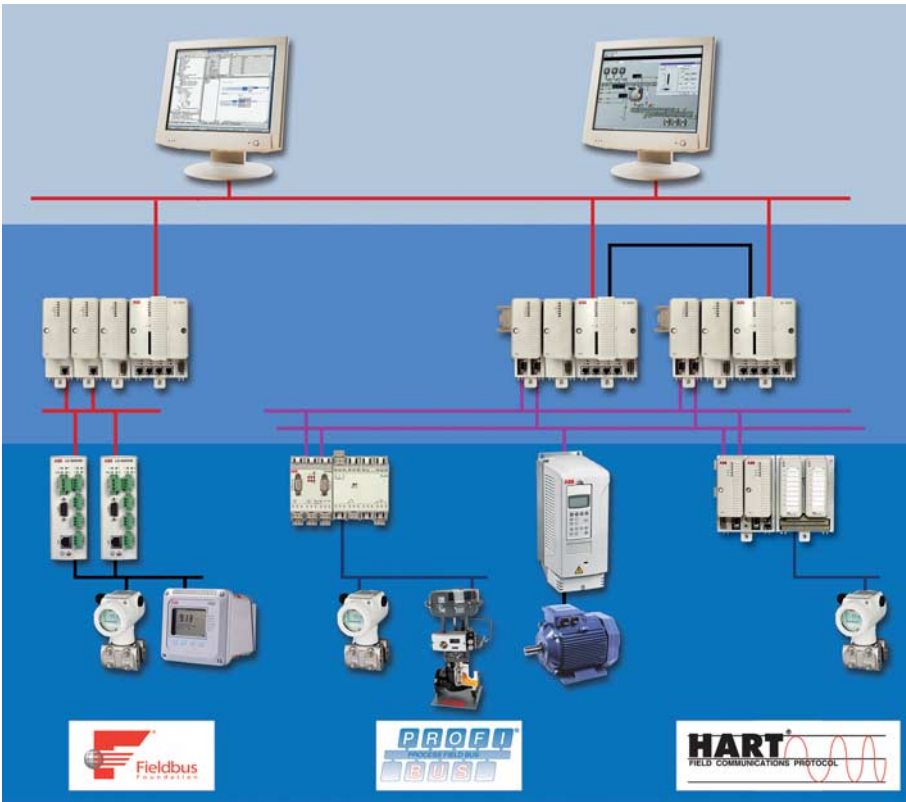


Bild 5-25: Dezentrale redundanzfähige Feldbus-Interfacebaugruppe
(mit integrierter HART- oder Feldbus-Kommunikation)

Die anzuschließenden Sensoren und Aktoren werden direkt aus den Modulen mit Hilfsenergie versorgt. Die Verdrahtung einer separaten Energieversorgung ist somit nicht erforderlich. Das höchstmögliche Maß an Sicherheit und Störunempfindlichkeit wird durch die galvanisch von Bus- und Energieversorgung getrennten, kurzschlussfesten Ein- und Ausgänge sichergestellt. Moderne Remote-I/O-Systeme, wie die S900, verfügen darüber hinaus über ein umfangreiches Redundanzkonzept.

In Verbindung mit Anwendungen in explosionsgefährdeten Bereichen können die dezentralen Interface-Baugruppen auch als Ex-Trennstelle eingesetzt werden. Moderne Systeme sind auch für die direkte Montage in Zone 1 geeignet.



Bild 5-26: Kompaktes Remote I/O-System CB220 für Zone 1-Montage

5.10 Hochgenaue Temperaturmessungen mit parametrierbaren Messumformern

Ist eine Absolutgenauigkeit von $0,1 \text{ K}$ ($\pm 0,05 \text{ K}$) gefordert, so ist dies nur durch die komplette Kalibrierung der gesamten Temperaturmesskette realisierbar. Dies wird bei Bewertung aller an der Messkette beteiligten Messgrößen deutlich.

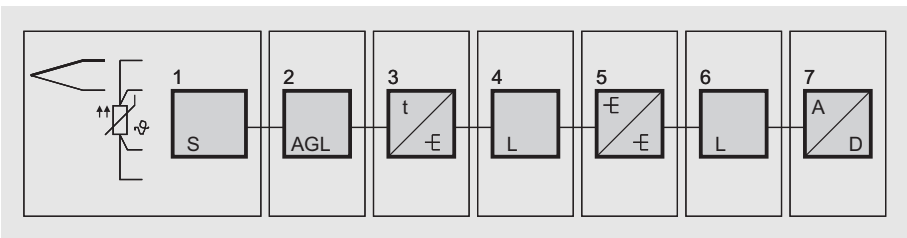


Bild 5-27: Industrielle Temperaturmesskette vom Sensor bis zur Digitalisierung

In einer typischen Messkette wird die Temperatur von einem Sensor (1) erfasst. Dann wird das Temperatursignal mit Hilfe von elektrischen Leitungen (2) zu einem Messumformer (3) geführt. Dieser verstärkt das Signal und gibt es wiederum über Leitungen (4) an einen Speisetrenner (5) weiter. Über eine weitere Verdrahtung (6) gelangt das Signal dann zum Analog/Digital-Wandler (7). Erst ab dieser Wandlung liegt das

Messsignal in digitaler Form vor und kann nicht weiter verfälscht werden. Tab. 5-3 zeigt die in der Prozessindustrie auftretenden typischen, statischen Fehler einer 0..400 °C-Messung mit einem Widerstandsthermometer in 3-Leiterschaltung.

	Messunsicherheit	Ursachen	Typ. Fehler
1	Sensor	Toleranzklasse A nach EN 60751, bei 40 °C	0,95 K
2	Wärmeabfluss	Verhältnis Eintauchtiefe zu Durchmesser = 7 (siehe Kapitel 6.1.4, Bild 6-2)	0,4 K
3	Eigenerwärmung	Messstrom 0,3 mA	0,05 K
4	Messleitungen	3-Leiterschaltung, Störung	0,1 K
5	Messumformer	Genauigkeit 0,1 %	0,4 K
6	4...20 mA-Schleife	Störung	0,05 K
7	Speisetrenner	Genauigkeit 0,25 %	1 K
8	4...20 mA-Schleife	Störung	0,05 K
9	Eingang in PLS/SPS	Genauigkeit 0,1 %	0,4 K
	Gesamtunsicherheit	Summe der Fehlerquadrate	1,55 K

Tab. 5-3: Messunsicherheit einer industriellen Temperaturmessung 0...400 °C

Bei der Messung mit Thermoelementen sind zusätzlich die durch die Ausgleichsleitung und die Vergleichsstelle verursachten Fehler zu berücksichtigen. Die Ausgleichsleitung hat bis zu einer bestimmten Temperatur die gleiche Thermospannung wie das Elementmaterial selbst. Oberhalb 100 °C können erhebliche Abweichungen auftreten. Das trifft vor allen Dingen dann zu, wenn die Werkstoffe der Ausgleichsleitung so genannte Sonderlegierungen sind. Aber auch in dem zulässigen Umgebungstemperaturbereich unterliegen die Ausgleichsleitungen einer Toleranz. In der EN 60584 werden diese Grenzabweichungen der einzelnen Ausgleichsleitungen dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass je nach Element und damit Leitungstyp eine Grenzabweichung von mehreren µV und damit mehreren K möglich ist. Je nach Genauigkeit sowie der erreichbaren thermischen Ankopplung an die Vergleichsstelle ist nochmals ein zusätzlicher Messfehler von 0,1...0,5 K zu berücksichtigen.

Neben diesen statischen Fehlern sind dynamische Fehler aufgrund der endlichen Ansprechzeit industrieller Temperaturfühler (siehe Kapitel 3.4.4) und von der Umgebungstemperatur abhängige Fehler der Messtechnik zu berücksichtigen. Der größte Beitrag zu den Umgebungstemperaturfehlern ist hierbei von dem im Feld üblicherweise sehr hohen Temperaturschwankungen ausgesetzten Messumformer zu erwarten. Typische Werte sind in dem angenommenen Beispiel 0,02K pro 10K Umgebungstemperaturschwankung.

Fühlerkopf-Messumformer bieten aufgrund ihrer Nähe zum Sensor die geringsten Störungen auf die empfindlichen Messleitungen. Ihre Anwendung kommt aufgrund ihres nicht vernachlässigbaren Umgebungseinflusses jedoch nur dann in Frage, wenn nur geringe Temperaturschwankungen im Kopf des Temperaturfühlers zu erwarten sind. Andernfalls sind Feld-Messumformer für hochgenaue Messungen zu bevorzugen. Bei Verwendung des digitalen Signalausgangs eines Feldbus-Messumformers entfallen

die Fehler der analogen Signalverarbeitung im Speisetrenner bzw. in den analogen Eingangskreisen von Prozessdatenverarbeitungsgeräten. Da der größte Beitrag des statischen Fehlers jedoch auf den Sensor selbst zurückzuführen ist, lassen sich auch mit Feldbus-Messumformern keine deutlichen Verbesserungen der Gesamtgenauigkeit erreichen. Hochgenaue Messungen lassen sich nur mit Temperatur-Messumformern realisieren, die die statische Messunsicherheit der gesamten Messkette kompensieren können.

Rekalibrierung und Zertifizierung sind übliche Vorgänge für Messstellen, die einer Messmittelüberprüfung unterliegen. Zur Kompensation des statischen Fehlers wird der Temperaturfühler an möglichst vielen verschiedenen Temperaturreferenzpunkten vermessen. Die durch die vergleichende Messung gegenüber einer Präzisionstemperaturmessanlage ermittelte Kennlinie wird nun in den nichtflüchtigen Speicher des Fühlerkopf-Messumformers geladen. Die Kalibrierung von Feld-Messumformern ist etwas aufwändiger, da Sensor und Messumformer immer paarweise vermessen werden müssen, wenn alle Fehler der Messkette kompensiert werden sollen.

Genau genommen müssen bei analogen Messkreisen auch die Eingangskreise der Prozessdatenverarbeitung und die gegebenenfalls erforderlichen Speisetrenner in die Kalibrierung einbezogen werden, da sie in nennenswertem Umfang zum Gesamtfehler beitragen (siehe Tab. 5-3). In der Praxis wird dies jedoch aufgrund des damit verbundenen Aufwandes selten gemacht. Kalibrierte Feldbus-Messumformer sind hier besonders vorteilhaft, da durch die digitale Signalübertragung weitere Messwertverfälschungen ausgeschlossen werden.

Die verbleibende Messunsicherheit ist somit nur noch von der Genauigkeit der Kalibriermittel und der Auflösung der Korrekturkennlinie abhängig. Die so erreichbare Messunsicherheit des Temperaturfühlers liegt im Temperaturbereich von 0...400 °C bei ± 50 mK. Die genannte Messunsicherheit lässt sich mit einem DKD-Zertifikat dokumentieren (siehe Kapitel 6.2).

6 Genauigkeit, Kalibrierung, Eichung, Qualitätssicherung

6.1 Genauigkeit

6.1.1 Allgemeine Grundlagen

Wie die Messung jeder anderen Größe, lässt sich auch eine Temperaturmessung nicht mit beliebiger Genauigkeit durchführen. Das Ergebnis der Messung hängt nicht nur von der zu bestimmenden Messgröße selbst ab, der Messvorgang unterliegt vielmehr einer großen Anzahl weiterer Einflussfaktoren, die ihrerseits wiederum das Messergebnis beeinflussen.

Vorkommende Fehlereinflüsse können sein:

- Fehler, resultierend aus der Unvollkommenheit der verwendeten Messgeräte
- Fehler, resultierend aus der Beeinflussung der (ungestörten) Messgröße durch die Messvorrichtung, insbesondere den Messwertaufnehmer (Sensor)
- Fehler, resultierend aus Fehlereinflüssen, die durch Unzulänglichkeiten des verwendeten Versuchsmodells (besonders bei der Auswertung) verursacht werden
- Fehler zufälliger Art, resultierend aus nicht vorhersehbaren Einflussfaktoren der „Versuchsumwelt“.

Bezeichnet man den „fehlerfreien Wert“ einer Messgröße als den „wahren Wert“ (dieser ist unbekannt, und man versucht ihn durch die Messung zu bestimmen), so werden alle Messergebnisse, die man bei wiederholter Messung unter gleichen Bedingungen und bei ausreichend hoher Auflösung der Messvorrichtung erhält, innerhalb eines bestimmten Bereichs um diesen wahren Wert schwanken (Schwankungsbereich). Der jeweilige Messfehler der Einzelmessung definiert sich dabei als der Unterschied zwischen dem gemessenen Wert und dem (eigentlich unbekannten) wahren Wert.

Messfehler = gemessener Wert - wahren Wert

Es stellt sich die Frage, welcher der vorliegenden Messwerte dem wahren Wert am nächsten kommt und somit als Ergebnis der Messung dient? Die einfachste Annahme geht davon aus, dass der arithmetische Mittelwert aller erhaltenen Messergebnisse, dem wahren Wert sehr nahe kommt und als Messergebnis verwendet werden kann. Dieser Wert wird als der **richtige Wert**, gelegentlich auch als der **beste Schätzwert** bezeichnet und berechnet sich zu:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$$

n = Anzahl der Einzelmessungen
q_i = Ergebnis der Einzelmessungen

Die Breite des beschriebenen Schwankungsbereichs in dem die erzielten Messergebnisse anzutreffen sind, hängt dabei von der „Qualität“ (Güte) der Messung ab und

macht eine ungefähre Aussage, über die dem Messergebnis anhaftende Unsicherheit der Messung (Messunsicherheit). Es ist das Know-how des Messtechnikers, die Messaufgabe so zu lösen, dass die Anzahl und der Umfang der unerwünschten Störeinflüsse auf die Messung, auf ein Mindestmaß beschränkt bleibt. Bei einer qualitativ hochwertig durchgeführten Messung wird die Schwankungsbreite der Messergebnisse klein sein und die resultierende Messunsicherheit ebenfalls.

6.1.2 Ermittlung (Abschätzung) von Messunsicherheiten

Beim Vergleichen von Messwerten, z. B. bei einer Abnahmeprüfung, ist neben dem eigentlichen Messwert auch eine Angabe über seine Verlässlichkeit wichtig. Hier hat sich allgemein die Angabe der Messunsicherheit als Nachweis für die Qualität einer Messung etabliert. Die Bestimmung der Messunsicherheit muss sich in jedem Fall auf technisch fundiertes Wissen stützen, d. h. auf objektive Fakten. Trotzdem bleibt das Ergebnis subjektiv behaftet, da es sich um ein Urteil handelt, das auf einer Anzahl von Annahmen und Abschätzungen basiert. Ein solches Qualitätsurteil wird im allgemeinen aber dann akzeptiert werden, wenn die Art und Weise transparent ist, wie das Urteil zustande kommt. Zur Abschätzung von Messunsicherheiten werden Messabweichungen üblicherweise in die Gruppen

- Zufällige Messabweichungen (statistische Fehlereinflüsse) und
- Systemetische Messabweichungen

unterteilt.

Systematische Messabweichungen sind vorhersagbar und korrigierbar. Sie treten unter gleichen Messbedingungen immer mit gleichem Betrag und Vorzeichen auf. Ein typisches Beispiel für eine systematische Messabweichung ist die Messung mit einem unkalibrierten Messmittel. So wird ein Digitalmultimeter, welches in seinem Messbereich von 0,2 V einen Messfehler von -0,1 % hat, eine Spannung von exakt 200 mV immer zu 199,8 mV anzeigen, also um -0,2 mV zu gering.

Eine Messung mit dem beschriebenen Gerät erzeugt zunächst ein unberichtigtes Messergebnis. Dieses Messergebnis kann, z. B. durch Angaben aus dem Kalibrierschein des Gerätes, korrigiert und somit von systematischen Messfehlern bereinigt werden.

Statistische Messabweichungen sind zufällige Messabweichungen und somit in der Richtung ihres Auftretens nicht vorhersagbar oder korrigierbar. Die Größe ihres Einflusses kann aber durch Mehrfachmessung unter gleichen Bedingungen (Wiederholbedingungen) bestimmt und durch die Ermittlung der Verteilungsfunktion der erhaltenen Messwerte beschrieben werden. Unterliegt eine Messung mehreren zufälligen Fehlereinflüssen, so wird diese Tatsache auch Einfluss auf die Verteilungsfunktion der Messwerte haben. Bei 3 und mehr zufälligen Fehlereinflüssen kann davon ausgegangen werden, dass sich als Verteilungsfunktion eine Annäherung an die Normalverteilung (Gaußsche Glockenkurve) einstellen wird. Beschreibungsgrößen für diese Normalverteilung ist der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ .

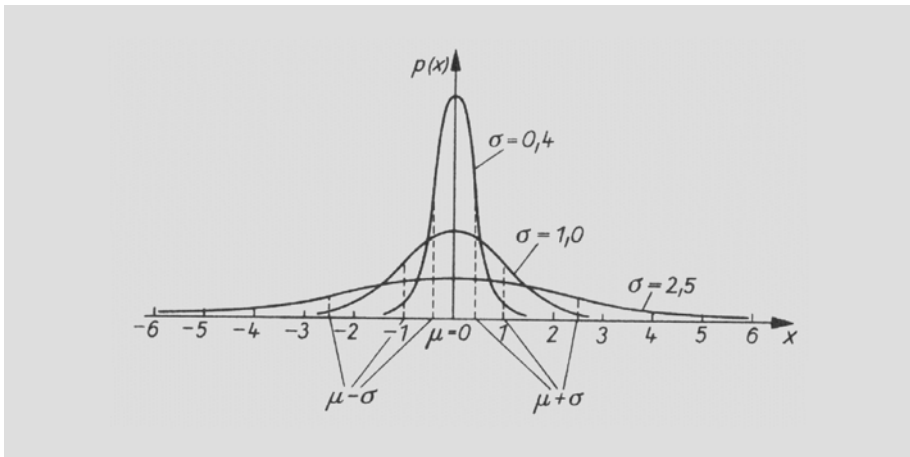


Bild 6-1: Normalverteilung (Gaußsche Glockenkurve)

Bild 6-1 zeigt die typische Form einer Normalverteilung für gleiches μ und unterschiedliche σ -Werte. Dabei beschreibt die Verteilungsfunktion $p(x)$ die Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit), mit der die Einzelmesswerte X_i im Bereich um den Mittelwert μ auftreten. Für alle Kurven gilt, dass im Bereich $\pm\sigma$ um den Mittelwert μ , sich 68,3 % aller Messwerte befinden; σ macht also eine qualifizierte Aussage über die Streubreite der erhaltenen Messergebnisse. Erweitert man den σ -Bereich um den Faktor k ($k > 1$, Erweiterungsfaktor), so sind mehr Messwerte im angegebenen Bereich um den Mittelwert zu erwarten.

Es ist für die Angabe einer Messunsicherheit üblich, einen Erweiterungsfaktor von $k = 2$ zu verwenden. Innerhalb des damit definierten Bereiches, sind dann 95,4 % aller Messwerte zu erwarten (Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95,4 %).

Werte für die Überdeckungswahrscheinlichkeit P in Abhängigkeit von k

$k =$	1	2	3	4
$P(\sigma)$ in %	68,3	95,4	99,73	99,994

Die Messunsicherheitsbetrachtung aus der Sicht des GUM

(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)

Alle bisherigen Betrachtungen gingen davon aus, dass zu jeder Messgröße ein wahrer Wert existiert. In der messtechnischen Praxis existiert dieser wahre Wert aber nicht, oder ist zumindest unbekannt. Um etwa 1980 wurde daher auf Initiative des CIPM (Comité International des Poids et Mesures = Internationales Büro für Maß und Gewicht, in Sevres bei Paris) eine Betrachtungsweise ausgearbeitet (Empfehlung INC-1 (1980)), die lediglich von experimentell bestimmbareren Größen ausgeht. Somit besteht

jedes Messergebnis, aber auch jeder Wert zur Korrektur einer systematischen Messabweichung, stets aus einem Betrag und einer zugehörigen Messunsicherheit. Das GUM spricht hierbei von der sogenannten Standardmessunsicherheit und setzt diese mit der Streuung s der zugrundeliegenden Verteilungsfunktion der Messwerte quasi gleich. Zur Unterscheidung wird die Standardmessunsicherheit nach GUM mit dem Buchstaben u bezeichnet (im Unterschied zur Standardabweichung der Normalverteilung, die üblicherweise mit σ bezeichnet wird).

Die Gesamtmessunsicherheit einer Messung, die sich aus mehreren Anteilen zusammensetzt, wird meist als geometrische Addition (Wurzel aus der Summe der Quadrate) der einzelnen Standardmessunsicherheiten errechnet. Die errechnete Gesamtmessunsicherheit wird üblicherweise noch mit einem Erweiterungsfaktor k versehen, um die gewünschte Überdeckungswahrscheinlichkeit zu erhalten.

Für die Berechnung von Messunsicherheiten unterscheidet das GUM prinzipiell zwischen zwei Kategorien von Messunsicherheiten:

Typ A-Unsicherheiten sind alle Unsicherheitsanteile einer Messung, die sich über die Methode der Wiederholmessungen (n Unabhängige, unter gleichen Messbedingungen gemachte Beobachtungen) bestimmen und über die Angabe einer Standardabweichung (σ -Wert) zahlenmäßig beschreiben lassen. Zu den Typ A-Unsicherheiten zählen auch z. B. Korrekturangaben aus Kalibrierscheinen, bei denen die Verteilungsfunktion der Messwerte der Kalibrierung angegeben oder bekannt ist (in der Regel normalverteilt).

Typ B-Unsicherheiten sind alle Unsicherheitsanteile, die in einer Messung auftreten, die sich aber über Mehrfachmessung und Analyse der sich einstellenden Verteilungsfunktion nicht bestimmen lassen, weil die Möglichkeit der mehrfachen Wiederholung der Messung nicht gegeben ist. Der typische Fall einer B-Unsicherheitsangabe ist z. B. die Messgenauigkeitsangabe eines Messgerätes laut Datenblatt. Hier weiß man nur, dass sich der mit einem solchen Gerät bestimmte Messwert, maximal um die Fehlerangabe des Datenblattes vom wahren Wert unterscheidet. Mit welcher Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Messwertes in der Bereichsmitte oder am Bereichsrand zu rechnen ist, entzieht sich hier dem Anwender.

Typ B-Unsicherheiten werden auch überall dort angenommen, wo konkrete Zahlenangaben zu Unsicherheiten nicht gegeben sind und man sich daher auf Abschätzungen oder Erfahrungswerte beschränken muss. Hier besteht die zusätzliche Aufgabe, durch Analyse des Messvorgangs, eine realistische Verteilungsfunktion zugrundelegen.

Das GUM verwendet also nicht ein Messunsicherheitsintervall zur Beschreibung eines Messunsicherheitsbeitrages, sondern vielmehr Wahrscheinlichkeitsverteilungen.

6.1.3 Messunsicherheitsabschätzung an einem praktischen Beispiel

An einem vereinfachten Beispiel soll die Messunsicherheit abgeschätzt werden, mit der bei der Messung der „wahren“ Temperatur eines Rohrofens zu rechnen ist. Dabei wird die Temperatur des Rohrofens mittels Thermopaar vom Typ S (Pt10%Rh-Pt) bestimmt. Das Thermopaar wurde kalibriert, der Kalibrierschein liegt vor. Der Ofen wird über einen elektronischen Regler auf eine Temperatur von 1000 °C eingeregelt.

Die vom Thermopaar erzeugte Thermospannung wird mittels Digitalvoltmeter über einen Messstellenumschalter gemessen. Das Thermopaar hat eine Vergleichsstellentemperatur von 0 °C. Zur Thermospannungsmessung wird ein 7 1/2-stelliges Gerät im Messbereich 200 mV verwendet. Das Voltmeter wurde kalibriert, der Kalibrierschein liegt vor.

Die Gesamtmessunsicherheit setzt sich aus folgenden Messunsicherheitsanteilen zusammen

Typ B-Messunsicherheitsanteile:

1. Die Genauigkeit und Stabilität der Vergleichsstellentemperatur wird zu $0\text{ °C} \pm 0,1\text{ K}$ abgeschätzt. Die Verteilungsfunktion der Unsicherheit ist eine Rechteckverteilung.
2. Die Unsicherheit, die aus Inhomogenitäten des Thermopaares resultieren kann, wird auf $\pm 0,3\text{ K}$ (Rechteckverteilung) abgeschätzt (Ergebnisse aus zurückliegenden Untersuchungen).
4. Der Messstellenumschalter erzeugt parasitäre Thermospannungen (Kontaktspannungen), die den Messwert verfälschen. Aus dem Datenblatt des Gerätes werden maximale parasitäre Thermospannungen von $\pm 3\text{ }\mu\text{V}$ entnommen. Dies entspricht einem Temperaturwert von ca. $\pm 0,2\text{ K}$.
5. Die Unsicherheit der Kalibrierung des Thermoelementes ist im Kalibrierschein mit $\pm 0,8\text{ K}$ angegeben. In dieser Angabe ist ein Erweiterungsfaktor von $k = 2$, zur Erzielung einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von $> 95\%$ bereits eingerechnet. Die Unsicherheit ist normalverteilt.
6. Die Unsicherheit der Kalibrierung des Voltmeters beträgt $\pm 3\text{ }\mu\text{V}$ ($k = 2$, normalverteilt).

Typ A-Messunsicherheitsanteile:

7. Die Messung der Thermospannung wird im Abstand von ca. 1 Minute 20 mal wiederholt. Aus den Messungen wird der Mittelwert und die Standardabweichung der Messwerte gebildet.

Die sich ergebende Standardabweichung beträgt $\pm 4 \mu\text{V}$. Dieser Wert dient als Standardunsicherheit der Messwerterfassung in der weiteren Bestimmung der Gesamtmessunsicherheit. Die Schwankungsbreite der Messwerte von $\pm 4 \mu\text{V}$ wird u. a. von den zufälligen Störeinflüssen (elektromagnetische Störungen, thermisches Rauschen usw.) verursacht, beinhaltet aber auch die zeitlichen Regelschwankungen des Regelkreises.

Aus dem erhaltenen Mittelwert wird, unter Zuhilfenahme des Kalibrierscheins des Thermoelementes, die exakte Ofentemperatur berechnet.

Nr.	Beschreibung	Unsicherheit $s(X_i)$	k	Verteilung	Faktor für Standardunsicherh.	Standardunsicherh. $U(X_i)$	Empfindlichkeit C_i	Unsicherh.beitrag (K) $U_i(y)$
1	Genauigkeit und Stabilität der Vergleichsstelle	0,1 K	1	Rechteck	1/1,73	0,06 K	1,0	0,06
2	Inhomogenität des Thermoelementes	0,3 K	1	Rechteck	1/1,73	0,17 K	1,0	0,17
4	Parasitäre Thermospannung des Umschalters	3 μV	1	Rechteck	1/1,73	1,7 μV	0,05 K/ μV	0,09
5	Unsicherheit der Kalibrierung Thermoelement	0,8 K	2	Normal	1	0,4 K	1,0	0,4
6	Unsicherheit der Kalibrierung Voltmeter	3 μV	2	Normal	1	1,5 μV	0,1 K/ μV	0,15
7	Unsicherheit der Messwerterfassung	4 μV	2	Normal	1	4 μV	0,1 K/ μV	0,4
								1,27

Tab. 6-1: Messunsicherheitsabschätzung bei der Bestimmung einer Ofentemperatur

Die mit der aus dem Kalibrierschein berechneten Ofentemperatur zusammenhängende Messunsicherheit beträgt $\cong \pm 1,3 \text{ K}$. Bei einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ (Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95 %), ergibt sich eine Messunsicherheit von $\pm 2,6 \text{ K}$.

6.1.4 Fehlereinflüsse bei der Temperaturmessung

Grundsätzliche Betrachtungen

Immer wieder wird von Anwendern die Frage gestellt, welcher Toleranzklasse ein Temperaturfühler entsprechen muss, damit eine Temperaturmessung mit der erforderlichen Genauigkeit durchgeführt werden kann

Jeder reale Temperaturfühler besitzt eine Kennlinie, die mehr oder weniger von der idealen Kennlinie abweicht, wie sie in den Normen definiert ist. Da Temperaturfühler nicht in beliebiger Genauigkeit hergestellt werden können, sind in den Normen Grenzabweichungen definiert, innerhalb derer sich die Kennlinien der realen Temperaturfühler bewegen dürfen. Grundsätzlich wird hier zwischen einer erweiterten Toleranzklasse (Klasse B oder Klasse 2) oder einer eingeschränkten Toleranzklasse (Klasse A oder Klasse 1) unterschieden. Auch auftragsspezifische Toleranzfestlegungen zwischen Kunde und Lieferant kommen vor.

Dabei werden die Temperatursensoren, die die Forderungen der Toleranzklassen erfüllen, meist durch Selektion aus einer Fertigungsladung „herausgelesen“. Selbst die eingeschränkte Toleranzklasse (z. B. A für Messwiderstände Pt 100 nach DIN EN 60751) erlaubt aber immer noch Messabweichungen (z. B. $\pm 0,35 \text{ K}$ bei $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ oder $\pm 0,75 \text{ K}$ bei $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$), die für Präzisionsmessungen nicht tolerierbar sind.

Werden die Toleranzklassen auftragsspezifisch weiter eingeschränkt, so wird es immer schwieriger, einen Temperatursensor zu finden, der diese Forderungen erfüllen kann. Dies gilt besonders dann, wenn die Toleranz über einen großen Temperaturbereich eingehalten werden soll. Sensoren mit derart engen Toleranzen sind daher extrem teuer.

Die Anforderungen an die Genauigkeiten von Temperaturmessungen haben in den letzten Jahren deutlich zugenommen. War bis vor wenigen Jahren die mit einem Klasse A-Sensorelement zu erreichende Messunsicherheit noch „das Maß der Dinge“, so sind diese Genauigkeiten für viele Anwendungsgebiete heute nicht mehr ausreichend. Die folgenden Aufgabenstellungen haben in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen:

- Messung kleiner Temperaturdifferenzen zwischen der Einlauf- und Auslauftemperatur von Kühltürmen (Erhöhung des Wirkungsgrades des Kühlturms). Dabei darf eine maximale Auslauftemperatur nicht überschritten werden.
- Messung der Temperaturdifferenz der in einen chemischen Reaktor zugeführten Edukte und der aus der Reaktion entstandenen Produkte, zur kontinuierlichen Energiebilanzierung als präventive Form des Explosions-/Störfallschutzes.
- Messung exakter Prozesstemperaturen in der pharmazeutischen Industrie bei der Herstellung und Verarbeitung temperaturempfindlicher Produkte.
- Messung exakter Prozesstemperaturen in den Sterilisationsvorgängen der Milch- und Molkereiprodukte-Industrie (H-Milch).

- Messung exakter Prozesstemperaturen bei der Sterilisation (Entkeimung) von biochemischen Anlagen.

Eine wesentlich effizientere Methode zur Umsetzung der beschriebenen Aufgabenstellungen kann die Präzisionskalibrierung eines Temperaturfühlers mit quasi beliebiger Toleranz (z. B. Klasse B) sein. Im Kalibrierschein werden die im Kalibriervorgang ermittelten Abhängigkeiten zwischen Temperatur und Widerstand oder Thermospannung dokumentiert und können durch den Anwender bei der Auswertung seiner Messergebnisse korrigierend berücksichtigt werden.

Ist der Temperaturfühler zusätzlich mit einem programmierbaren Messumformer versehen, so kann die Korrektur im Messumformer hinterlegt werden. Für den Anwender verhält sich ein solcher Temperaturfühler mit der Eingangsgröße Temperatur und der Messumformer-Ausgangsgröße mA, wie ein idealer Temperaturfühler nach Norm. Der verbleibende Restfehler beschränkt sich dabei auf die Größenordnung der Ungenauigkeit der Kalibrierung und der digitalen Auflösung des Messumformers (typischerweise zwischen 0,05 K und 0,1 K). Diese Methode stellt eine kostengünstige Alternative zur teuren Selektion hochpräziser Temperatursensoren dar.

Fehlereinflüsse aus „natürlichen“ Unsicherheitskomponenten von noch unbenutzten Fühlern

Wie bereits erwähnt, können Temperaturfühler nicht mit beliebiger Genauigkeit hergestellt werden. Dies liegt u. a. an den angewendeten Fertigungsverfahren und an der Reinheit der verwendeten Werkstoffe.

Besonders bei unedlen Thermopaaren können Inhomogenitäten in der Legierungszusammensetzung bzw. der Gefügestruktur von Thermoelementstoffen zu nennenswerten Messunsicherheiten führen. Inhomogenitäten zeigen allerdings nur dann einen Einfluss auf das Messergebnis, wenn diese sich im Bereich von Temperaturgradienten befinden. Inhomogenitäten können fertigungsbedingt sein, sie können sich betriebsbedingt aber auch erst in der Anwendungsphase einstellen. Inhomogenitäten können Messfehler bis zu mehreren K, in besonderen Fällen bis zu mehreren hundert K verursachen.

Starke mechanische Beanspruchungen, z. B. starkes Biegen oder Knicken des Thermodrahtes, können inhomogene Bereiche durch die Veränderung der Gefügestruktur ausbilden. Ein angepasster Glühprozess dem die Thermodrähte unterzogen werden, kann Inhomogenitäten in gewissen Grenzen wieder zurückbilden.

Für Thermopaare vom Typ K (NiCr-Ni), aber auch für alle anderen Thermopaare, die einen NiCr-Schenkel beinhalten, ist der Einfluss des sogenannten K-Zustandes besonders zu beachten. Vor der Anwendung ist sicherzustellen, dass Typ K-Thermopaare nur verwendet werden, wenn diese vorher einer Stabilisierungsglühung unterzogen wurden (siehe hierzu auch Kapitel 3.5). Der Messfehler, der durch den K-Zustand verursacht wird, kann in der Größenordnung 2...5 K liegen.

Fehlereinflüsse, die während der Einsatzdauer des Fühlers auftreten

Die Genauigkeit eines unbenutzten Temperaturfühlers bleibt über seine Einsatzdauer leider nicht erhalten. Vielmehr tritt eine Alterung (Drift) des Temperaturfühlers ein (siehe Kapitel 3.5).

Messunsicherheitseinflüsse, die durch Drift entstehen, sind für den Anwender deshalb besonders schwer zu erkennen, weil dieser Prozess quasi schleichend und somit fast unbemerkt abläuft. Das Einsetzen eines Driftprozesses und dessen Auswirkung kann nur durch regelmäßige Überwachung des Temperaturfühlers (periodisches Rekalibrieren) erkannt und nach Größe und Richtung quantifiziert werden (siehe Kapitel 6.2.10).

Weitere Beiträge zur Messunsicherheit bei der Anwendung von Thermoelementen können zu geringe Innenwiderstände angeschlossener Messgeräte sein. Thermopaare stellen recht hochohmige Signalquellen dar, Thermodrähte können Leitungswiderstände von bis zu einigen k Ω aufweisen.

Zuleitungswiderstände müssen bei der Anwendung von Widerstandsthermometern in 2-Leiterschaltung dann berücksichtigt werden, wenn diese einen nicht vernachlässigbaren Anteil des Sensorwiderstandswertes ausmachen (siehe Kapitel 3.6).

Der ohmsche Widerstand der Zuleitungen zwischen Messgerät und Messwiderstand addiert sich zum eigentlichen Sensormesswert. Die Temperaturanzeige wird dadurch nach zu hohen Werten verfälscht. Kompensierende Maßnahmen sind Abgleich des Messkreises, oder Berücksichtigung des Leitungswiderstandes bei der Signalauswertung. Auf Widerstandsthermometer in 2-Leiterschaltung, ist aus diesem Grund der Wert des Zuleitungswiderstandes vom Sensorelement zum Anschlusssockel, angegeben. Zu berücksichtigen ist, dass Korrekturen um den angegebenen Wert des Zuleitungswiderstandes immer davon ausgehen, dass der Wert sich über der Messtemperatur nicht verändert. Die Anschlussleitungen unterliegen aber ebenfalls einem gewissen Temperatureinfluss, der eine Veränderung des Widerstandswertes auch der Zuleitung verursacht. Die durchgeführte Korrektur kann somit fehlerbehaftet sein.

Die Größenordnung realer Zuleitungswiderstände zeigt die folgende Tabelle. Darin ist der Leitungswiderstand einer 1 m langen Anschlussleitung (Hin- und Rückleitung) aus Kupfer, in Abhängigkeit vom verwendeten Leitungsquerschnitt angegeben.

Leitungsquerschnitt (mm ²)	0,14	0,22	0,5	0,75	1,5
Widerstandswert (Ohm/dpm)	0,638	0,406	0,179	0,119	0,06
result. Messfehler für Pt100 (K)	+1,7	+1,1	+0,5	+0,3	+0,2

Tab. 6-2: Ohmscher Widerstand einer Cu-Leitung (dpm = Doppelmeter) und der dadurch verursachte Messfehler

Sind die Zuleitungswiderstände bekannt, können sie bei der Auswertung der Messung korrigierend berücksichtigt werden. Der schwer abzuschätzende Temperatureinfluss auf den Zuleitungswiderstand bleibt als Messunsicherheitskomponente erhalten. Diesen Effekt kann man durch den Einsatz von *Widerstandsthermometern in 3- oder 4-Leiterschaltung* weitestgehend eliminieren.

Parasitäre Thermospannungen sind unerwünschte Spannungskomponenten, die in Messkreisen an Verbindungsstellen verschiedener Metalle oder Legierungen auftreten, wenn diese sich in einem Temperaturgradienten befinden. Sie verfälschen sowohl das Ergebnis einer Widerstands- als auch einer Thermospannungsmessung. Derartige Metallübergänge treten vorwiegend an den Anschluss- oder Verlängerungsstellen der Zuleitungen von Temperaturfühlern auf.

Besonders an den Anschlusssockeln der Messeinsätze, die besonders bei kurzen Temperaturfühlern einer beträchtlichen Temperaturbelastung ausgesetzt sind, werden parasitäre Thermospannungen erzeugt. Eine messtechnische Erfassung parasitärer Thermospannungen, oder die systematische Abschätzung des daraus resultierenden Messfehlers für eine mögliche Korrektur, ist kaum möglich. Je nach Polarität der erzeugten Thermospannung wird das Messergebnis zu höheren oder niedrigeren Werten verfälscht.

Bei der Widerstandsmessung ist die Umpolung des Messstromes eine einfache Methode, das Messergebnis auf den Einfluss parasitärer Thermospannungen zu überprüfen. Dabei werden unmittelbar nacheinander zwei Messungen mit gleichem Messstrom, aber umgekehrter Stromrichtung durchgeführt. Stellt sich zwischen beiden Messwerten eine nennenswerte Differenz ein, so ist diese durch parasitäre Thermospannungseinflüsse verursacht. Der arithmetische Mittelwert aus der Summe der Absolutbeträge beider Messungen, stellt dann den fehlerkorrigierten Messwert dar. Hochwertige Messgeräte bieten spezielle Messmethoden zur Kompensation parasitärer Thermospannungen bei Widerstandsmessungen. Parasitäre Thermospannungseinflüsse können bei der Widerstandsmessung durch die Verwendung einer Wechselspannungsbrücke vollständig unterbunden werden.

Fehleranteile durch „falsche“ Ausgleichsleitungen

Thermoelemente werden bei langen Verkabelungswegen ab einer gewissen Stelle (Umgebungstemperatur < 200 °C bzw. < 100 °C) üblicherweise mit preiswerteren Ersatzwerkstoffen, den Ausgleichsleitungen verlängert.

Die durch die jeweiligen Einzelschenkel erzeugten Thermospannungen können sich aber durchaus von den Thermospannungen der Original-Werkstoffe unterscheiden. Solange beide Schenkel an den entsprechenden Anschlussstellen der Ausgleichsleitung auf gleicher Temperatur sind, führt dies zu keiner Messwertverfälschung. Liegen die Anschlussstellen allerdings in einem Temperaturgradienten, können falsche Thermospannungen erzeugt werden. Die Verlängerung von Thermoelementen mit Ausgleichsleitungen ist demzufolge nur dann erfolgreich, wenn die zum Thermopaar *passende* Ausgleichsleitung eingesetzt und richtig gepolt angeschlossen wird.

Messfehler, verursacht durch falsch ausgewählte oder falsch angeschlossene Ausgleichsleitung, können bis zu mehreren zehn K betragen (siehe dazu auch „Fehlertabelle für Thermoelemente und Widerstandsthermometer“ auf Seite 149). Für Thermospannungs-Präzisionsmessungen ist vom Gebrauch „verlängerter“ Thermoelemente allerdings generell abzuraten.

Fehlereinflüsse bei der Auswertung des Messsignals

Alle Temperaturfühler besitzen eine *nichtlineare Kennlinie*. Bei der Rückrechnung des Messwertes in einen zugehörigen Temperaturwert, muss diese Nichtlinearität berücksichtigt werden. Falsche oder nicht berücksichtigte Kennlinienkrümmungen führen zu Messfehlern von bis zu einigen K. Werden Kennlinien approximiert, tritt, je nach Qualität der Approximation, ein Linearisierungsfehler auf.

Die *falsche oder nicht berücksichtigte Vergleichsstelle* ist ein klassischer Fehler bei der Anwendung von Thermoelementen. Das Ausgangssignal eines Thermoelementes ist immer proportional der *Temperaturdifferenz* zwischen dem heißen und dem kalten Ende. Erst unter der Voraussetzung, dass die Temperatur an einem Ende bekannt ist, lässt sich aus der gemessenen Thermospannung die Temperatur des anderen Endes bestimmen. Die Vergleichsstelle ist dabei diejenige Verbindungsstelle (das eine Ende des Thermoelementes), an der eine bekannte Temperatur herrscht. Die Vergleichsstelle wird üblicherweise durch ein Eis-Wassergemisch mit einer Temperatur von 0 °C realisiert. Auch andere Vergleichsstellentemperaturen (+20 °C, +50 °C) sind üblich.

Bei Thermoelementmessungen mit direktanzeigenden Messgeräten ist eine Vergleichsstelle i. d. R. im Messgerät integriert. Dabei wird die Temperatur der Anschlussklemmen des Messgerätes kontinuierlich gemessen und zu dem aus der gemessenen Thermospannung berechneten Temperaturwert addiert. Eine nicht berücksichtigte Vergleichsstelle ist immer dann zu vermuten, wenn der gemessenen Temperaturwert etwa um den Betrag der Umgebungstemperatur zu niedrig angezeigt wird.

Ist der zu messende Temperaturwert als Orientierungswert unbekannt, bleibt die Nichtberücksichtigung der Vergleichsstellentemperatur oftmals völlig unerkannt. Wird die Vergleichsstelle zwar berücksichtigt, werden aber falsche Vergleichsstellentemperaturen bei der Auswertung zugrundegelegt, so wirkt sich der Unterschied zwischen der wahren und der vermuteten Vergleichsstellentemperatur in etwa gleicher Größenordnung als Fehler auf das Messergebnis aus. Der exakte Messfehler hängt dabei noch von der Höhe der Messtemperatur ab.

Fehleinflüsse bei der praktischen Umsetzung der Messaufgabe

Alle bisher durchgeführten Betrachtungen gehen davon aus, dass die Temperatur des Sensors auch der Temperatur entspricht, die gemessen werden soll. Thermoelemente und Widerstandsthermometer gehören zur Klasse der Berührungsthermometer, die in möglichst guten Wärmekontakt mit dem Messstoff gebracht werden müssen, um dessen Temperatur anzunehmen. *Berührungsthermometer können immer nur ihre eigene Temperatur messen!* Dies erscheint zunächst trivial, ist aber eine wichtige Erkenntnis für die geeignete Wahl der Messstelle im Prozess.

Erfolgt die Temperaturmessung an einer ungeeigneten Stelle, so kann der Temperaturwert zwar durchaus präzise erfasst werden, der Messwert ist aber nicht, oder nur eingeschränkt brauchbar. Erfolgt die Messung an der richtigen (repräsentativen) Stelle, ist es aber immer noch nicht zwingend gegeben, dass die Messung frei von systematischen Fehlereinflüssen ist.

Falsche Sensortemperaturen können sich auch aus anderen Gründen einstellen. Sollen zeitlich sich verändernde Temperaturen gemessen werden, so muss der Temperaturfühler in seinem dynamischen Verhalten dafür geeignet, also schnell genug sein. Das Zeitverhalten wird allgemein über den Parameter Ansprechzeit (τ_0) beschrieben. Ist die Ansprechzeit groß im Vergleich zur Änderungsgeschwindigkeit der zu messenden Temperatur, wird sich ein systematischer Messfehler einstellen, da der Temperaturfühler der sich ändernden Messtemperatur immer mit einer gewissen Verzögerung „hinterherläuft“.

Die Problematik übermäßiger Wärmeableitung ist eine Fehlerquelle, die in allen praktischen Temperaturmessaufgaben auftreten kann. Dahinter versteckt sich die Tatsache, dass bei einem Berührungsthermometer ständig ein Wärmefluss aus dem Messstoff zum Temperatursensor (heiße Messstelle) und von dort zur Umgebungstemperatur (über das kalte Ende) des Temperaturfühlers erfolgt. Es wird somit der Messstelle kontinuierlich Energie entzogen: sie kühlt sich ab. Werden Temperaturen gemessen, die niedriger sind als die Temperatur des „kalten Endes“, so kehrt sich dieser Vorgang um, der Messstelle wird Energie zugeführt, sie erwärmt sich.

Die Größenordnung dieser Abkühlung oder Erwärmung ist vor allem abhängig von:

- der Eintauchtiefe des Temperaturfühlers,
- dem Durchmesser / Querschnitt des Temperaturfühlers,
- dem Wärmeleitvermögen der verwendeten Materialien,
- dem Wärmeübergangsverhalten zwischen dem Medium und Fühler,
- der Temperaturdifferenz zwischen Messstelle und Umgebungstemperatur.

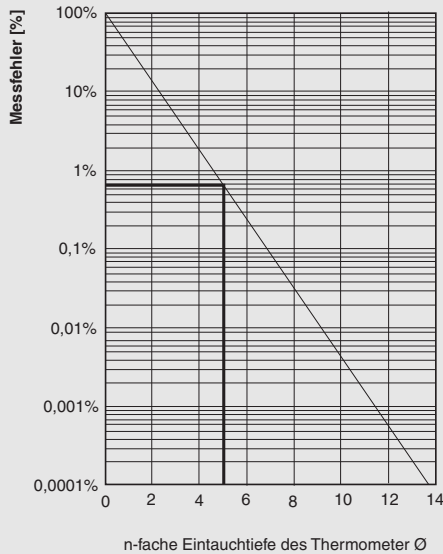


Bild 6-2: Abhängigkeit des relativen Wärmeableitfehlers vom Verhältnis Eintauchtiefe zu Durchmesser eines Temperaturfühlers für Flüssigkeiten

Aus dem Diagramm ist leicht ersichtlich, dass der Temperaturfühler eine gewisse Mindesteintauchtiefe besitzen muss, um einen vorgegebenen Wärmeableitfehler nicht zu überschreiten. Im Beispiel ergibt sich für einen Wärmeableitfehler $< 1\%$ eine einzuhaltende Mindesteintauchtiefe von $5 \times$ dem Durchmesser des eingetauchten Temperaturfühlers. Bei der Temperaturmessung in Gasen, ist dieser empfohlene Wert aufgrund der schlechteren Wärmeleitung mindestens zu verdoppeln.

Messwiderstände sind passive Sensoren. Sie müssen mit einem Messstrom versorgt werden, damit eine widerstandsproportionale Messspannung anfällt. Dieser Messstrom erzeugt am Messwiderstand eine unverwechselbare Verlustleistung der Größe

$$P_{\text{Verl}} = I^2 \cdot R$$

Dabei wirkt der Messwiderstand wie ein kleines elektrisches Heizelement und setzt diese Verlustleistung in Wärme um. Die Folge ist eine unerwünschte Temperaturerhöhung des Sensors, die sog. *Eigenerwärmung*. Der Temperaturfühler detektiert dadurch eine Temperatur, die höher ist als die eigentliche Messstofftemperatur.

Die Höhe der Eigenerwärmung hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab:

- vom eingestellten Messstrom,
- von der thermischen Masse des Sensorelementes,
- von der Ableitung der Temperaturerhöhung durch das Messmedium.

Bei typischen Messströmen von 1 mA, beträgt die an einem Messwiderstand von 100 Ω umgesetzte Verlustleistung 0,1 mW. Bei thermisch gut gegen die Umgebung isolierten Sensoren, kann dadurch eine Eigenerwärmung größer 0,5 K entstehen. Dies ist besonders bei der Temperaturmessung in ruhenden Gasen zu berücksichtigen, da hier der Wärmeaustausch mit dem Messmedium nur langsam stattfindet.

Mittlerweile gibt es eine Tendenz zu höheren Nominalwiderständen (Pt 200, Pt 500, Pt 1000), da diese, bei gleichem Messstrom, höhere Signale abgeben, allerdings auch eine höhere Eigenerwärmung zeigen. Die fehlerhafte Beeinflussung des Messwertes steigt dadurch.

Generell lässt sich der Effekt der Eigenerwärmung durch Verringerung des Messstromes reduzieren. Präzisionsmessungen (z. B. bei hochwertigen Kalibrierungen) werden in der Regel mit mindestens zwei verschiedenen Messströmen durchgeführt, die sich um den Faktor $\sqrt{2}$ unterscheiden. Die Messungen erfolgen so mit einfacher und doppelter Verlustleistung, wobei anschließend auf den Messwert extrapoliert wird, der sich bei Messstrom Null ergeben würde. Angaben zum Eigenerwärmungsverhalten wichtiger Fühler- oder Messwiderstandskonstruktionen werden von den Herstellern in Datenblättern angegeben. Der Anwender kann so leicht abschätzen, wie groß der Eigenerwärmungsfehler für einen bestimmten Messstrom werden kann. Bei Thermoelementen tritt der Eigenerwärmungseffekt nicht auf.

Temperaturfühler, die zur Messung von Temperaturen strömender Medien eingesetzt werden, unterliegen zum Teil beträchtlichen *Schwingungsbelastungen*. Bei kontinuierlich auftretenden Schwingungsanregungen können diese Effekte durch Resonanzüberhöhungen bis zur Zerstörung des gesamten Fühlers führen. Auch wenn sich noch kein sichtbarer äußerer Schaden am Temperaturfühler zeigt, können Schwingungsbelastungen das eigentliche Sensorelement schon frühzeitig geschädigt haben. Eine schleichende Messwertabweichung (Drift) ist meist die Folge. Temperaturfühler in stark schwingungsexponierten Einsätzen (z. B. Abgasfühler bei Groß-Dieselmotoren), zeigen dieses typische Verhalten. Schwingungsfeste Sonderkonstruktionen, in Verbindung mit regelmäßigen Rekalibrierungen, schaffen hier Abhilfe und Betriebssicherheit.

Unter *elektromagnetischen Störungen* (EMI) versteht man ungewollte Störspannungen im Messkreis, die durch äußere zeitlich veränderliche elektrische oder magnetische Felder, aus Geräten wie Elektromotoren, Transformatoren, Netzkabel oder Thyristorsteller, verursacht werden. Auch hochfrequente Einstrahlungen können elektromagnetische Störungen verursachen. Leckströme, die aus schadhafte Isolierungen elektrischer Heizungen resultieren, oder sogenannte Erdschleifen können ebenfalls elektromagnetische Störungen im Messkreis verursachen. Die Fähigkeit solchen Störungen zu widerstehen oder sie zu unterdrücken, bezeichnet man elektromagnetische Verträglichkeit (EMV).

Über die geeignete Abschirmung von Leitungen lässt sich der Einfluss *elektrischer Wechselfelder* reduzieren. Der Einfluss *magnetisch induzierter EMI-Störungen* dagegen lässt sich über Abschirmungsmethoden kaum reduzieren, es sei denn, die Abschirmungswerkstoffe wären sehr dick. Es bleibt nur die Möglichkeit, den Messkreis und die EMI-Störquelle räumlich möglichst weit voneinander zu trennen. Sind immer noch Störungen vorhanden, sollte man alle Messleitungen eng beieinander und möglichst parallel führen. Paarweise verdrehte oder koaxiale Leitungen bieten guten Schutz gegen *magnetische Wechselfelder*. Eine weitere Methode zur Störungsreduzierung ist die Verkürzung störungsempfindlicher Signalwege und die Signalweiterleitung über Messumformer als mA-Signal.

Bei höheren Temperaturen verlieren auch die besten Isolierwerkstoffe ihre guten Isolationseigenschaften. Das Isolationsvermögen einer Oxidkeramik z. B. reduziert sich bei einer Temperaturerhöhung um 100 °C etwa um eine Zehnerpotenz. *Leckströme* sind die Folge. Sie überlagern sich dem Messsignal und führen zu Verfälschungen. Hier ist die Verwendung von Temperaturfühlern mit geerdetem metallischen Schutzmantel zu empfehlen. Der Leckstrom fließt dann über den geerderten Mantel und nicht über das Sensorelement und dessen Messkreis ab.

Der Einfluss von *Erdschleifeeffekten*, die aus den Ausgleichströmen zwischen verschiedenen Massepotenzialen eines Messkreises resultieren, lassen sich ebenfalls durch geerdete metallische Ummantelungen des Temperaturfühlers wirkungsvoll unterdrücken.

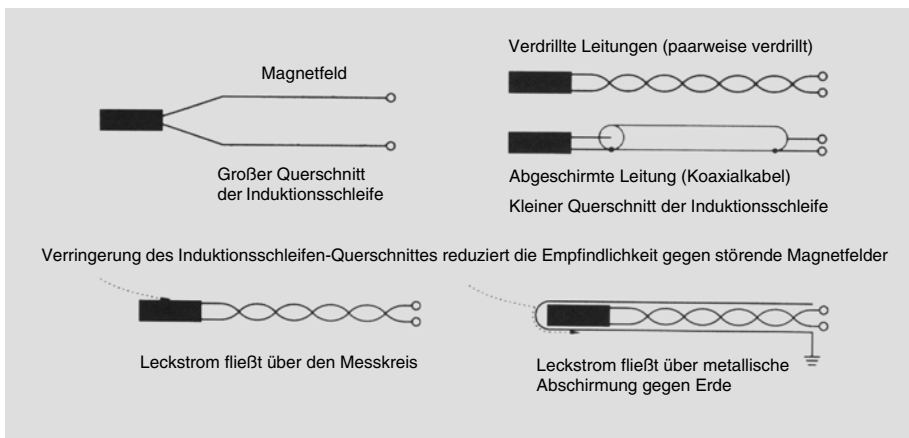


Bild 6-3: Verwendung von Abschirmungen zur Vermeidung von Leckströmen

6.2 Kalibrierung und Eichung

Temperaturfühler unterliegen einer generellen Alterung, die allgemein als Drift bezeichnet wird. Die Größe und Richtung dieses Drifteffektes ist ohne detaillierte Angaben zu den konkreten Einsatzbedingungen nicht bestimmbar. Selbst wenn diese Angaben vorliegen, ist eine Quantifizierung des Driftprozesses ausgesprochen schwierig. Letztendlich bleiben nur die Methoden der zyklischen metrologischen Überprüfung der Temperaturfühler, um sicherzustellen, dass sie auch nach längerem Einsatz die an sie gestellten Anforderungen bezüglich Messgenauigkeit noch sicher erfüllen.

Diese metrologische Überprüfung wird allgemein als Kalibrierung bezeichnet. Kalibrierungen sorgen somit für ein anhaltend hohes Qualitätsniveau des Temperaturfühlers für seine Messaufgabe, obwohl der Fühler selbst einer kontinuierlichen Alterung (Abnutzung) unterliegt.

6.2.1 Begriffsbestimmungen

Kalibrieren im Bereich der Messtechnik:

Feststellung der Abweichung eines fertigen Produktes gegenüber den festgelegten Sollwerten.

Die Sollwerte sind entweder in einschlägigen Normen, in Richtlinien oder in sonstigen definierenden Dokumenten festgelegt. Sie können auch Bestandteil einer separaten Festlegung zwischen den Vertragspartnern sein.

Beim Kalibrieren erfolgt *kein technischer Eingriff in den Prüfling!*

Unter der Kalibrierung eines Temperaturfühlers versteht man das Ermitteln der Messabweichung. Sie ist die Abweichung zwischen dem Ausgangssignal des Temperaturfühlers an der Kalibriertemperatur, und dem Sollwert an dieser Temperatur. Dabei macht die Kalibrierung eine Aussage über die Abweichung des Prüflings nur zum Zeitpunkt der Kalibrierung. Eine Aussage über das Zeitverhalten des Prüflings bezüglich seiner Genauigkeit über den Einsatzzeitraum kann aus genannten Gründen nicht gemacht werden. Die Kalibrierergebnisse werden auf einem Kalibrierschein dokumentiert.

Abgleichen eines Messgerätes oder Maßverkörperung:

Vornahme eines Eingriffs am Gerät mit dem Ziel, die durch Kalibrierung festgestellte Messabweichung entweder so einzustellen, dass:

- die Messabweichung möglichst klein wird, oder
- der Beitrag der Messabweichung nach dem Eingriff die geforderten Fehlergrenzen nicht mehr überschreitet.

Dabei sind die vorgenommenen Veränderungen gegen unbeabsichtigtes Verstellen zu schützen (Aufkleber, Siegelmarke, Siegellack usw.). Die Dokumentation der Justierung in Form eines Zertifikates ist nicht zwingend erforderlich.

Eichen ist als amtliches Kalibrieren zu verstehen. Eichungen dürfen nur von zugelassenen Eichämtern oder den von ihnen benannten Prüfstellen durchgeführt werden. Eichungen dürfen nur an Produkten durchgeführt werden, die den Anforderungen des Eichgesetzes und der Eichordnung entsprechen. Produkte, die geeicht werden sollen, müssen einer Bauartprüfung (Typprüfung) unterzogen werden.

Inhalt einer solchen Prüfung ist auch, festzustellen, ob die Messbeständigkeit für die vorgesehene Eichgültigkeitsdauer (Langzeitstabilität) und der Schutz gegen Manipulation gegeben ist. Die Typprüfung ist an einer Anzahl repräsentativer Geräte gleicher Konstruktion durchzuführen (Erstmusterprüfung). Erfüllen die Prüflinge die Anforderungen, erhält das Produkt eine Bauartzulassung. Die Konstruktion wird danach „eingefroren“.

Der eigentliche Eichungsvorgang entspricht einer Kalibrierung, es wird aber nur die Einhaltung der erlaubten Fehlergrenzen kontrolliert. Die Eichung wird durch Stempe- lung am Gerät kenntlich gemacht. Die Erstellung eines Eichscheins ist üblich, aber nicht für alle Eichungen zwingend vorgeschrieben. Mittlerweile werden auch die Kali- brierwerte im Eichschein dokumentiert.

6.2.2 Kalibriermethoden für Temperaturfühler

Für die Kalibrierung von Temperaturfühlern bieten sich zwei grundsätzliche Methoden an.

Bei der **Fixpunktkalibrierung** wird der Temperaturfühler einer bekannten Temperatur ausgesetzt. Diese wird erzeugt, indem hochreine Materialien (z. B. Metalle) vollständig aufgeschmolzen und langsam wieder abgekühlt werden. Zum Zeitpunkt der eintreten- den Erstarrung stellt sich während des Phasenumwandlungsprozesses eine konstante Temperatur ein. Bei idealen Prozessbedingungen kann dieses Gleichgewicht, und somit die Temperaturkonstanz, mehrere Stunden aufrechterhalten werden.

Über die Festlegungen der ITS-90 sind diesen sogenannten Fixpunkten Zahlenwerte zugeordnet, die praktisch identisch mit den thermodynamischen Temperaturen sind. Für den Erstarrungspunkt des Aluminiums z. B. ergibt sich eine Fixpunkttemperatur von $t_{90} = 660,323 \text{ °C}$. Fixpunktkalibrierungen sind die Kalibriermethode mit den gering- sten Messunsicherheiten. Sie sind allerdings sehr aufwändig durchzuführen.

Bei der **Vergleichskalibrierung** (auch Vergleichsmessung) wird der Prüfling einer zunächst unbekannten Temperatur ausgesetzt. Diese Temperatur wird in einem soge- nannten Kalibrator erzeugt. Kalibratoren können gerührte Flüssigkeitsbäder (bis max.

ca. 550 °C) oder sogenannte Blockkalibratoren sein. Bei höheren Temperaturen (besonders zur Thermoelementkalibrierung) kommen Rohröfen zum Einsatz, deren eingeschränkte thermische Eigenschaften bezüglich Temperaturhomogenität, durch die Verwendung von sogenannten Ausgleichskörpern (Metalleinsätze) oder von Wärmerohren (Heatpipes) deutlich verbessert werden.

Aufgabe dieser Kalibratoren ist es, eine einstellbare Temperatur innerhalb eines definierten Kalibriervolumens zeitlich stabil und räumlich homogen darzustellen. Ein sogenanntes Normal wird zusammen mit dem Prüfling temperiert. Die Ausgangssignale von Normal und Prüfling werden über einen längeren Zeitraum zeitgleich gemessen. Das Ausgangssignal des Normals dient anschließend zur exakten Bestimmung der vorliegenden Kalibriertemperatur.

Vergleichskalibrierungen sind von Natur aus mit höheren Messunsicherheiten als Fixpunktkalibrierungen behaftet. Der Kalibrieraufwand ist aber deutlich geringer und darüber hinaus können Kalibrierungen bei praktisch allen beliebigen Temperaturen durchgeführt werden.

6.2.3 Die Rückführung von Kalibrierergebnissen

Am Beispiel der Vergleichskalibrierung ist zu erkennen, dass hier in gewissem Sinne eine Weitergabe der „Genauigkeit“ (Messunsicherheit) des Normals auf den Prüfling erfolgt. Selbstverständlich kommen dabei weitere Messunsicherheitsanteile hinzu. Sie entstammen z. B. aus der Messdatenerfassung während der Kalibrierung, oder aus der Inhomogenität des Kalibrierbades. Die sich ergebende Messunsicherheit des Prüflings muss somit zwangsläufig größer sein, als die des verwendeten Normals. Dieser Prüfling könnte in einer weiteren Vergleichskalibrierung wiederum als Normal verwendet werden. Mit jedem dieser Schritte erfolgt eine weitere Vergrößerung der Messunsicherheit.

Die Normale mit den geringsten Messunsicherheiten, die sogenannten Nationalen Normale, werden in Deutschland von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt PTB aufbewahrt und bereitgestellt. Die PTB kalibriert im Kundenauftrag sogenannte Bezugsnormale gegen diese Nationalen Normale. Bezugsnormale finden als Normale höchster Ordnung z. B. in DKD-Kalibrierlaboratorien Verwendung. Die Arbeitsnormale (Gebrauchsnormale) dieser Laboratorien, also die Normale, die in den Kalibriervorgängen ständig angewendet werden, sind wiederum gegen die Bezugsnormale kalibriert.

Mit den Arbeitsnormalen werden i.d.R. die sogenannten Betriebsmessmittel kalibriert, die in der Fertigungskontrolle eingesetzt werden. Es entsteht somit eine Kalibrierhierarchie, die aus einer bestimmten Anzahl von Kalibrierstufen besteht. Diese Kalibrierhierarchie stellt sicher, dass alle mit irgendeinem Betriebsmessmittel erzielten Ergebnisse über eine lückenlose Kette von Kalibrierungen rückverfolgbar auf die Nationalen Normale sind. Eine Vergleichbarkeit aller Kalibrierergebnisse ist somit

gegeben. Dieser Sachverhalt wird mit dem Begriff „Rückführung“ bezeichnet. Die Rückführung von Messergebnissen ist z. B. eine fundamentale Forderung von QM-Systemen nach EN ISO 9000 ff.

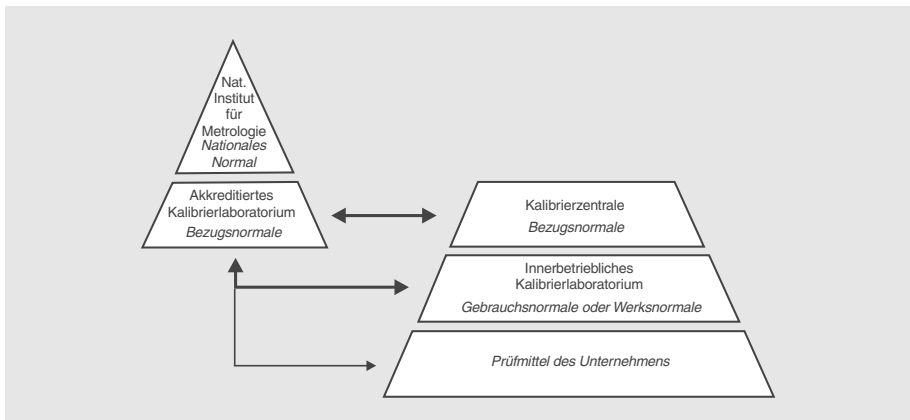


Bild 6-4: Kalibrierhierarchie

6.2.4 Geeignete Normale

An die Prüflinge jeder Stufe der aufgezeigten Kalibrierhierarchie werden bestimmte Anforderungen bezüglich ihrer messtechnischen Eigenschaften gestellt. Dies gilt besonders im Bezug auf Langzeitstabilität und Hysteresefreiheit. Zur Spitze der Pyramide hin werden diese Anforderungen immer strenger. So dürfen Widerstandsthermometer, die als Normalthermometer zur Darstellung der ITS-90 dienen sollen (die höchste Stufe der Pyramide), nur aus spektral reinem Platinmaterial gefertigt sein. Thermometer dieser Bauart werden üblicherweise auch als *Bezugsnormale* für Kalibrierlaboratorien verwendet.

Werden Thermoelemente als Bezugsnormale verwendet, kommen nur Edelmetall-Thermoelemente (bevorzugt der Typ S (Pt10%Rh-Pt)) in Betracht. Diese Thermoelemente müssen besonders homogen in ihrer Legierungszusammensetzung sein, damit inhomogene Temperaturverteilungen des Kalibrierofens außerhalb des eigentlichen Kalibrierbereichs keinen Einfluss auf das Messergebnis nehmen.

Für die Anwendung als *Gebrauchsnormale* eignen sich durchaus auch technische Widerstandsthermometer nach EN 60751. Allerdings sollten durch eine intensive Vorprüfung die besten Exemplare bezüglich Stabilität, Hysteresefreiheit und hohem Isolationswiderstand aus der normalen Produktstreuung herausselektiert werden. Besonders bezüglich des Isolationswiderstandes dürfen hier die Forderungen der EN 60751 nur als Mindestforderung angesehen werden. Ein brauchbares Thermometer, das als Normal gute Dienste leisten soll, muss diese Forderungen deutlich übersteigen. Die Industrie bietet für diesen speziellen Anwendungsfall Sonderkonstruktionen an.

6.2.5 Der Wasser-Tripelpunkt

Fixpunktkalibrierungen sind Kalibrierungen mit den kleinsten Messunsicherheiten. Typisch dafür sind Messunsicherheiten im Bereich von 0,5 mK bis 5 mK (im Temperaturbereich: 0,01...660 °C). Sie sind aber auch die Kalibriermethode, mit dem höchsten apparativen und zeitlichen Aufwand. Fixpunktkalibrierungen werden daher nur in einigen Kalibrierlaboratorien angewandt.

Der Tripelpunkt des Wassers ist der einzige Fixpunkt, der in praktisch allen hochwertig arbeitenden Kalibrierlaboratorien vorzufinden ist. Er ist der wichtigste Definitionspunkt der ITS-90-Skala und wird zur regelmäßigen Überprüfung der im Labor verwendeten Normalthermometer (Bezugsnormale) herangezogen. Der Tripelpunkt des Wassers stellt die Temperatur $t_{90} = +0,01\text{ °C}$ mit hoher Präzision dar (Messunsicherheit < 5 mK) und eignet sich somit hervorragend zum Auffinden auch kleinster Abweichungen im Widerstandswert eines Normals vom Sollwert. Anhand dieser evt. Abweichungen, lässt sich entscheiden, ob das Normal einer neuen Rekalibrierung unterzogen werden muss, oder weiter zur Anwendung freigegeben ist.

Zur Darstellung (Erzeugung) des Wasser-Tripelpunktes dient die sogenannte Tripelpunktzelle.

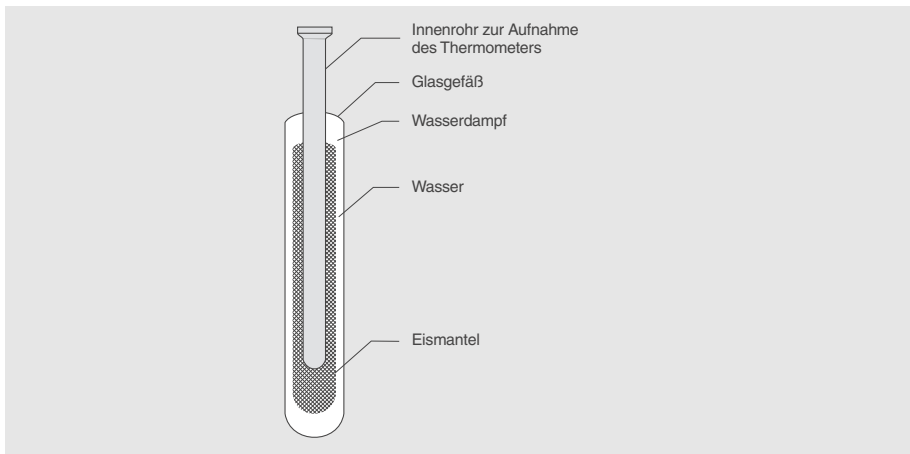


Bild 6-5: Tripelpunktzelle

Seit Einführung der ITS-90, ersetzt der Wasser-Tripelpunkt den bisher verwendeten Eispunkt (0 °C).

6.2.6 Die Dokumentation von Kalibrierergebnissen

Eine Kalibrierung ohne Dokumentation ist praktisch ohne Bedeutung. Ein Zeugnis oder Zertifikat soll die Ergebnisse der Kalibrierung dokumentieren und die Rückführbarkeit der Kalibrierergebnisse auf die Nationalen Normale aufzeigen und zwar in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI). Es stellt den Qualitätsnachweis des Kalibriergegenstandes dar.

Im industriellen Rahmen gibt es Qualitätsnachweise in unterschiedlichen Formen. Die bekanntesten sind die Zertifikate nach EN 10204 (ehemals DIN 50049), als eine anerkannte Form der Werkstoffbelegung und Materialprüfung. Darüber hinaus werden die Qualitätszertifikate nach DIN 55350 Teil 18, als Form der Bescheinigung von auftragsbezogen festgelegten Qualitätsmerkmalen jeder Art angewendet. Die genannten Normen regeln zwar, welche Ergebnisse Inhalt des jeweiligen Zertifikates sind und wer die Berechtigung hat ein solches Zertifikat zu erstellen, sie machen aber keine weitere Aussage über den Aufbau und den weiteren Inhalt. Inhalt und Aufbau der *Kalibrierscheine des Deutschen Kalibrierdienstes DKD* dagegen werden durch die Schrift „DKD-5“ geregelt.

DKD-Kalibrierscheine bestehen aus einem Deckblatt mit allgemeinen Angaben zum Kalibriergegenstand, zum Auftraggeber und zum ausführenden Kalibrierlabor. Darüber hinaus finden sich dort Aussagen über die internationale Anerkennung von DKD-Kalibrierscheinen im Rahmen der EA (European Cooperation for Accreditation), die sich auf ein multilaterales Abkommen stützt. Die Folgeseiten des Kalibrierscheins dokumentieren Art und Durchführung der Kalibrierung, benennen die verwendeten Normale und ihre Rückführung, beschreiben die Umgebungsbedingungen und belegen die Kalibrierergebnisse.

Zur vollständigen Angabe der Kalibrierergebnisse gehören der Wert der Messgröße, der Messwert, die Messabweichung und die Gesamtmessunsicherheit. Ergänzend können noch Aussagen über Konformitäten (Toleranzeinhaltungen) gemacht werden.

Der DKD-Kalibrierschein ist zu erkennen am:

DKD-Logo (blau oder schwarz)



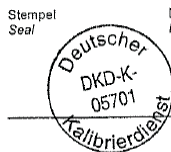
Bundesadler (schwarz)



DKD - Kalibriermarke (rot)



Stempel des Labors



Die DKD-Kalibriermarke wird auch auf dem Kalibriergegenstand aufgebracht.

6.2.7 Der Deutsche Kalibrierdienst (DKD)

Der Deutsche Kalibrierdienst (DKD) ist ein Zusammenschluss von Kalibrierlaboratorien aus Industrieunternehmen, Forschungsinstituten, technischen Behörden, Überwachungs- und Prüfinstitutionen. Diese Laboratorien werden von der Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes akkreditiert und überwacht. Sie führen Kalibrierungen von Messgeräten und Maßverkörperungen für die bei der Akkreditierung festgelegten Messgrößen und Messbereiche durch. Die von ihnen ausgestellten DKD-Kalibrierscheine sind ein Nachweis für die Rückführung auf nationale Normale, wie sie von der Normenfamilie DIN EN ISO 9000 und der DIN EN ISO/IEC 17025 gefordert werden.

Hintergrund für die Gründung des DKD 1977 war die steigende Nachfrage nach rückführbaren Kalibrierungen, die von der PTB selbst nicht mehr ausreichend, vor allem in terminlicher Sicht, befriedigt werden konnte.

Die Aufgabenverteilung wurde wie folgt geregelt:

Aufgaben der Akkreditierungsstelle:

- Akkreditierung und Überwachung von Kalibrierlaboratorien:
Bearbeitung und Entscheidung der Akkreditierungsanträge; Überwachung der akkreditierten Kalibrierlaboratorien; Planung, Durchführung und Bewertung von Ringvergleichen.
- Vertretung des Deutschen Kalibrierdienstes:
Zusammenarbeit mit Beirat, Fachausschüssen und Expertengremium.
Mitwirkung in Gremien des Deutschen Akkreditierungsrates (DAR), der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC).
Mitarbeit in nationalen und internationalen Normungs- und Lenkungsgremien des Messwesens.
- Umsetzung neuer Entwicklungen:
Mitwirkung bei der Entwicklung fortschrittlicher neuer Überwachungs-instrumentarien (virtuelle Laborkontrolle; Mess- und Prüfmittel);
Einheitliche Darstellung der Messunsicherheit.

Aufgaben der DKD-Laboratorien:

- Die Kalibrierlaboratorien kalibrieren auftragsbezogen Mess- und Prüfeinrichtungen.
- Sie erstellen Kalibrierscheine, welche die Ergebnisse der Kalibrierung zahlenmäßig dokumentieren.
- Die Kalibrierlaboratorien haften für den entstehenden Schaden, der auf fehlerhafte Kalibrierungen zurückzuführen ist.

6.2.8 DKD-Laboratorien bei ABB

Das ABB-Werk in Alzenau hat ein DKD-Kalibrierlabor, das für die Kalibrierung von Temperaturfühlern eingerichtet wurde und unter der Zulassungsnummer DKD-K-05701 eingetragen ist.



Bild 6-6: Blick in das DKD Kalibrierlabor

Hier können DKD-Kalibrierungen im Temperaturbereich von $-35...1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ durchgeführt werden. Dabei kommen sowohl gerührte Flüssigkeitsbäder als auch Rohröfen mit Ausgleichblock zur Anwendung. Wasser-Tripelpunktzellen sind selbstverständlich ebenfalls vorhanden. Für Anforderungen hinsichtlich tiefen Temperaturen besteht die Möglichkeit der DKD-Kalibrierung am flüssigen Stickstoff (ca. $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Wichtigstes Kapital sind aber die Erfahrungen der Mitarbeiter des Labors, die auf ein langjähriges Firmen-Know-how in der Temperatur-Messtechnik zurückgreifen können.

Das Labor ist für die folgenden Kalibriergegenstände akkreditiert:

- Messwiderstände mit geeigneter Verlängerung (Pt100 und andere R_0 -Nominalwerte nach DIN EN 60751)
- Widerstandsthermometer nach DIN EN 60751
- Thermoelemente nach EN 60584 und DIN 43710 (oder vergleichbaren internationalen Normen)
- Temperaturfühler mit angeschlossenem Messumformer
- Temperaturfühler mit direktanzeigendem Messgerät
- Komplette Messketten (Fühler+Messumformer+Speisetrenner+Anzeigegerät).

Die folgende Tabelle gibt Auskunft über die kleinsten erreichbaren Messunsicherheiten, mit denen Kalibrierungen ausgeführt werden können.

Messgröße bzw. Kalibriergegenstand	Messbereich	Messbedingungen	Messunsicherheit	Bemerkung
Temperatur Widerstands- thermometer	0,010 °C	Wasser-Tripelpunktzelle	5 mK	Tripelpunkt des Wassers
	-196 °C	Siedepunkt des flüssigen Stickstoffs (LN ₂)	100 mK	Vergleich gegen Normal- Widerstands- thermometer
	-35...180 °C	gerührtes thermostatisiertes Flüssigkeitsbad	20 mK	
	180...350 °C		20 mK	
	350...500 °C		50 mK	
Edelmetall-Thermoelemente	-35...500 °C		0,5 K	
Nichtedelmetall-Thermoelemente	400...500 °C		1,0 K	
	200...400 °C		0,4 K	
	0...200 °C		0,2 K	
Widerstands-thermometer	500...850 °C	Messung im Rohrfen (Kalibrierung im Na-Wärmerohr im Bereich 550...1000 °C)	1,0 K	Vergleichsmessung gegen Thermopaar Typ S
Edelmetall-Thermoelemente	500...1000 °C		1,0 K	
	1000...1200 °C		1,5 K	
Nichtedelmetall-Thermoelemente	500...1000 °C	Messung im Rohrfen (Kalibrierung im Na-Wärmerohr im Bereich 550...1000 °C)	2,0 K	Vergleichsmessung gegen Thermopaar Typ S
	1000...1200 °C		3,0	
Edelmetall-Thermopaare in Drahtausführung ($d_{\max} \leq 1$ mm)	1554 °C	Fixpunktkalibrierung an der Temperatur des schmelzenden Palladiums	2,5 K	Abschmelzmethode
Oberflächen-Tast-thermometer (Widerstandsthermometer und Thermoelemente)	50...500 °C	Kalibriervorrichtung für Oberflächen-thermometer	0,008 K · t / °C	Methode der TU Ilmenau mit individuellem Prüfkörper t = Temperatur in °C
Messumformer mit angeschlossenem Widerstands-thermometer	-35...850 °C	wie Widerstands-thermometer	$U_{\text{prt}} + 0,1$ K	U_{prt} und U_{Te} ist die erweiterte Messunsicherheit für Widerstands-thermometer bzw. Thermoelemente
Messumformer mit angeschlossenem Thermoelement	-35...1200 °C	wie Thermoelemente	$U_{\text{Te}} + 0,1$ K	

Tab. 6-3: Akkreditierungsumfang

6.2.9 Durchführung einer Kalibrierung

Am Beispiel eines Widerstandsthermometers wird im folgenden der praktische Ablauf nach den Festlegungen einer Kalibrieranweisung beschrieben.

Ist der Prüfling in seinem Alterungsverhalten unbekannt, so wird dieses zunächst überprüft. Dazu wird der Widerstand des Prüflings am Wasser-Tripelpunkt bestimmt. Danach wird der Prüfling für einige Stunden auf eine Temperatur gebracht, die ca. 10-20 K über der höchsten Kalibriertemperatur liegt. Nach Abkühlen an Luft wird der Widerstandswert am Wasser-Tripelpunkt erneut bestimmt. Stellen sich dabei Abweichungen ein, die unterhalb einer bestimmten Stabilitätsgrenze liegen (max. 1 mK für Normal-Wth, ca. 20-30 mK für industrielle Widerstandsthermometer), so kann der Prüfling der eigentlichen Kalibrierung unterzogen werden. Werden die genannten Stabilitätskriterien nicht erfüllt, wird der gesamte Zyklus des Aufheizens, Abkühlens und der Bestimmung des Widerstandswertes am Wasser-Tripelpunkt mehrfach wiederholt (ca. 3 bis 5 mal). Dabei muss sich eine Abnahme der Änderung des Widerstandswertes ergeben, die gegen Null strebt. Thermometer, die auch nach erfolgter Alterung das Stabilitätskriterium nicht erfüllen, werden nicht oder nur mit eingeschränkter Genauigkeit kalibriert.

Für die eigentliche Kalibrierung wird der Prüfling zusammen mit einem geeigneten Normal so in den Kalibrierthermostaten eingebaut, dass sich die Messspitzen (temperaturempfindlichen Längen) möglichst nahe beieinander und in der räumlichen Mitte des Kalibrierbereiches des Bades befinden. Hat ein Temperatenausgleich zwischen den Prüflingen im Bad stattgefunden, werden die Messwerte aufgenommen. Für Präzisionskalibrierungen erfolgt die Messwerterfassung über eine AC-Messbrücke. Diese Methode bietet u. a. den Vorteil, dass durch Anpassen des externen Normalwiderstandes immer im besten Auflösungsbereich des Gerätes gearbeitet werden kann und, dass die Messung mit Wechselstrom parasitäre Thermospannungen im Messkreis kompensiert.

Die Messwerte der Prüflinge und des Normals werden zyklisch erfasst. Die Umschaltung zwischen den Messkanälen erfolgt durch einen thermospannungsarmen Messstellenumschalter. Für jeden Messkanal erfolgt online eine kontinuierliche Mittelwertbildung über eine bestimmte Anzahl n von Messungen und die Berechnung einer Standardabweichung aus den n Messungen. Unterschreiten die Standardabweichungen für alle Messkanäle ein definiertes Stabilitätskriterium s_{\max} , so können die Messwerte als Kalibrierwerte übernommen werden. Dieser Vorgang wird für alle Kalibriertemperaturen wiederholt. Zur In-situ-Kalibrierung (Überprüfung) der gesamten Messeinrichtung kann ein zusätzlicher Normalwiderstand mit bekanntem Widerstandswert in den Messzyklus mit einbezogen werden.

6.2.10 Kundenvorteile durch den DKD

DKD-Kalibrierscheine werden in allen wichtigen Industriestaaten anerkannt. Diese Tatsache gewinnt gerade unter dem Aspekt der Globalisierung der Märkte für exportorientierte Länder immer größere Bedeutung. Darüber hinaus werden DKD-Scheine als Nachweis einer ordnungsgemäß durchgeführten Messmittelüberwachung im Rahmen von Qualitätsaudits vorbehaltlos anerkannt. Dies gilt nicht nur für Audits auf der Basis der Normenreihe DIN EN ISO 9000 ff, sondern auch für Audits, denen andere Normen wie beispielsweise KTA 1401, AQAP 4a, MIL-Standard, ASME VDA, QS9000 usw. zugrundeliegen.

Mit der Akkreditierung durch die Akkreditierungsstelle des DKD ist die Richtigkeit der Kalibrierergebnisse rechtswirksam abgesichert. DKD-Kalibrierscheine stellen somit einen vollständig juristisch anerkannten Entlastungsnachweis (Nachweis der Sorgfaltspflicht) in Fällen der Produkthaftung dar. Die dem Kalibrierlabor zugestandenen Messunsicherheiten mussten im Rahmen der Akkreditierung der Akkreditierungsstelle gegenüber durch Messungen (Kalibrierung unbekannter Thermometer) bestätigt werden.

Eine systematische Messmittelkalibrierung unter Einbindung eines akkreditierten DKD-Kalibrierlabors bedeutet für den Kunden u. a.:

- höhere Messgenauigkeit,
- bessere Reproduzierbarkeit,
- Möglichkeit der präziseren Einstellung von Prozessparametern (höhere Prozessausbeute, Reduzierung des Fehleranteils),
- Vermeidung von Stillstandzeiten,
- Verringerung von Störfällen.

Die Kalibrierung von Messmitteln durch ein zugelassenes DKD-Kalibrierlabor ist also kein Luxus, den man sich in Verbindung mit einem Qualitäts-Management-System leistet, sondern bringt handfeste finanzielle Vorteile für den Anwender.

Fazit:

Der Einsatz richtig kalibrierter Temperaturfühler bedeutet Vermeidung von Ausschuss! Jedes Los, jede Charge, jede Ofenfüllung, die wegen fehlender oder mangelhaft kalibrierter Messmittel nicht oder nur eingeschränkt verwendet werden kann, verursacht Kosten und damit Verluste.

Empfehlungen für den Rekalibrierungszeitraum von technischen Temperaturfühlern

Temperaturfühler-typ	Umgebungs-atmosphäre	Temperatur-wechsel	Besondere Anfor-de-rungen	Aufbau	Max. Einsatz-tempe-ratur (°C)	Anhalts-punkte für Rekalibrie-rungsfristen (Monate)
Wider-stands-thermo-meter nach EN 60751 (drahtge-wickelter Mess-wider-stand)	reduzierend, innert oder oxidierend	keine extremen Tempe-ratur-wechsel-belastun-gen	nicht schwin-gungs-belastet	metallisches od.	200	24
				keramisches Schutzrohr	420	12
				im metallischen Schutzrohr	660	6
					850	3
				im keramischen Schutzrohr	660	9
					850	6
			schwin-gungs-belastet	metallisches od.	200	12...15
				keramisches Schutzrohr	420	12
				im metallischen Schutzrohr	660	9
					850	3
				im keramischen Schutzrohr	660	6...9
					850	6
		starke oder extreme Tempe-ratur-wechsel-belastun-gen (Tem-peratur-schock)	nicht schwin-gungs-belastet	metallisches od.	200	18
				keramisches Schutzrohr	420	12
				im metallischen Schutzrohr	660	6
					850	3
				im keramischen Schutzrohr	660	6
					850	3
			schwin-gungs-belastet	metallisches od.	200	12
				keramisches Schutzrohr	420	9...12
				im metallischen Schutzrohr	660	6
					850	3
				im keramischen Schutzrohr	660	6
					850	3

Wichtiger Hinweis:
 Die genannten Zeiträume stellen nur unverbindliche Empfehlungen dar. Je nach Einsatzbedingungen (Temperaturwechsel, Schwingungsbelastung usw.) und der Bauart des Temperaturfühlers können Rekalibrierungen in anderen Zeitabständen erforderlich sein.

Temperaturfühlertyp	Umgebungsatmosphäre	Temperaturwechsel	Besondere Anforderungen	Aufbau	Max. Einsatztemperatur (°C)	Anhaltspunkte für Rekalibrierungsfristen (Monate)
Widerstandsthermometer nach EN 60751 (Schichtmesswiderstand)	reduzierend, innert oder oxidierend	keine extremen Temperaturwechselbelastungen	nicht schwingungsbelastet	metallisches od.	200	18
				keramisches Schutzrohr	420	9
				im metallischen Schutzrohr	660	3...6
				im keramischen Schutzrohr	660	6
			schwingungsbelastet	metallisches od.	200	12
				keramisches Schutzrohr	420	9
				im metallischen Schutzrohr	660	6
				im keramischen Schutzrohr	660	6
		starke oder extreme Temperaturwechselbelastungen (Temperaturschock)	nicht schwingungsbelastet	metallisches od.	200	15
				keramisches Schutzrohr	420	9...12
				im metallischen Schutzrohr	660	3...6
				im keramischen Schutzrohr	660	3...6
			schwingungsbelastet	metallisches od.	200	12
				keramisches Schutzrohr	420	9
				im metallischen Schutzrohr	660	6
				im keramischen Schutzrohr	660	3...6

Wichtiger Hinweis:

Die genannten Zeiträume stellen nur unverbindliche Empfehlungen dar. Je nach Einsatzbedingungen (Temperaturwechsel, Schwingungsbelastung usw.) und der Bauart des Temperaturfühlers, können Rekalibrierungen in anderen Zeitabständen erforderlich sein.

Temperaturfühlertyp	Umgebungsatmosphäre	Aufbau	Maximale Einsatztemperatur (°C)	Anhaltspunkte für Rekalibrierungsfristen (Monate)
Edelmetall-Thermoelemente nach EN 60584 (Typ S (Pt10%Rh-Pt) Typ R (Pt13%Rh-Pt))	reduzierend, inert oder oxidierend	metallisches oder keramisches Schutzrohr	800	24
		im metallischen Schutzrohr	1000	12
			1250	6...8
		im keramischen Schutzrohr	1000	18
			1250	12
Unedelmetall-Thermoelemente nach EN 60584 (Typ K (NiCr-Ni) Typ N (NiCrSi-NiSi))		metallisches oder keramisches Schutzrohr	700	24
		im metalischen Schutzrohr	1000	12
			1150	6
		im keramischen Schutzrohr	1000	18
			1150	9...12
Unedelmetall-Thermoelemente nach EN 60584 (Typ J (Fe-CuNi))		metallisches oder keramisches Schutzrohr	700	12...15
		im metallischen Schutzrohr	1000	6
			1150	1)
		im keramischen Schutzrohr	1000	9...12
			1150	1)

Wichtiger Hinweis:

Die genannten Zeiträume stellen nur unverbindliche Empfehlungen dar. Je nach Einsatzbedingungen (Temperaturwechsel, Schwingungsbelastung usw.) und der Bauart des Temperaturfühlers, können Rekalibrierungen in anderen Zeitabständen erforderlich sein.

6.3 Qualitätssichernde Maßnahmen

Temperaturfühler können nicht immer ohne besondere Vorkehrungen mit den Messgegenständen in Berührung gebracht werden. Im allgemeinen sind besondere Maßnahmen zu treffen, um dem Temperaturfühler hinreichenden Schutz gegen mechanische Beanspruchungen durch Druck, Schlag, Abrieb oder Schwingungen zu geben und um ihn gegen chemische Einflüsse durch Korrosion zu schützen. Auch dürfen keine Messfehler durch elektrische Nebenschlüsse oder durch zusätzliche Spannungen auftreten. Die Temperaturfühler werden deshalb mit Schutzarmaturen umgeben (Anschlusskopf, Halsrohr, Schutzrohre mit Einschraubstutzen oder Flansch, Einschweißschutzrohre), die den jeweils vorhandenen chemischen und mechanischen Belastungen mehr oder weniger standhalten. Den mediumsberührenden Teilen wie den Schutzrohren kommt dabei besondere Bedeutung zu.

Im folgenden werden wichtige Maßnahmen genannt. Detaillierte Maßnahmen und Notwendigkeiten sollten mit dem Temperaturfühler-Lieferanten abgesprochen werden. Führende Hersteller haben Experten und Zulassungen für qualitätssichernde Maßnahmen.

Nachweisstufen für besonderen Einsatz

Vom einschlägigen deutschen und europäischen Regelwerk und von Kunden- und Bauartspezifikationen wird eine Prüfung von Bauteilen gefordert. Ziel dieser Prüfungen ist der Nachweis der Güte und die Sicherheit von Material und Fügestellen bzw. das Detektieren von Schwachstellen an Schweißkonstruktionen und Bauteilen.

Anforderungen und Ausführungen von Temperaturfühlern werden von den Regelwerken und Spezifikationen bestimmt. Ganz oben in der Hierarchie der Regelwerke steht die europäische Druckgeräte richtlinie 97/23/EG (AD2000). Sie ist seit Mai 2002 verbindlich anzuwenden.

Schutzrohre mit Einschraubstutzen oder Flansch bzw. Einschweißschutzrohr usw. erfüllen die Druckgeräte richtlinie 97/23/EG (AD2000). Für diese Komponenten ist jedoch keine Konformitätsbescheinigung nach dieser Richtlinie notwendig, siehe auch NAMUR-Empfehlung NE80.

Regelwerke – Systembezogene Qualifikation

AD Merkblatt HP 0 /TRD201

behandelt die allgemeinen Grundsätze für Auslegung, Herstellung und Prüfung von Druckbehältern und Druckbehälterteilen (z. B. Schutzrohre). Der Hersteller von Druckbehältern oder Druckbehälterteilen muss eine HP 0/TRD 201-Zulassung besitzen.

EN 10 204:20004

Metallische Erzeugnisse, Arten von Prüfbescheinigungen

DIN 55 350-18

Begriffe zu Bescheinigungen über die Ergebnisse von Qualitätsprüfungen, Qualitätsprüfzertifikate

ZFP – Personal

Qualifikation und Weiterbildung von ZfP-Personal bezüglich Prüftechnik für zerstörungsfreie Prüfungen und Strahlenschutz

Schweißerprüfungen

nach EN 287-1, DGRL 97/23/EG und TRD 201 / AD 2000 HP3

Schweißverfahrensprüfung

gemäß AD2000-HP 5/2

Spezifikationen – produktbezogene Qualifikationen

Neben den allgemeingültigen Regeln durch nationale und internationale Normen erstellt eine Vielzahl von Institutionen für besondere Branchen und Einsatzbedingungen spezielle Anforderungen hinsichtlich Produkt- und Bauartzulassungen.

Einige Beispiele:

PTB Physikalisch Technische Bundesanstalt
 Baumusterprüfungen (Explosionsschutz) und Hoheitliche Überwachung von Messgrößen (Normale)

DKD Deutscher Kalibrierdienst Akkreditierungsstelle
 Überprüfung der DKD-Laboratorien

EXAM Bergbau Versuchsstrecke Dortmund-Derne
 Baumusterprüfungen für Explosionsschutz

VDA Verband der Deutschen Automobilindustrie

KTA 1401 Kerntechnische Anlagen

Schiffszulassungsgesellschaften

GL	Germanischer Lloyd
LRS	Lloyds Register of Shipping
DNV	Norske Veritas
BV	Bureau Veritas
NK	Nippon Kaiji Kyokai
ABS	American Bureau of Shipping

Sonderprüfungen (zerstörungsfreie und messtechnische Prüfungen)

Mechanische Prüfungen:

- *Schwingungsprüfungen* nach Kunden- und Bauartspezifikation
z. B. für Baumusterprüfugen mit Simulation von Erdbeben und Flugzeugabstürzen für den Einsatz in Kernkraftwerken, Ermittlung der Resonanzstellen bei Einsatz in Strömungen mit Wirbelablösungen, Typ-Prüfungen im Resonanzpunkt in vorgegebenen Frequenzbereichen bei Schiffsfühlerzulassungen.
- *Durchstrahlungsprüfung* mit max. 200 KV Leistung gemäß DIN 54 111 Teil 1, Prüfung metallischer Werkstoffe mit Röntgen- und Gammastrahlen. Bei der Röntgenprüfung sollen Fehler wie Poren, Lunker, Risse usw. im Basismaterial und/oder in der Schweißnaht festgestellt werden. Die Beurteilung von Prüfbefunden an Schmelzschweißverbindungen von Druckbehältern und drucktragenden Druckbehälterteilen erfolgt nach AD-Merkblatt HP 5/3 und/oder EN 25817. In diesen Regelwerken werden die Kriterien für die Zulässigkeit von Fehlern definiert.
- *Druckprüfung* mit Gas (bis 200 bar) und Wasser (bis 3000 bar). Mit der Außen- und Innendruckprüfung wird die Festigkeit und Dichtheit von Schutzrohren und Prozessanschlüssen überprüft.
- *Dichtheitsprüfung* mit: Helium Lecktest mit Leckrate bis 1×10^{-9} mbar $\times 1 \times \text{s}^{-1}$, z. B. an keramischen Durchführungen. Defekte werden mit Lecksucher, Schnüffelsonde oder durch Druckabfall oder Tropfenbildung festgestellt.
- *Oberflächenrissprüfung* mit fluoreszierendem oder rot/weiß-Verfahren
Auswertung nach AD-Merkblatt HP 5/3
- *Härteprüfung* nach Vickers (HV) und Rockwell (HRC) sowie Shore A für Gummiwerkstoffe

Elektrische Prüfungen:

- *DKD-Kalibrierungen* von -40...1200 °C, sowie die Möglichkeit von Kalibrierungen am flüssigen Stickstoff (-195,8 °C) und am Palladiumpunkt (1554 °C).
- *Werkskalibrierungen* von -195,806 (N₂) ...1554 (Pd) °C
- *Ansprechzeitmessung* in Wasser bis $v = 0,6$ m/s und in Luft bis $v = 3,0$ m/s
- *Durchschlagsprüfung* bis max. 3000 V AC

Bescheinigung von Prüfungen

• **nach DIN EN 10 204**

Zeugnisse nach dieser Norm dienen in der Regel als Werkstoffnachweis für chemische und physikalische Eigenschaften, können aber auch durch Prüfungen bestätigte Eigenschaften (z. B. Dichtheit oder Druckfestigkeit, Temperaturprüfungen) belegen.

• *Werkszeugnis 2.1*

Bestätigung durch den Hersteller, dass die gelieferten Erzeugnisse der Bestellung entsprechen, ohne Angabe von Prüfergebnissen.

• *Werkszeugnis 2.2*

Bestätigung durch den Hersteller nicht spezifischer (nicht auftragsbezogener) Prüfergebnisse, Prüfungen können vom Fertigungspersonal durchgeführt werden (nicht-spezifische Prüfungen).

• *Abnahmeprüfzeugnis 3.1*

Bestätigung des Materials und seiner Prüfungen gemäß Kundenspezifikation oder amtlichen Vorschriften durch den Werksachverständigen. Dieser ist vom Hersteller beauftragt und unabhängig von der Fertigungsabteilung.

• *Abnahmeprüfzeugnis 3.2*

Bestätigung durch den von der Fertigungsabteilung unabhängigen Abnahmebeauftragten des Herstellers und den vom Besteller beauftragten Abnahmebeauftragten oder den in den amtlichen Vorschriften genannten Abnahmebeauftragten (Ergebnisse von spezifischen Prüfungen).

• **nach DIN 55350 Teil 18**

Qualitätsprüfzertifikate nach dieser Norm bestätigen alle möglichen Qualitätsmerkmale aufgrund durchgeführter Prüfungen und Messungen. Es werden nur die häufigsten Bescheinigungen gelistet.

• *Qualitätsprüfzertifikat DIN 55350-18-4.1.1*

Herstellerzertifikat O ohne Angabe der Prüfergebnisse nicht spezifischer (nicht auftragsbezogener) Prüfungen, z. B. Chargenwerte oder Stichproben, ausgestellt durch den Hersteller-Prüfbeauftragten (Werksachverständiger).

- *Qualitätsprüfzertifikat DIN 55350-18-4.1.2*
Herstellerzertifikat O ohne Angabe der Prüfergebnisse nicht spezifischer (nicht auftragsbezogener) Prüfungen, z. B. Chargenwerte oder Stichproben, ausgestellt durch den Hersteller-Prüfbeauftragten (Werksachverständiger).
- *Qualitätsprüfzertifikat DIN 55350-18-4.2.1*
Herstellerzertifikat O ohne Angabe der Prüfergebnisse spezifischer (auftragsbezogener) Prüfungen, ausgestellt durch Hersteller-Prüfbeauftragten (Werksachverständiger).
- *Qualitätsprüfzertifikat DIN 55350-18-4.2.2*
Herstellerzertifikat M mit Angabe der Prüfergebnisse spezifischer (auftragsbezogener) Prüfungen, ausgestellt durch Hersteller-Prüfbeauftragten (Werksachverständiger).

Hinweis: Für alle Prüfzeugnisse nach DIN 55350 Teil 18 ist der Prüfumfang zuvor festzulegen.

Weitere Bescheinigungen

- *Herstellererklärung*
Konformitätsbescheinigung des Herstellers für einfache elektrische Betriebsmittel nach EN 50020 Abs. 5.4 in eigensicheren Messkreisen mit Angaben über die entsprechenden Bedingungen.
- *DKD-Zertifikate*
Kalibrierscheine für Temperaturfühler, die nur von akkreditiertem DKD-Laboratorium mit benanntem Personal ausgestellt werden dürfen (Kalibrier-Laboratorium nach DIN EN ISO/IEC 17025) Prüfungen dürfen nur mit den im Akkreditierungsumfang genannten Geräten und Normalen durchgeführt werden.

Werkstoffe und Verfahren

Sie entsprechen den jeweils gültigen internationalen Standards, wie z. B. DIN, BS, ASTM, usw. Sie werden auch nach speziellen Prüf- und Abnahmespezifikationen der Kunden geliefert (DIN EN 10204:2005). Die Abnahme kann vom Kunden selbst, durch eine unabhängige Abnahmegesellschaft (TÜV, LRS, DNV etc.) oder durch einen eigenen unabhängigen Werkssachverständigen erfolgen. Es besteht ein umfangreiches Qualitätssicherungssystem zur Sicherstellung der Einhaltung der internationalen Standards.

7 Explosionsschutz

7.1 Einleitung

Der Explosionsschutz ist weltweit durch unterschiedliche landesspezifische Normen geregelt. Die globalen ABB-Vertriebsprodukte erfüllen diese Anforderung mit einer kleinen Produktvarianz, die auf die jeweiligen nationalen Anforderungen des Explosionsschutzes abgestimmt sind. Das bedeutet: gleiches technisches Design mit verschiedenen länderspezifischen Zulassungen. Nur so ist eine weltweite Vermarktung bei kleiner Produktvarianz möglich und der Anwender kann weltweit das gleiche Produkt einsetzen. Diese Strategie führt zu Kostenreduzierungen auf der Kundenseite, z.B. bei Schulungen, Projektierungen und Wartung der entsprechenden Produkte.

	Europäische Union	USA	Kanada	Russland	Ukraine	Australien
Richtlinie/ Norm/ Zulassungs- stelle	ATEX – PTB – EXAM BBG – KEMA – TÜV Nord – ZELM – IBExU...	FM EX- Approval UL EX- Approval	CSA- Certificate	GOST Russland	GOST- Ukraine	IECEX
Gültigkeit	Keine Ein- schränkung	Keine Ein- schränkung	Keine Ein- schränkung	Ca. 5 Jahre	Ca. 5 Jahre	Keine Ein- schränkung
Fertigungs- überwachung/ Audit	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja

Tab. 7-1: Übersicht wichtiger länderspezifischer Normungen, Zulassungen und Zulassungsstellen

Im Kern sind die Anforderungen der Zulassungen sehr ähnlich und haben das gemeinsame Ziel, dass nach aktuellem Stand der Technik keine Explosion in einer Anlage, die gemäß den nationalen Anforderungen des Explosionsschutzes instrumentiert wurde, stattfindet.

7.2 Begriffsdefinitionen

Explosion

Unter einer Explosion versteht man eine exotherme Reaktion eines Stoffes, die mit hoher Reaktionsgeschwindigkeit abläuft. Dies setzt das Vorhandensein eines explosionsfähigen Gemisches/Atmosphäre und einer Zündquelle, sowie einer äußeren Einwirkung zum Auslösen der Explosion voraus.

Explosionsgefahr

Unter Explosionsgefahr versteht man das Vorhandensein eines explosionsfähigen Gemisches/Atmosphäre, ohne dass eine Zündung durch eine Zündquelle mit äußerer Einwirkung erfolgt.

Explosionsfähiges Gemisch/Atmosphäre

Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben unter atmosphärischen Bedingungen, in dem sich der Verbrennungsvorgang nach erfolgter Entzündung auf das gesamte unverbrannte Gemisch überträgt.

Explosionsgrenzen

Die untere (UEG) und obere (OEG) Explosionsgrenze gibt den Bereich eines Gemisches in Luft an, in dem es explosionsfähig ist. Die Grenzen können in der entsprechenden Literatur stoffspezifisch nachgeschlagen werden.

Explosionsgruppen gemäß EN-Normen

Die Zündfähigkeit und das Zünddurchschlagsvermögen eines explosionsfähigen Gemisches sind stofftypische Eigenschaften. Diese Angaben sind besonders wichtig für die Konstruktion von Betriebsmitteln. Bei eigensicheren elektrischen Betriebsmitteln ist die Zündenergie das Kriterium für die Zündfähigkeit. Je geringer die erforderliche Zündenergie, umso gefährlicher das Gemisch. Das Zünddurchschlagsvermögen liefert den Hinweis auf die Ausbildung von Grenzspaltweiten und Spaltlängen in den Betriebsmitteln der druckfesten Kapselung.

Explosionsgruppe	Zündenergie	Testgas	Bereich
I	< 200 µJ ¹⁾	Methan in Luft	Schlagwetterschutz
II A	< 160 µJ ¹⁾	Propan in Luft	Explosionsschutz
II B	< 60 µJ ¹⁾	Ethylen in Luft	
II C	< 20 µJ ¹⁾	Wasserstoff in Luft	
1) Verdopplung der Energiewerte zulässig, wenn die Ladespannung < 200 V ist.			

Tab. 7-2: Aufstellung der Explosionsgruppen nach EN-Normen

Gase und Dämpfe werden nach den genannten Kriterien klassifiziert. Nachstehende Tabelle zeigt die Zuordnung einiger Stoffe. Das für diese Stoffe verwendete Betriebsmittel muss entsprechend qualifiziert sein.

Explosions- gruppe	Zündtemperatur					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
I	Methan					
II A	Aceton Ethan Ethylacetat Ammoniak Benzol (rein) Essigsäure Methanol Propan Toloul	Ethylalkohol i-Amylacetat n-Butan n-Butylalkohol	Benzine Diesel- kraftstoff Flugzeug- kraftstoff Heizöle n-Hexan	Acetylaldehyd Ethyläther		
II B	Kohlen- monoxid	Ethylen	Schwefel- wasserstoff	Ethylether Butylether		
II C	Wasserstoff	Acetylen				Schwefel- kohlenstoff

Tab. 7-3: Stoffzuordnung nach Explosionsgruppe

Flammpunkt

Ist die niedrigste Temperatur, bei der sich aus der zu prüfenden Flüssigkeit unter festgelegten Bedingungen Dämpfe in solcher Menge entwickeln, dass sie mit der Luft über dem Flüssigkeitsspiegel ein entflammbares Gemisch ergeben.

Zündenergie

Die Mindest-Zündenergie ist die Energie, die in einem Funken steckt, um das umgebende explosionsfähige Gas-Luftgemisch zu zünden.

Zündtemperatur gemäß EN-Normen

Die Zündtemperatur eines brennbaren Stoffes ist die in einem Prüfgerät ermittelte niedrigste Temperatur einer erhitzten Wand, an der sich der brennbare Stoff im Gemisch mit Luft gerade noch entzündet.

Die Zündtemperatur von Flüssigkeiten und Gasen wird nach dem in DIN 51794 festgelegten Verfahren ermittelt. Für die Bestimmung der Zündtemperatur brennbarer Stäube existiert zur Zeit noch kein genormtes Verfahren. In der einschlägigen Literatur werden dazu mehrere Verfahren angegeben.

Die brennbaren Gase und Dämpfe brennbarer Flüssigkeiten sind nach ihren Zündtemperaturen, die Betriebsmittel nach der Oberflächentemperatur, in Temperaturklassen eingeteilt.

Temperaturklasse	Höchstzulässige Oberflächentemperatur der Betriebsmittel in °C	Zündtemperaturen der brennbaren Stoffe in °C
T1	450	> 450 ...
T2	300	> 300 ≤ 450
T3	200	> 200 ≤ 300
T4	135	> 135 ≤ 200
T5	100	> 100 ≤ 135
T6	85	> 85 ≤ 100

Tab. 7-4: Temperaturklassen-Einteilung

Zündquellen

Nachfolgend sind häufig in der Praxis vorkommende Zündquellen genannt:

- heiße Oberflächen (Heizungen, heiße Apparate, etc.),
- Flammen und heiße Gase (von Verbrennungen),
- mechanisch erzeugte Funken (durch Reib-, Schlag- und Schleifvorgänge),
- Funken von elektrischen Anlagen,
- Ausgleichsströme,
- statische Elektrizität,
- Blitzschlag, Ultraschall,
- optische Zündquellen,
- elektrische Felder durch Funkwellen,
- ...

Primärer und sekundärer Explosionsschutz

Bei der Vermeidung von Explosionen wird vom primären und sekundären Explosionsschutz gesprochen.

Der *primäre Explosionsschutz* basiert auf der Verhinderung der Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre, also:

- Vermeidung von brennbaren Flüssigkeiten und Gasen,
- Veränderung des Flammpunktes nach oben,
- Verhinderung von Explosionsgemischen durch Konzentrationsbegrenzungen,
- Belüftung, technisch oder Freifeldanlagen,
- Konzentrationsüberwachung mit Notabschaltung.

Der *sekundäre Explosionsschutz* umfasst alle Maßnahmen, mit denen die Zündung einer gefährlichen Atmosphäre verhindert bzw. vermieden wird, also:

- Keine wirksame Zündquelle
 - Eigensichere Betriebsmittel
 - Kapselung der Zündquelle zur Verhinderung der externen Zündung
 - Sandkapselung
 - Vergusskapselung
 - Druckfeste Kapselung
 - Überdruck-Kapselung
 - ...

Zoneneinteilung gemäß EN-Norm

Der explosionsgefährdete Bereich ist in Zonen eingeteilt. Hierbei wird die Wahrscheinlichkeit mit der eine explosionsfähige Atmosphäre vorhanden sein kann, als Kriterium zur Zoneneinteilung wie folgt verwendet:

Für Gase, Dämpfe und Nebel (EN 60079-10)

Zone 0: Bereich, in dem eine gefährliche, explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebel *ständig, über lange Zeiträume, oder häufig vorhanden ist*.

Kategorie: 1 G

Zone 1: Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb *gelegentlich* eine explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebel bilden kann.

Kategorie: 2 G

Zone 2: Bereich, in dem bei Normalbetrieb eine explosionsfähige Atmosphäre als Gemisch aus Luft und brennbaren Gasen, Dämpfen oder Nebel normalerweise *nicht und wenn, aber nur kurzzeitig* auftritt.

Kategorie: 3 G

Für Stäube (EN 61241-10)

Zone 20: Bereich, in dem eine explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbaren Staub *ständig, über lange Zeiträume, oder häufig vorhanden ist*.

Kategorie: 1 D

Zone 21: Bereich, in dem sich im *Normalbetrieb* eine explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbaren Staub *bilden kann*.

Kategorie: 2 D

Zone 22: Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb eine explosionsfähige Atmosphäre in Form einer Wolke aus in der Luft enthaltenem brennbaren Staub normalerweise *nicht und wenn, aber nur kurzzeitig* auftritt.
Kategorie: 3 D

Anmerkung:

Schichten, Ablagerungen und Anhäufungen von brennbarem Staub sind wie jede andere Ursache, die zur Bildung einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre führen kann, zu berücksichtigen.

Als Normalbetrieb gilt der Zustand, in dem eine Anlage innerhalb ihrer Auslegungsparameter betrieben wird.

Betriebsmittel der Kategorie 1G/1D, Gerätegruppe II

Kategorie 1G (Gas) und 1D (Staub) umfasst Betriebsmittel, die konstruktiv so gestaltet sind, dass sie in Übereinstimmung mit den vom Hersteller angegebenen Kenngrößen betrieben werden können und ein sehr hohes Maß an Sicherheit gewährleisten.

Betriebsmittel dieser Kategorien sind zur Verwendung in der Zone 0 (1G Betriebsmittel) und in der Zone 20 (1D Betriebsmittel) geeignet. Geräte dieser Kategorien müssen selbst bei selten auftretenden Gerätestörungen das erforderliche Maß an Sicherheit gewährleisten und weisen daher Explosionsschutzmaßnahmen auf, so dass

- beim Versagen einer apparativen Schutzmaßnahme mindestens eine zweite unabhängige apparative Schutzmaßnahme die erforderliche Sicherheit gewährleistet, bzw.
- beim Auftreten von zwei unabhängigen Fehlern die erforderliche Sicherheit gewährleistet wird.

Die Geräte dieser Kategorie müssen die weitergehenden Anforderungen des Anhangs II, Nummer 2.1 der EU-Richtlinie 94/9/EG erfüllen.

Betriebsmittel der Kategorie 2G/2D, Gerätegruppe II

Kategorie 2G (Gas) und 2D (Staub) umfasst Betriebsmittel, die konstruktiv so gestaltet sind, dass sie in Übereinstimmung mit den vom Hersteller angegebenen Kenngrößen betrieben werden können und ein hohes Maß an Sicherheit gewährleisten.

Betriebsmittel dieser Kategorien sind zur Verwendung in der Zone 1 (2G Betriebsmittel) und in der Zone 21 (2D Betriebsmittel) geeignet. Die apparativen Explosionsschutzmaßnahmen dieser Kategorie gewährleisten selbst bei häufigen Gerätestörungen oder Fehlerzuständen, die üblicherweise zu erwarten sind, das erforderliche Maß an Sicherheit.

Betriebsmittel der Kategorie 3G/3D, Gerätegruppe II

Kategorie 3G und/oder 3D umfasst Betriebsmittel, die konstruktiv so gestaltet sind, dass sie in Übereinstimmung mit den vom Hersteller angegebenen Kenngrößen betrieben werden können und ein Normalmaß an Sicherheit gewährleisten.

Betriebsmittel dieser Kategorien sind zur Verwendung in der Zone 2 (3G Betriebsmittel) und in der Zone 22 (3D Betriebsmittel) während eines kurzen Zeitraums geeignet. Betriebsmittel dieser Kategorie gewährleisten bei normalem Betrieb das erforderliche Maß an Sicherheit.

DIV Einteilung gemäß NEC500 (USA) und CEC Annex J (Kanada)

Neben der Zoneneinteilung Zone 0 und Zone 1 nach europäischer Instrumentierung für den explosionsgefährdeten Bereich, gibt es gemäß NEC500 und CEC Annex J die Einteilung in Divisionen. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick für die Einteilung der Zonen und Divisionen.

IEC / EU	Zone 0	Zone 1	Zone 2
US NEC505	Zone 0	Zone 1	Zone 2
US NEC500	Division 1		Division 2
CA CEC Section 18	Zone 0	Zone 1	Zone 2
CA CEC Annex J	Division 1		Division 2

Tab. 7-5: Gegenüberstellung von Zonen und Divisionen

IEC Klassifizierung gemäß IEC 60079-10

EU Klassifizierung gemäß EN60079-10

US Klassifizierung gemäß ANSI/NF PA70 National Electrical Code Article 500 und/oder 505

CA Klassifizierung gemäß CSA C22.1 Canadian Electrical Code (CEC) Section 18 und/oder Annex J

Explosionsgruppen gemäß NEC500 (USA) und CEC Annex J (Kanada)

Explosionsgruppe US NEC500 CA CEC Annex J	Explosionsgruppe US NEC505 CA CEC Section 18 EU IEC	Testgas	Bereich
Mining	I	Methan	Schlagwetterschutz
Class I Group D Class I Group C Class II Group A Class I Group B	II A II B II C II B + Wasserstoff	Propan Ethylen Acetylen Wasserstoff	Explosionsschutz

Tab. 7-6: Aufstellung der Explosionsgruppen nach US/CA-Normen

Temperaturklassen gemäß NEC500 (USA) und CEC Annex J (Kanada)

Max. Oberflächen-Temperatur	US NEC505 CA CEC Section 18 EU IEC	US NEC 500 CA CEC Annex J
450 °C	T1	T1
300 °C	T2	T2
280 °C		T2A
260 °C		T2B
230 °C		T2C
215 °C		T2D
200 °C	T3	T3
180 °C		T3A
165 °C		T3B
160 °C		T3C
135 °C	T4	T4
120 °C		T4A
100 °C	T5	T5
85 °C	T6	T6

Tab. 7-7: Temperaturklassen-Einteilung nach US/CA-Normen

7.3 Zündschutzarten in Europa und in Nordamerika

Zündschutzart „Eigensicherheit - Ex i“ gemäß EN 50020 bzw. EN 60079-11

Die im explosionsgefährdeten Bereich eingesetzten Betriebsmittel enthalten nur eigensichere Stromkreise. Ein Stromkreis ist dann eigensicher, wenn kein Funke und kein thermischer Effekt, der unter festgelegten Prüfungsbedingungen (die den normalen Betrieb und bestimmte Fehlerbedingungen umfassen) auftritt, die Zündung einer bestimmten explosionsfähigen Atmosphäre verursachen kann.

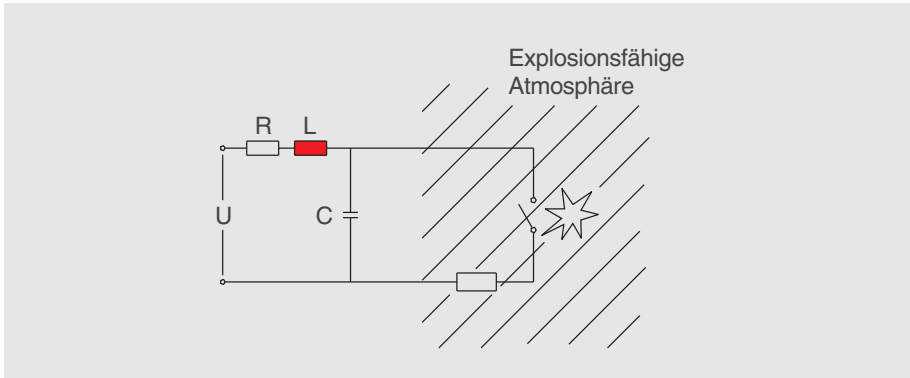


Bild 7-1: Schemadarstellung Eigensicherheit

Bei Eigensicherheit unterscheidet man zwei Kategorien.

Kategorie "ia" zum Einsatz in Zone 0:

Die Geräte müssen so konzipiert sein, dass im Falle eines Fehlers oder bei jeder möglichen Kombination von zwei Fehlern eine Zündung ausgeschlossen ist.

Kategorie "ib" zum Einsatz in Zone 1:

Die Geräte müssen so konzipiert sein, dass im Falle eines Fehlers eine Zündung ausgeschlossen ist.

Zündschutzart „Druckfeste Kapselung Ex - d“ gemäß EN 50018 bzw. EN 60079-1

Teile, die eine explosionsfähige Atmosphäre zünden können, sind in ein Gehäuse eingeschlossen, das bei der Explosion eines explosionsfähigen Gemisches im Innern den Druck aushält und eine Übertragung der Explosion auf die das Gehäuse umgebende Atmosphäre durch spezielle Geometrie der Spalte verhindert.

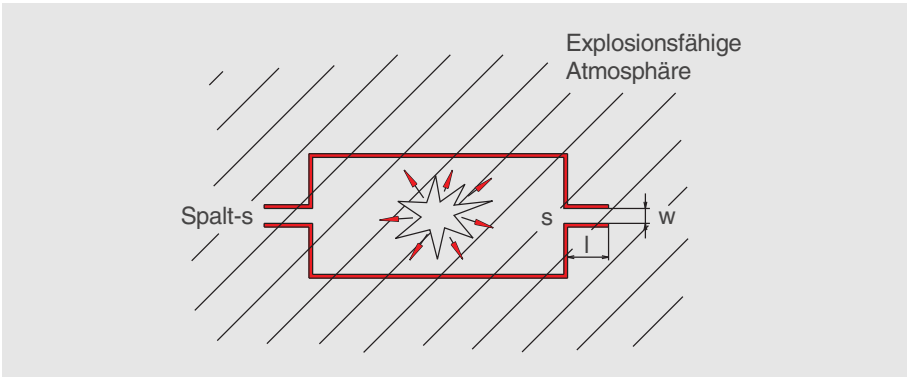


Bild 7-2: Schemadarstellung Druckfeste Kapselung

Zündschutzart „erhöhte Sicherheit Ex e“ gemäß EN 50019 bzw. EN 60079-7

Hier sind zusätzliche Maßnahmen getroffen, um mit einem erhöhten Grad an Sicherheit die Möglichkeit unzulässig hoher Temperaturen und das Entstehen von Funken und Lichtbögen im Inneren oder an äußeren Teilen elektrischer Betriebsmittel, bei denen diese im normalen Betrieb nicht auftreten, zu verhindern.

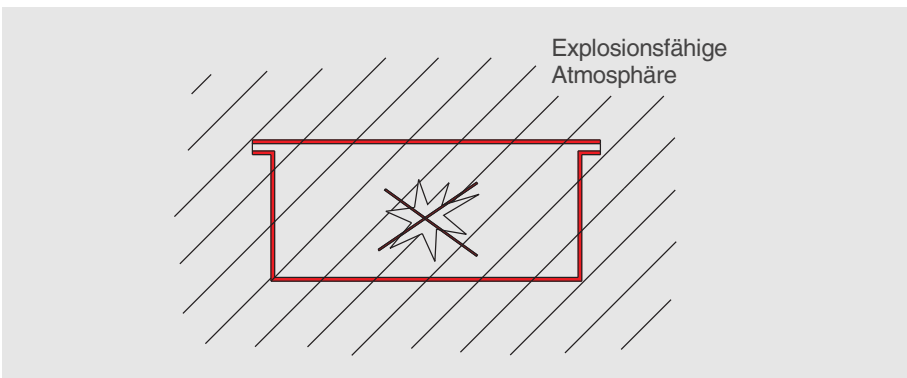


Bild 7-3: Schemadarstellung Erhöhte Sicherheit

Zündschutzart „Vergusskapselung Ex m“ gemäß EN 50028 bzw. EN 60079-18

Teile, die eine explosionsfähige Atmosphäre zünden können, werden so in eine gegenüber Umgebungseinflüssen genügend widerstandsfähige Vergussmasse eingebettet, dass die explosionsfähige Atmosphäre weder durch Funken noch durch Erwärmung, die innerhalb der Vergusskapselung entstehen können, gezündet werden kann.

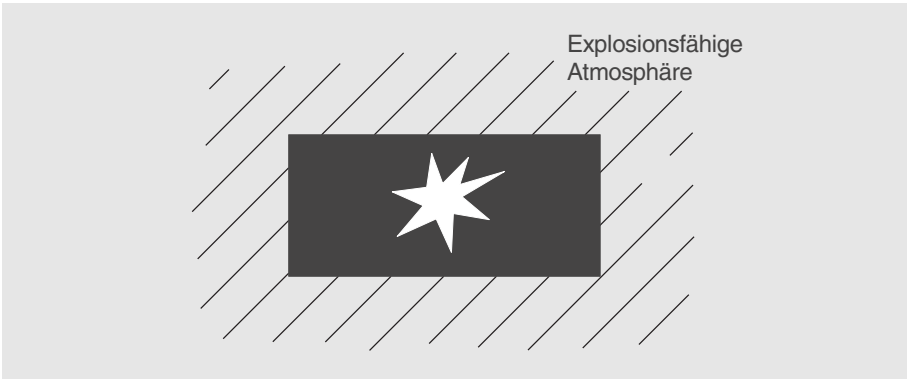


Bild 7-4: Schemadarstellung Vergusskapselung

Zündschutzart „nicht funkende Betriebsmittel – nA“ gemäß EN 50021 bzw. EN 60079-15

Nicht funkende Betriebsmittel sind so konstruiert, dass das Risiko des Auftretens von Lichtbögen oder Funken, die eine Zündgefahr während des normalen Gebrauchs entstehen lassen können, minimiert wird. Der normale Gebrauch schließt das Entfernen oder Einbringen von Bauteilen aus, während der Stromkreis unter Spannung steht.

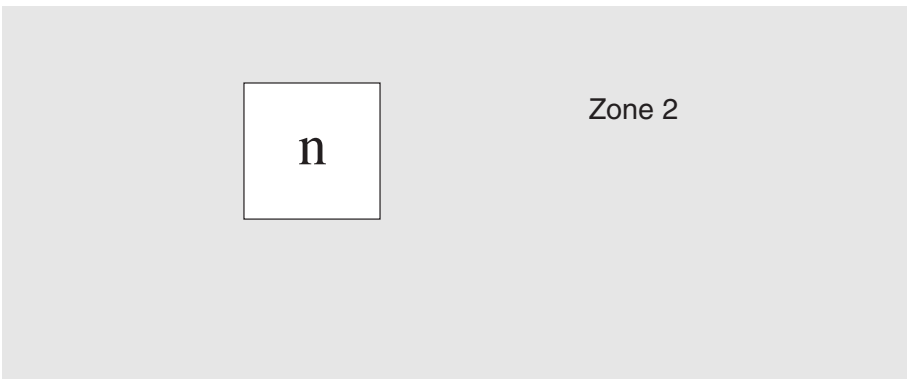


Bild 7-5: Schemadarstellung für nicht funkende elektrische Betriebsmittel

Zulassungen gemäß FM Approval Standard Class Number 3610, 3611 und 3615

Temperatur-Produkte von ABB erfüllen, je nach Zertifizierung und Einsatzbereich, eine oder mehrere der folgenden FM-Normen:

- Intrinsically Safe Apparatus and Associated Apparatus for use in Class I, II and III, Division 1, and Class I, Zone 0 and 1. Hazardous (Classified) Locations. Approval Standard Class Number 3610.
- Nonincendive Electrical Equipment for use in Class I and II, Division 2, and Class III, Divisions 1 and 2. Hazardous (Classified) Locations. Approval Standard Class Number 3611.
- Explosionproof Electrical Equipment General Requirements. Approval Standard Class Number 3615.

Die entsprechende Betriebsanleitung und Control Drawing ist bei der Installation des Gerätes zu berücksichtigen. Weiterhin muss der National Electrical Code (NEC) bei der Installation beachtet werden.

Zulassungen gemäß CSA-Standards

Temperatur-Produkte von ABB erfüllen je nach Zertifizierung und Einsatzbereich eine oder mehrere der folgenden CSAStandards.

- CAN/CSA-E60079-11:02 Electrical apparatus for explosive gas atmospheres - Part 11: Intrinsic safety "i" C22.2 No.213-M1987 (Reaffirmed 1999) Non-incendive Electrical Equipment for use in Class I, Division 2. Hazardous Locations.
- C22.2 No. 30-M1986 (Reaffirmed 1999) Explosion-proof Enclosures for use in Class I. Hazardous Locations.

Die entsprechende Betriebsanleitung und Control Drawing ist bei der Installation des Gerätes zu berücksichtigen. Des weiterhin muss der Canadian Electrical Code (CEC) Part I (Safety Standard for Electrical Installation) bei der Errichtung beachtet werden.

Zulassungen gemäß GOST und sonstige Approvals

Auf der Basis der EG-Baumusterprüfbescheinigungen und der zugehörigen Testberichte erfolgt die Zertifizierung gemäß der nationalen Norm. In der Regel sind keine weiteren Tests notwendig. Die unterschiedlichen Behörden und Institute erkennen die Prüfberichte an. Manche Zertifikate sind leider zeitlich begrenzt, was einen erhöhten Aufwand zur Erhaltung der Zertifizierung von Produkten zur Folge hat.

7.4 Kennzeichnung von Betriebsmitteln

Betriebsmittel für den Einsatz in **explosionsgefährdeten** Bereichen müssen vom Hersteller eindeutig gekennzeichnet werden. Sie sind gemäß EN 50014 bzw. EN 60079-0/EN 50020 bzw. EN 60079-11 mit der folgenden Kennzeichnung zu versehen:

- Name und Anschrift des Herstellers
- CE-Kennzeichnung
- Bezeichnung der Serie und des Typs
- Gegebenenfalls die Seriennummer
- Baujahr
- Spezielles Kennzeichen zur Verhütung von Explosionen, in Verbindung mit dem Kennzeichen, das auf die Kategorie verweist
- Für die Gerätegruppe II der Buchstabe „G“ (für Bereiche in denen explosionsfähige Gas-, Dampf-, Nebel-, Luft-Gemische vorhanden sind) und/oder der Buchstabe „D“ (für Bereiche, in denen Staub explosionsfähige Atmosphären bilden kann).

Für die Temperatur-Produkte von ABB werden für diese Kennzeichnungen bis zu drei Typenschilder verwendet:

- Typenschild mit allen wesentlichen Informationen zum Produkt
- Zulassungs-Typenschild mit allen explosionsrelevanten Kennzeichnungen
- Zusatzschild, optional für Zusatzinformationen.




Aufbau und Inhalte eines Typenschildes von Temperatur-Produkten von ABB

[Firmen-Logo, Hersteller]	[Produktname]	[Herstellerland]
		[Herstellungsjahr]
[Produktname + Odering-Code]	[Auftrags-Nr.+ Pos.-Nr.]	[Anleitungs-Logo][CE Logo]
[Serien-Nr.]		[HW-Revision]
[Technische Daten U, I, P]		[SW-Revision]
[Messumformer CFG]		
[Sensor CFG]		
[Umgebungs-Temperaturbereich Standard]		[Schutzklasse]

Hinweis: Die Temperaturangaben sind nur bei der Nicht-Ex-Version auf dem Typenschild.

ABB Automation Products GmbH	TTH300	Made in Germany 2008
O-Code: TTH300-Y0/OPT	8323455672	  
Ser.-No: 3452345673		HW-Rev: 1.05
$U_s = +11...42 \text{ V}$, $I_a = 4...20 \text{ mA}$, HART		SW-Rev: 01.00.00
CFG: 2 x TC; Type K; $0^\circ\text{C}...300^\circ\text{C}$		
$T_{\text{amb}} = -40^\circ\text{C}...+85^\circ\text{C}$		www.abb.com/temperature

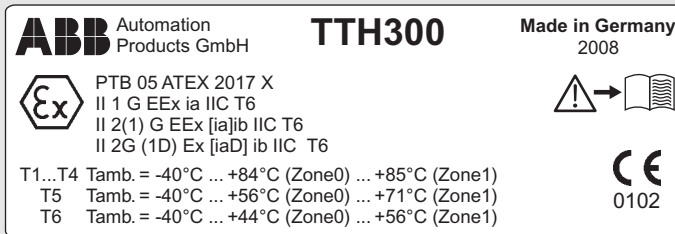
Beispiel Temperatur-Messumformer Typ TTH300

ABB Automation Products GmbH	TSP121	Made in Germany 2008
TSP121-Y0S1A1S07A2U1N1T1K1T1B3H4/OPT	8323655672	
S/N-No.: 3455345673		 
$U_s = +11...42 \text{ V}$, $I_a = 4...20 \text{ mA}$		
CFG: 2 x TC; Type K; Class1; $0^\circ\text{C}...300^\circ\text{C}$		
$T_{\text{amb}} = -40...+85^\circ\text{C}$		IP6X, NEMA 4X
$T_{\text{med}} = -40...+1000^\circ\text{C}$		www.abb.com/temperature

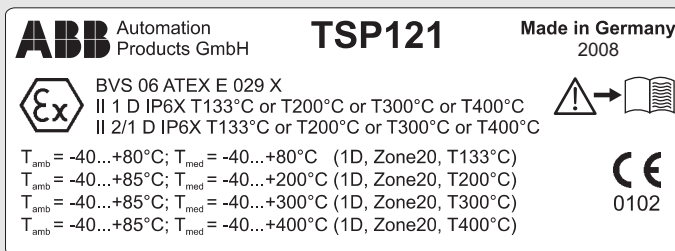
Beispiel Temperaturfühler Typ TSP121

Aufbau und Inhalt eines Zulassungs-Typenschildes von Temperatur-Produkten von ABB

- Firmen-Logo
- Herstellerinformationen
- Produktname (+ Zulassungsname, falls abweichend vom Produktname)
- Zulassungsdaten inkl. Zulassungs-Logo
 - ATEX EEx i; Zulassungsdaten gemäß EG-Baumusterprüfbescheinigung
 - ATEX EEx d; Zulassungsdaten gemäß EG-Baumusterprüfbescheinigung
 - ATEX EEx D; Staub-Ex, Zulassungsdaten gemäß EG-Baumusterprüfbescheinigung
 - FM; Zulassungsdaten gemäß Prüfbescheinigung
 - CSA; Zulassungsdaten gemäß Prüfbescheinigung
 - GOST; Zulassungsdaten gemäß Prüfbescheinigung
- CE 0102 Logo mit Nr. für Prüfstelle bei ATEX Typenschild
- Zulässige Umgebungstemperaturen



Beispiel Temperatur-Messumformer TTH300 in Ausführung EEX "i"



Beispiel Temperaturfühler TSP121 in Ausführung Staub-EX

7.5 Nachweis der Eigensicherheit

Bei der Zusammenschaltung von eigensicheren Stromkreisen ist nach EN60079-14 der Nachweis der Eigensicherheit zu führen.

Hierbei unterscheidet man zwei Fälle:

- 1. Einfacher eigensicherer Stromkreis mit nur einem aktiven, zugehörigem und einem passiven eigensicheren Betriebsmittel ohne weitere Versorgung.
- 2. Mehrere aktive Betriebsmittel, welche im Normalbetrieb oder im Fehlerfall elektrische Energie in den eigensicheren Stromkreis liefern können.

Einfache eigensichere Stromkreise

Sie können durch ein Vergleichen der elektrischen Anschlusswerte aus der jeweiligen EG-Baumusterprüfbescheinigung durch die verantwortliche Person überprüft werden.

Die Eigensicherheit der Zusammenschaltung ist eingehalten, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

eigensicheres Betriebsmittel plus Kabel z.B. ABB-Messumformer		zugehöriges Betriebsmittel z.B. Speisetrenner/SPS-Eingang
U_i	\geq	U_o
I_i	\geq	I_o
P_i	\geq	P_o
$L_i + L_c$ (Kabel)	\leq	L_o
$C_i + C_c$ (Kabel)	\leq	C_o

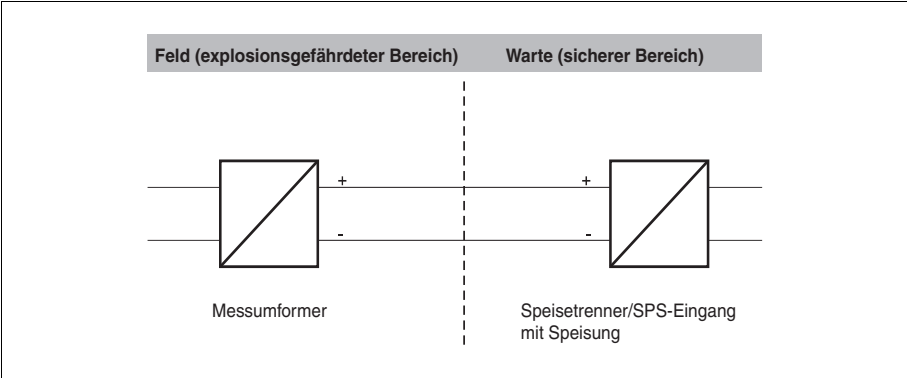


Bild 7-6: Schemadarstellung eines einfachen eigensicheren Stromkreises

Der Überprüfungs-Nachweis sollte übersichtlich dokumentiert werden. Neben Datum und Name des Prüfers sollten auch noch die anlagenspezifische Dokumentation mit aufgenommen werden, d.h. Stromkreisbezeichnung, Klemmleisten, Kabeltrassenbelegung, Schalt- und Klemmschränke, etc.

Zusammenschaltung von mehreren aktiven Betriebsmitteln

Sie unterscheidet sich grundsätzlich vom vorherigen Fall. Zum Beispiel hat die Zusammenschaltung von mehreren aktiven eigensicheren Stromkreisen der Kategorie „ia“ zur Folge, dass der gemeinsame Stromkreis als eigensicherer Stromkreis der Kategorie „ib“ eingestuft wird. Somit ist ein Betrieb in Zone 0 nicht mehr möglich.

Eine ausführliche Erläuterung zu dieser Art der Zusammenschaltung kann im Anhang A und B der EN60079-14 nachgelesen werden. Zusätzlich werden die Zündgrenzkurven der EN 60079-11 bzw. EN50020 benötigt. Siehe auch EN 60079-25.

Eine weitergehende Behandlung ist in der Regel Sache von befähigten Personen und nicht Bestandteil dieses Handbuchs.

Zusammenschaltung von eigensicheren Stromkreisen mit nichtlineare Kennlinien

Hierbei sind gesonderte Verfahren zu beachten. Diese sind in der EN 60079-25 ausführlich beschrieben.

Eine weitergehende Behandlung ist in der Regel Sache von Befähigten Personen und nicht Bestandteil dieses Handbuchs.

8 SIL - Funktionale Sicherheit in der Prozessautomatisierung

Die Normen IEC 61508 und IEC 61511 bieten Möglichkeiten zur Risikobeurteilung von sicherheitsgerichteten Kreisen. Sie definieren vier Sicherheitsstufen, welche die Maßnahmen zur Risikobeherrschung von Anlagenteilen beschreiben. Um den SIL-Level eines Gerätes zu ermitteln, werden alle Feldgeräte den harten Prüfungsbedingungen und Analysen der IEC unterzogen.

Die Europäische Union setzt mit der EU-Richtlinie 96/82/EU (Seveso II-Richtlinie) die rechtliche Grundlage für das Betreiben von Anlagen mit Gefahrenpotenzial. Die deutsche Umsetzung der Richtlinie 96/82/EU erfolgt durch die Störfallverordnung im Bundes-Immissionsschutzgesetz (12. BImSchV) vom 26. April 2000.

Die Störfallverordnung verwies zur Auslegung von sicherheitsrelevanten PLT-Einrichtungen bis zum 31. Juli 2004 auf die DIN 19250 und 19251, die die Anforderungsklassen AK 1-8 beschreiben. Ab dem 1. August verweist die Störfallverordnung auf die DIN EN 61508 sowie die DIN EN 61511, die inhaltlich den Normen IEC 61508/IEC 61511 entsprechen. Sie definieren vier Sicherheitsstufen (SIL1 bis SIL4), die die Maßnahmen zur Risikobeherrschung von Anlagenteilen beschreiben und nach denen Feldgeräte sowie die Aktorik ausgelegt sein müssen.

Um eine Abschätzung vornehmen zu können, ob ein Gerät für eine Sicherheitskette mit einer bestimmten SIL-Anforderung geeignet ist, werden die Feldgeräte gemeinsam mit einer unabhängigen Institution analysiert und geprüft.

Bei der FMEDA-Prüfung (Failure Mode, Effect and Diagnostics Analysis) wird die Hardware-Struktur der Elektronik untersucht. Zusammen mit der Betrachtung der (elektro-)mechanischen Bauteile können dann die Fehlerraten des Gerätes, z. B. von Temperatur-Messumformern, bestimmt werden. Dazu werden im Wesentlichen drei Kenngrößen herangezogen, die sich aus der FMEDA errechnen: die Fehlertoleranz (HFT), der Anteil ungefährlicher Ausfälle (SFF) und die gefährliche Versagenswahrscheinlichkeit (PFD).

Der Software-Entwicklungsprozess bei SIL-zertifizierten Temperatur-Messumformern unterliegt der IEC 61508 und geht somit noch über die Anforderungen der IEC 61511 hinaus.

Zusätzlich werden weitere allgemeine Sicherheitsbetrachtungen der Feldgeräte durchgeführt. In den SIL-Konformitätserklärungen, die von den Herstellern zur Verfügung gestellt werden, um bei der Auswahl geeigneter Geräte für Sicherheitskreise zu unterstützen, bezieht sich die ausgewiesene Klassifizierung auf die jeweils geringste SIL-Einstufung.

Zum sicheren Betrieb einer Anlage werden in einem weiteren Schritt nach den IEC-Regeln immer die gesamten Sicherheitskreise, bestehend aus Sensor/Messumformer, Steuerung und Aktor betrachtet und eine SIL-Einstufung vorgenommen. Vor der Auslegung und Berechnung des Sicherheitskreises wird ein sogenanntes SIL-Assessment durchgeführt, in dem festgestellt wird, welchem Sicherheitsstandard (z. B. SIL2) der Sicherheitskreis zu entsprechen hat. ABB bietet hierfür eine Software an, die alle Aspekte der Anlagenzertifizierung vom SIL-Assessment bis hin zur Auslegung und Berechnung der Sicherheitskreise gemäß IEC 61508 abdeckt und alle Entscheidungen sowie Berechnungsgrundlagen protokolliert und ablegt.

Für den laufenden Betrieb einer Anlage müssen die Sicherheitskreise außerdem in Bezug auf die Sicherheitsfunktionen regelmäßig getestet und protokolliert werden. Hierzu ist es erforderlich, die einzelnen Testroutinen zu definieren, entsprechend durchzuführen und zu protokollieren. Ein aufwändiger Prozess, der letztendlich Mensch und Umwelt zugute kommt. Neben einem breiten Portfolio an Instrumentierungsgeräten bietet ABB eine Software an, welche die in der IEC 61508 vorgeschriebenen Testroutinen und Testergebnisse aller Sicherheitskreise verwaltet und für Statistiken bereitstellt.

9 Normen und Regelwerke für die Temperatur-Messtechnik

Die Normung von elektrischen Thermometern ist wegen ihres hohen Anteils in der Prozess-Messtechnik und der großen Typenvielfalt schwierig, aber äußerst wichtig. Die Normung der elektrischen Thermometer beschränkt sich dabei im wesentlichen auf die Spezifizierung von:

- Grundwertreihen
- Elektrischen Schnittstellen
- Mechanischen Schnittstellen (Prozessanschlüsse)
- Spezielle Eigenschaften

Für das Gebiet der Prozess-Messtechnik ist die Erarbeitung von Normen über Temperatursensoren auf nationaler Ebene (für Deutschland) dem Unterkomitee 961.1 „Elektrische Messwertaufnehmer“ des Komitees 9.61 „Sensoren und Aktoren“ im Fachbereich 9 „Leittechnik“ der Deutschen Elektrotechnischen Kommission (DKE), angesiedelt. Für ganz spezielle Anwendungen sind teilweise auch andere Gremien zuständig.

Für die Normungsarbeit auf europäischer (CENELEC) bzw. internationaler Ebene (IEC) gibt es vergleichbare Gremien (siehe Tab. 9-1).

International	Europa	National (Deutschland)
Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC)	Technisches Büro (BT) CENELEC	Deutsche Elektrotechnische Kommission (DKE)
Technisches Komitee (TC) 65: „Industrial Process Measurement and Control“	Berichtersekretariat Für IEC TC 65	Fachbereich (FB) 9: „Leittechnik“
Subkomitee (SC) 65B: „Devices“	Arbeitsgruppe (BTWG) oder Taskforce (BTTF) (projektbezogen)	Komitee (K) 961: „Sensoren und Aktoren“
Arbeitsgruppe (WG) 5: „Temperature Sensors“		Unterkomitee (UK) 961.1: „Elektr. Messwertaufnehmer“

Tab. 9-1: Gliederung der Nationalen und Internationalen Normungsaktivitäten bei Temperaturfühlern

Die wichtigsten nationalen Normungsgremien weiterer Industrieländer:

USA	ANSI	American National Standards Institute
Kanada	CSA	Canadian Standards Association
Frankreich	NF	Normalisation Francaise
Großbritan.	BSI	British Standards Institution
Japan	JIS	Japanese Industrial Standards
Russland	GOST	National Standards of the Russian Federation
Italien	UNI	Uniticazione Nazionale Italiano

Normen Temperatur-Messtechnik:

EN 50112	Messen, Steuern, Regeln – Elektrische Temperaturaufnehmer – Metall-Schutzrohre für Thermoelemente
EN 50212	Steckverbindungen für Thermoelemente
Neu Entwurf:	Entwurf DIN EN 50466 Gerade Thermoelemente mit Metall- oder Karamik-Schutzrohr und Zubehör soll folgende Normen ersetzen: DIN 43729 , DIN 43733, DIN 43734
EN 60751	Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Messwiderstände
Neu Entwurf:	Entwurf DIN IEC 60751 2005, in Abstimmung
EN 60584-1	Thermopaare - Teil 1: Grundwerte der Thermospannungen
EN 60584-2	Thermopaare - Teil 2: Grenزابweichungen der Thermospannungen
Neu Entwurf:	Entwurf DIN IEC 60584-3 Thermoleitungen und Ausgleichs-Leitungen
EN 61152	Maße von metallgeschützten Thermometereinsätzen
EN 61515	Mantelthermoelement-Leitungen und Mantelthermoelemente
DIN 16160	Thermometer; Begriffe
DIN 43710	Thermospannung und Werkstoff der Thermopaare
DIN 43712	Thermodrähte für Thermopaare
DIN 43713	Ausgleichsdrähte und -litzen
DIN 43714	Ausgleichsleitungen für Thermoelemente
DIN 43720	Metallene Schutzrohre für Thermoelemente
DIN 43722	Thermopaare; Teil 3: Thermoleitungen und Ausgleichsleitungen; Grenزابweichungen und Kennzeichnungssystem

DIN 43724	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Thermometer, Keramische Schutzrohre und Halteringe für Thermoelemente
DIN 43725	Isolierrohre für Thermopaare
DIN 43729	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Thermometer, Anschlussköpfe für Thermoelemente und Widerstandsthermometer
DIN 43732	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Temperaturaufnehmer; Thermopaare für Thermoelemente
DIN 43733	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Temperaturaufnehmer; Gerade Thermoelemente ohne auswechselbaren Messeinsatz
DIN 43734	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Temperaturaufnehmer; Anschlagflansche für Thermoelemente und Widerstandsthermometer
DIN 43735	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Temperaturaufnehmer; Messeinsätze für Thermoelemente
DIN 43762	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Temperaturaufnehmer; Messeinsätze für Widerstandsthermometer
DIN 43764	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Temperaturaufnehmer; Thermometer ohne Befestigung mit auswechselbarem Messeinsatz
DIN 43765	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Temperaturaufnehmer; Einschraub-Thermometer mit Einschraubgewinde G 1/2
DIN 43766	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Temperaturaufnehmer; Einschraub-Thermometer mit Einschraubgewinde G 1
DIN 43767	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Temperaturaufnehmer; Einschweiß-Thermometer
DIN 43769	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Temperaturaufnehmer; Thermometer ohne zusätzliches Schutzrohr
DIN 43771	Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Temperaturaufnehmer; Thermometer mit kurzer Ansprechzeit
DIN 43772	Leittechnik - Metall-Schutzrohre und Halsrohre für Maschinen-Glasthermometer, Zeigerthermometer, Thermoelemente und Widerstandsthermometer - Teil 2: Maße, Werkstoffe, Prüfung
DIN 43772 Beiblatt 1	Leittechnik - Metall-Schutzrohre und Halsrohre für Maschinen-Glasthermometer, Zeigerthermometer, Thermoelemente und Widerstandsthermometer - Übersicht über Zuordnung Schutzrohr/Thermometer
VDI/VDE 3511-1	Technische Temperaturmessungen - Grundlagen und Übersicht über besondere Temperaturmessverfahren
VDI/VDE 3511-2	Technische Temperaturmessungen - Berührungsthermometer
VDI/VDE 3511-3	Technische Temperaturmessungen - Messverfahren und Messwertverarbeitung für elektrische Berührungsthermometer
VDI/VDE 3511-4	Technische Temperaturmessungen - Strahlungsthermometrie
VDI/VDE 3511-5	Technische Temperaturmessungen - Einbau von Thermometern
VDI/VDE 3522	Zeitverhalten von Berührungsthermometern

Normen Explosionsschutz, Sicherheitsnorm für Feuerungsanlagen, Wärmemengenmessung

EN 60079-10	Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche, Teil 10: Einteilung der explosionsgefährdeten Bereiche
EN 60079-14	Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche, Teil 14: Elektrische Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (ausgenommen Grubenbaue)
EN 60079-17	Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche, Teil 17: Prüfung und Instandhaltung elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen (ausgenommen Grubenbaue)
EN 1434-1	Wärmezähler - Teil 1: Allgemeine Anforderungen
EN 1434-2	Wärmezähler - Teil 2: Anforderungen an die Konstruktion
EN 1434-3	Wärmezähler - Teil 3: Datenaustausch und Schnittstellen
EN 1434-4	Wärmezähler - Teil 4: Prüfungen für die Bauartzulassung
EN 1434-5	Wärmezähler - Teil 5: Ersteinrichtung
EN 1434-6	Wärmezähler - Teil 6: Einbau, Inbetriebnahme, Überwachung und Wartung
EN 14597	Temperaturregeleinrichtungen und Temperaturbegrenzer für wärmeerzeugende Anlagen ersetzt DIN 3440
DIN 3440	Temperaturregel- und -begrenzungseinrichtungen für Wärme-erzeugungsanlagen; Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfung

Internationale Normen

IEC 60584-1	Thermocouples - Part 1: Reference tables
IEC 60584-2	Thermocouples - Part 2: Tolerances
IEC 60584-3	Thermocouples - Part 3: Extension and compensating cables - Tolerances and identification system
IEC 60751	Industrial platinum resistance thermometer sensors
IEC 61152	Dimensions of metal-sheathed thermometer elements
IEC 61515	Mineral insulated thermocouple cables and thermocouples

10 Anhang 1

Einsatzbedingungen für Schutzrohrwerkstoffe			
Material	Max. Temp. drucklos an an Luft (°C)	Vorteile	Nachteile
Metallische Schutzrohre			
1.0305	550	gute Beständigkeit gegen reduzierende Gase	geringe Beständigkeit gegen Oxidanzien und Säuren
1.4301 (304)	800	hitze- und korrosionsbeständig	geringe Beständigkeit gegen reduzierende Flamme und Schwefel
1.4306 (304L)	800	gute Beständigkeit gegen Korngrenzenkorrosion	
1.4401 (316)	800	gute Beständigkeit gegen Säuren und Alkali	
1.4404 (316L)	800	gute Beständigkeit gegen Korngrenzenkorrosion	
1.4435 (316L)	800	gute Beständigkeit gegen Korngrenzenkorrosion	
1.4541 (321)	800	gute Beständigkeit gegen Korngrenzenkorrosion nach dem Schweißen	
1.4571 (316Ti)	800	gute Korrosionsresistenz besonders gegen Korngrenzenkorrosion	
1.4762 (446)	1200	gute Beständigkeit gegen oxidierende und reduzierende Flamme , schwefelhaltige Gase	geringe Beständigkeit gegen stickstoffhaltige Gase
1.4749 (446)	1150	gute Beständigkeit gegen oxidierende und reduzierende Flamme, schwefelhaltige Gase, Einsatz in Salzbädern und Metallschmelzen	geringe Beständigkeit gegen stickstoffhaltige Gase
1.4772	1250	Einsatz in Kupfer-Messing-Schmelzen	
1.4821	1350	Einsatz in salpeter-, chlorid- und zyanidhaltigen Salzbädern	
1.4841 (314)	1150	gute Beständigkeit gegen stickstoffhaltige und sauerstoffarme Gase	geringe Beständigkeit gegen schwefelhaltige Gase
1.4845 (310S)	1050	hoher NiCr-Gehalt, beständig gegen Hochtemperaturkorrosion	
1.4876 (Incoloy)	1100	beständig gegen Hochtemperaturkorrosion und Thermoschock	

Einsatzbedingungen für Schutzrohrwerkstoffe			
Material	Max. Temp. drucklos an Luft (°C)	Vorteile	Nachteile
2.4360 (Monel)	600	gute Beständigkeit gegen Wasserdampf, Hochdruck und Korrosion	
2.4665 (Hasteloy X)	1100	gute Beständigkeit gegen oxidierende und auflösende Atmosphäre bei hohen Temperaturen	
2.4810 (Hasteloy B)	1100	gute Beständigkeit gegen Hitze und Korrosion, speziell bei HCl- und H ₂ SO ₄ -Einfluss	
2.4811 (Hasteloy C-276)	1100	gute Beständigkeit gegen oxidierende und reduzierende Atmosphäre und gegen Cl ₂ -Gas	
2.4816 (Inconel)	1150	gute Beständigkeit gegen oxidierende und reduzierende Atmosphäre bei hohen Temperaturen	schwefelhaltige Atmosphäre muss vermieden werden
Inconel MA 754	1250	gute mechanische Beständigkeit und Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen in oxidierender Atmosphäre	
3.7035 (Titan)	600	gute Tieftemperaturkorrosionsbeständigkeit	bei hohen Temperaturen leichte Oxidation und Versprödung
Stellit 6	1200	gute Beständigkeit gegen Hitze, Korrosion, Abrasion	
Tantal	250	gute Beständigkeit gegen Hitze und Säuren	leichte Oxidation und Versprödungsneigung bei hohen Temperaturen an der Luft
Molybdän	2100	gute mechanische Beständigkeit unter inerten, reduzierenden und Vakuumbedingungen, beständig gegen Metaldämpfe bei hohen Temperaturen	reagiert mit Kohlenstoff in Luft und mit oxidierenden Gasen
Grauguss	700	Lagermetall, Blei-, Aluminium-, Zinkschmelze	
Metallkeramische Schutzrohre			
1.4765 Kanthal	1300	gute Beständigkeit gegen Hochtemperaturoxidation	neigt zur Versprödung durch Rekristallisation
Kanthal Super (MoSi ₂)	1700	abriebfest, schlagfest, thermoschockbeständig, verglast an der Oberfläche, chemisch resistent, gut geeignet für die Müllverbrennung und Wirbelschichtöfen	spröde bei niedriger Temperatur, ab 1400 zäh

Einsatzbedingungen für Schutzrohrwerkstoffe			
Material	Max. Temp. drucklos an an Luft (°C)	Vorteile	Nachteile
UCAR LT1 (CrAl ₂ O ₂ 77/23)	1400	abriebfest, thermoschockbeständig, oxidationsbeständig, zu empfehlen für Eisen- und Nichteisen-Metallschmelzen, Zementöfen, beständig gegen Schwefelverbindungen und Säuren	
Beschichtete Schutzrohre			
1.0305 emailiert	600	korrosive Anwendungen im Taupunktbereich von Rauchgasen	schlag- und biegeempfindlich
1.0305 glasbeschichtet	450	guter Oxidations- und Gaschutz	thermoschockempfindlich
1.0305 PFA beschichtet	200	Einsatz in konzentrierter Salz-, Schwefel- und Salpetersäure	
Keramische Schutzrohre			
Al ₂ O ₃ 80% (C530)	1500	temperaturwechselbeständig, Einsatz in Industrieöfen	feinporös, nicht gasdicht, schlagempfindlich
Al ₂ O ₃ 60% (C610)	1600	mittlere Temperaturwechselbeständigkeit, gasdicht, hohe Feuerbeständigkeit, Einsatz in Industrieöfen	geringe Reinheit, schlagempfindlich
Al ₂ O ₃ 99% (C799)	1800	gute Gasdichte, feuerbeständig, Einsatz in Stahlschmelzen, Schlacken, Glasschmelzen	
Al ₂ O ₃ 99,7% (AL23)	1950	feinkörnig, absolut gasdicht, hohe Reinheit und Festigkeit bei hohen Temperaturen, beständig gegen Flusssäure, Alkali, Metalloxiddämpfe	mittlere Thermoschockbeständigkeit
Al ₂ O ₃ 99,7% (AL24)	1950	porös, thermoschockbeständig, hohe Festigkeit bei hohen Temperaturen; Müllverbrennung, Wirbelschichtöfen	
Rekristallisiertes SiC 99%	1600	gute Beständigkeit gegen Säure und Alkali, Einsatz in neutraler Atmosphäre bis 1500 °C; Einsatz in NE-Metallschmelzen	porös
Selbstgebundenes SiC 99%	1350	sehr geringe Porosität, gute Beständigkeit gegen Thermoschock, Korrosion, Abrasion und hohe Temperaturen; Einsatzempfehlung für oxidierende und reduzierende Atmosphäre bis 1500 °C	

Einsatzbedingungen für Schutzhrohrwerkstoffe			
Material	Max. Temp. drucklos an an Luft (°C)	Vorteile	Nachteile
SiSiC (Protect, Silit SK)	1320	gasdicht, sehr thermoschockbeständig, hart, abriebfest; Einsatzempfehlung für Wind-erhitzer, Kohlemühlen, Rauchgase, Zink-, Zinn- und Bleischmelzen	mittlere Durchbiegung bei hoher Temperatur, nicht für Al, Cu, Ni, Fe Schmelzen
SiC62 (TCS)	1100	sehr thermoschockbeständig, hart, abriebfest; Einsatzempfehlung für Zementöfen, Müllverbrennung, Zink-, Kupfer-, Aluminium-, Messing- und Bronzeschmelzen	porös
Si ₃ N ₄ (Ekatherm)	1000	thermoschockbeständig, keine Benetzung in Schmelzen, empfohlen für Messing- und Bronzeschmelzen	schlagempfindlich
Si ₃ N ₄ +Al ₂ O ₃ (Syalon)	1300	thermoschockbeständig, empfohlen für Kupfer- und Aluminiumschmelzen	
Graphit	1250	sauerstofffreie Kupfer-, Messing- und Aluminiumschmelze	hohe Oxidation an Luft

11 Anhang 2

Werkstoffe, Beständigkeitstabelle

Zur Auswahl eines Temperaturfühlers gehört auch die Bestimmung der einzusetzen- den Werkstoffe. Dabei interessieren natürlich in erster Linie die mit dem Messstoff in Berührung kommenden Materialien. Aber auch die Umgebungsatmosphäre darf nicht vernachlässigt werden, wobei die Feuchtigkeit am häufigsten zu beachten ist.

Im allgemeinen kennt der Anwender seine Messstoffe so gut, dass er auch die Werk- stoffe mühelos bestimmen kann. Die nachstehende Tabelle soll der Hilfestellung dien- en. Die angegebenen Hinweise sind den Resistenzlisten der Hersteller entnommen. Eine Garantie für die Vollständigkeit und Richtigkeit kann nicht übernommen werden.

Weitere Hilfestellung geben Ihnen die Anwendungstechniker.

	Gasförmig/Flüssig	Elektrische Leitfähigkeit	Konzentration (%)	Temperatur (°C)	Metalle										Nichtmetalle									
					1.4301	1.4539	1.4541	1.4571	Hasteloy B	Hasteloy C	Titan	Tantal	Platin		Hartgummi	Weichgummi	PFA	PTFE	EPDM	Buna N	Viton A	PVDF	PVC	Glas
Aceton	F	-	100	40	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+
Acetylen	G	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+
Äthan	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+
Äthanol	F	-	96	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	
Äthylacetat	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+
Äthylalkohol	F	-	100	78	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+
Äthyläther	F	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	+
Äthylen	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Äthylenchlorid	F	-	100	50	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+	+
Äthylenglykol	F	+	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+			-	+	+
Alum.chlorid-Lösung	F	+	30	70	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+
Alum.chlorid-Lösung	F	+	80	70	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+			+			+		+	+	+
Alum.sulfat-Lösung	F	+	20	50	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+			+	+
Alum.sulfat-Lösung	F	+	50	50	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	-	-	+	+		+			+	+
Ameisensäure	F	+	100	80	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+
Ammoniak	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+
Ammoniak-Lösung	F	+	25	50	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
Anilin	F	-	100	25	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	+			+		-	+	+
Apfelsäure	F	+	50	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Argon	G	-	100	100	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

	Gasförmig/Flüssig	Elektrische Leitfähigkeit	Konzentration (%)	Temperatur (°C)	Metalle										Nichtmetalle									
					1.4301	1.4539	1.4541	1.4571	Hasteloy B	Hasteloy C	Titan	Tantal	Platin	Harzgummi	Weichgummi	PFA	PTFE	EPDM	Buna N	Viton A	PVDF	PVC	Glas	Al ₂ O ₃
Benzin	F	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+										+	+
Benzol	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-		-	-	-	+	+
Bier	F	+		10	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+			+	+	+	+
Bierwürze	F	+		5	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+		+	+	+	+	+
Blausäure (Zyanw.stoff)	F	+	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+				+	+	+	+
Blut	F	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+		+	+	+	+	+
Brom	F	-	100	20	-	-	-	-	-	-	-	+	+			+	+			+		-	+	+
Bromwasserstoffsäure	F	+	48	50	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-		+		+	+	+
Butan	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	-	+		-	-	+	+
Butylacetat	F		100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+		-	+	-	+	+
Butylalkohol	F	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+		+	+		+	+	+
Butylen	G	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+		+	+	+
Calciumchlorid-Lösung	F	+	100	20	+		+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Calciumhydroxid-Lösg.	F	+	50	50	+	+	+	+	+	+			+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Calciumhypochlorid-L.	F	+	20	50	-	-	-	-	-	+	+	+	+			+	+	+		+			+	+
Caprolactam	F	-	50	50				+	+	+			+	+	-								+	+
Carbonsäure, verdünnt	F	-		50			+	+	+	+	+	+	+			+	+				+	-	+	+
Chlor, trocken	G	-	100	20	+	+	+	+	-	+		+		+	-	+	+	-		+	+	+	+	+
Chlor, feucht	G	-	100	20	-	+	-	-	-	+		+		-	-	+	+	-		+	+	+	+	+
Chlor, trocken	F	-	100	20	+	+	+	+	-	+		+	+	-	-	+	+	-		+	+	-	+	+
Chlordioxid, trocken	G	-	100	20	+				+		+	+	+	-	-	+	+				+		+	+
Chlorwasser	F	+	100	20	-	-	-		+		+		+	-	-	+	+	+		+	+	-	+	+
Chlorwasserstoff	G	-	100	20	-	+	+	+	+	+		+	+	-	-	+	+	+	+	+		+	+	+
Deionat	F	-			+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Diesel	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+		+	-	+	+
Eisen-III-chlorid-Lösg.	F	+	3	20	-	+	-	-	-	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+
Eisen-III-chlorid-Lösg.	F	+	10	20	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Eisen-III-sulfat-Lösg.	F	+	10	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+
Erdgas, trocken	G	-	100	40	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+		+	+	+	+
Essigsäure	F	+	50	80	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+			+	-	+	+
Essigsäureanhydrid	F	+	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+					+	+	+
Fettsäure	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+			+		+	+	+

			Gasförmig/Flüssig	Elektrische Leitfähigkeit	Konzentration (%)	Temperatur (°C)	Metalle								Nichtmetalle										
							1.4301	1.4539	1.4541	1.4571	Hasteloy B	Hasteloy C	Titan	Tantal	Platin	Hartgummi	Weichgummi	PFA	PTFE	EPDM	Buna N	Viton A	PVDF	PVC	Glas
Fluor	G	-	100	20	+	+	+	+	+	-	+	+	-				+	+	-			+	+	-	-
Flusssäure	F	+	40	20	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-
Flusssäure	F	+	70	20	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-
Formaldehyd-Lösung	F	+	40	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-		+	+	+	+	+
Fotoemulsion	F	+		20	+	+	+	+		+				+			+	+					+	+	
Gelatine	F	+		50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Gerbsäure	F	+	50	50			+	+		+					+	+	+	+	-			-	+	+	+
Glykol	F	-	100	50				+	+	+	+	+	+	+			+	+			+	+		+	+
Glyzerin	F	-	100	100	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-		+	-	-	+	+
Harnstoff	F	+	30	50			+			+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Hefe	F	+		20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Heizöl	F	-	100	80	+	+	+	+		+							+	+	-	+		+		+	+
Helium	G	-	100	80	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+			+	-	+	+	+
Heptan	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+		+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+
Hexan	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+		+	+			+	+	-		+	+	-	+	+	+
Hydrazin-Lösung	F	+	25	20	+	-	+	-						+	-	-	+	+	+	-		+	+	-	-
Kaliumchlorid-Lösung	F	+	30	20	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kaliumhydroxid-Lösg.	F	+	50	20	+	+	+	+	+	+	-	-	+			+	+	+		-	+	+	+	+	+
Kaliumpermanganat-L.	F	+	50	20	+	+	+	+		+	+	+	-	-	+	+			+	+	+	-	+		
Kaliumsulfat-Lösung	F	+	20	50	+	+	+	+	+		+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Karbolsäure	F	-	90	50	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	+
Kerosin	F	-	100	20	+			+								+	+		+	+			+		
Kohlendioxid	G	-	100	50	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Kohlensäure	F	+		50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Krypton	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+		-	-	+	+	+
Kupferchlorid-Lösung	F	+	50	20	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+
Kupfersulfat-Lösung	F	+	50	80	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Kupfersulfat-Lösung	F	+	100	80	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Magnesiumchlorid-L.	F	+	50	20	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Magnesiumsulfat-Lös.	F	+	20	50	+	+	+	+	+	-		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Meerwasser	F	+		50	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Methan	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+

	Gasförmig/Flüssig	Elektrische Leitfähigkeit	Konzentration (%)	Temperatur (°C)	Metalle										Nichtmetalle									
					1.4301	1.4539	1.4541	1.4571	Hasteloy B	Hasteloy C	Titan	Tantal	Platin	Hartgummi	Weichgummi	PFA	PTFE	EPDM	Buna N	Viton A	PVDF	PVC	Glas	Al ₂ O ₃
Methanol = Methylalk.	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Methylbenzol = Toluol	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+
Methylenchlorid	G	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+
Monochloressigsäure	F	+	70	50				+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+
Natriumbikarbonat-Lös.	F	+	20	50			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+
Natriumbisulfat-Lösung	F	+	10	50	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
Natriumbisulfat-Lösung	F	+	50	50	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
Natriumchlorid-Lösung	F	+	10	20	-	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Natriumchlorid-Lösung	F	+	20	20	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Natriumhydroxid-Lösg.	F	+	20	50	+	+	+	+	+	+	+	-		+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+
Natriumhydroxid-Lösg.	F	+	50	50	+	+	+	+	+	+	-	-		+	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-
Natriumhypochlorid-L.	F	+	20	50	-	-	-	-		+	+	-	+	-	-	+	+	+		+	+	-	+	+
Natriumkarbonat-Lösg.	F	+	50	50	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Natriumnitrat-Lösung	F	+	30	50	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	-	+	+
Natriumsilikat-Lösung	F	+	30	50	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Natriumsulfat-Lösung	F	+	20	50	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Natriumvanadat-Lösg.	F	+	10	50	+	+	+	+	+	+					+	+	+	+	+	+		+	+	+
Neon	G	-	100	100	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+		+			+	+	+
Oleum	F	+	10	50	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-		+	-	-	+	-	-	+	+
Oleum	F	+	20	20	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-		+	-	-	+	-	-	+	+
Olivenöl	F	-		50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	-	+	+
Oxalsäure-Lösung	F	+	10	50	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+		+	+	-	+	+
Ozon	G	-	10	20	+	+	+	+		+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Perchloräthylen	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+
Petroleum	F	-	100	20	+	+	+	+	+	+		+	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+
Phenol	F	-	90	50	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+
Phosgen	F	-	100	20	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+				-	+	+
Phosphorsäure	F	+	30	50	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+
Phosphorsäure	F	+	80	20	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+
Phtalsäureanhydrid	F	-		20	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+		-	+	+	+	+	+
Propan	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+				-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
Salpetersäure	F	+	20	40	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	+	+

	Gasförmig/Flüssig	Elektrische Leitfähigkeit	Konzentration (%)	Temperatur (°C)	Metalle										Nichtmetalle									
					1.4301	1.4539	1.4541	1.4571	Hasteloy B	Hasteloy C	Titan	Tantal	Platin	Hartgummi	Weichgummi	PFA	PTFE	EPDM	Buna N	Viton A	PVDF	PVC	Glas	Al ₂ O ₃
Salpetersäure	F	+	70	50	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+
Salzsäure	F	+	10	50	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+
Salzsäure	F	+	37	20	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+
Salzsole	F	+		20	-	-	-	-	+	+	+	+	+			+	+	+	-	+		+	+	+
Sauerstoff	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+		+	-	-	+	+
Schwefeldioxid, trock.	G	-	100	50	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+		+	+	+		+	+	-	+	+
Schweflige Säure	F	+	10	20	+	+	-	+	-	+		+		+	-	+	+	+		+	+	+		
Schwefelsäure	F	+	10	50	-	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+
Schwefelsäure	F	+	50	20	-	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-		+	+	-	+	+
Schwefelsäure	F	+	96	20	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-		+	+	-	+	+
Schwefelwasserst., tr.	G	-	100	20	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	-	+	+
Spinnbad	F	+		50				+	+	-	-	+		-	-	+	+	-		+		-	+	+
Stickstoff	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	-	-	+	+
Tetrachlorkohlenstoff	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+		-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+
Toluol	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+				-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+
Trichloräthylen	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+
Trikresylphosphat	F		100	50	+	+	+	+	+	+				-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+
Vinylacetat	F		100	20	+			+	-	+				-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	
Vinylchlorid	F		100	20		+		+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+			+	
Wasserstoff	G	-	100	50	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+
Wasserstoffperoxid-L.	F	+	40	20	+	+	+	+		+	-	+	-	-	-	+	+	+		+	+	-	+	
Weinsäure	F	+	20	50	-	-	-	-	+	+	+	+		+	+	+	+			+		+	+	+
Xylol	F	-	100	50	+	+	+	+	+	+				-	-	+	+	+	-	-	+	-	+	+
Zinkchlorid-Lösung	F	+	60	20	-	-	-	-	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Zitronensäure	F	+	60	50				+	+	+	-	+	+		+	+	+	+	+	+	+	-	+	+

Zur Handhabung der Beständigkeitstabelle:

- + bedeutet verwendbarer Werkstoff
- bedeutet ungeeigneter Werkstoff
- offene Felder bezeichnen unbekannte Beständigkeiten

12 Literaturverzeichnis

- W.W. Wendlandt Thermochemica acta
Volume 73, Amsterdam, 1984
- Nicholas, White Traceable temperatures
J. Wiley, Sussex, 1994
- Asimov Exakte Geheimnisse unserer Welt
Droemer Knauer, 1984
- Paul H. Dyke Thermoelectric thermometry
Leeds & Northrup Company, 1955
- F. Henning Temperaturmessung
J.A. Barth Verlag, Leipzig, 1951
- F. Lieneweg Temperaturmessung
akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1950
- M.K. Juchheim Elektrische Temperaturmessung
5. Auflage, Fulda, 1996
- Körtvélyessy Thermoelement Praxis
2. Ausgabe, Vulkan-Verlag, Essen, 1987
- J. W. Murdock Power Test Code Thermometer Wells
Journal of Engineering Power, Oct. 1959
- AD-Merkblätter, Taschenbuch-Ausgabe 1998
 Carl Heymanns Verlag, Beuth Verlag, 1998
- TRD Technische Regeln für Dampfkessel,
 Taschenbuch-Ausgabe 1997
 Carl Heymanns Verlag, Beuth Verlag, 1998
- F. Lieneweg Handbuch der technischen Temperaturmessung, Abschnitt 6.3
(Hrsg.) Die mechanische Beanspruchung von Thermometern
 (Autor: P. Dittrich) Vieweg Verlag, 1976)

- | | |
|--------------------|--|
| O. Uhrig | Beitrag zur Berechnung und Gestaltung von hochbeanspruchten Schutzrohren. VDI-Fortschrittsberichte, VDI-Verlag, 1981 |
| Hütte | Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften
Springer-Verlag, 1996 |
| S. Schwaigerer | Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau. Springer-Verlag, 1978 |
| | Temperatursensoren – Prinzipien und Applikationen
Expert Verlag, ISBN 3-8169-1261, 1995 |
| | Temperaturmessung in der Technik
Expert Verlag, ISBN 3-8169-0200-6 |
| | Temperatursensoren
Firmenpublication, Hartmann & Braun, 8123 D/E |
| | Metall Forschung und Entwicklung
Degussa, Frankfurt 1991 |
| Harald Jacques | Industrielle Messtechnik mit Pt-Schichtmesswiderständen |
| Joachim Scholz | Temperatursensoren für den industriellen Einsatz
Degussa-Sonderdruck Nr.8206
aus industrie-elektik + elektronik 29.Jahrgang 1984, Nr.11
Dr. Alfred Hüthig-Verlag / Heidelberg |
| Dr. Harald Jacques | Hochstabile Temperatursensoren für vielfältige Anwendungen
Degussa-Sonderdruck Nr.8215 |
| | VDI/VDE 2600: Metrologie (Messtechnik),
Blatt 1 bis 6 |
| | DIN IEC 381: Analoge Signale für Regel- und Steueranlagen |

J.Sturm, B.Winkler	MSR in der Chemischen Technik, Band 1 Springer Verlag
	Bell System Technical Reference: PUB 41212 Data Sets 202S and 202T
	HART-Nutzerorganisation HART Feld-Kommunikations-Protokoll, Stand 09/92
	VDI Berichte 982, Temperatur 92 VDI-Verlag, Stand 1992
	Mess-, Analysen- und Prozessleittechnik DECHEMA e.V./ACHEMA, Stand 1994
	PROFIBUS, Technische Kurzbeschreibung PNO, Stand 97
	Fieldbus FOUNDATION, Application Guide Fieldbus FOUNDATION AG-163 Rev. 1.0
DKD-3	Angabe der Messunsicherheiten bei Kalibrierungen Verlag für neue Wissenschaften GmbH, Bremerhaven
DKD-3-E1	Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen, Beispiele Verlag für neue Wissenschaften GmbH, Bremerhaven
Dr. W. Kessel	Messunsicherheitsanalyse – fundamentaler Bestandteil der Prüfmittelüberwachung
Franz Adunka	Messunsicherheiten: Theorie und Praxis Vulkan Verlag, Essen, 1998
Bernhard, F. (Hrsg.):	Handbuch der technischen Temperaturmessung, Springer-Verlag Berlin
	VDI-Wärmeatlas, 8. Auflage, Springer-Verlag Berlin, 1998

Weichert, Lothar	Temperaturmessung in der Technik VAE Kontakt & Studium Band 9; Expert Verlag
H. E. Bennett	Noble metal thermocouples Johnson, Matthey & Co, 1958
Horst Böhm	Einführung in die Metallkunde BI Hochschultaschenbücher
Dr. A. Schulz	Metallische Werkstoffe für Thermoelemente N.E.M.-Verlag Berlin, Heft 10
	PTB-Texte, Band 7, 20 Jahre Deutscher Kalibrierdienst, Wirtschaftsverlag NW, 1998
Ch. Diedrich	PROFIBUS PA Verlag Oldenbourg, ISBN 3-8350-3056-3
P. Westerfeld	Die Entwicklung der betrieblichen Temperaturmesstechnik in der Prozessautomatisierung in: Elektrotechnik – Signale, Aufbruch, Perspektiven; Geschichte der Elektrotechnik 7 VDE-Verlag Offenbach, 1988
Optris GmbH	Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung Infrarotthermometer und Infrarotkameras, 2006

13 Grundwerte für Thermoelemente und Widerstandsthermometer

Nach internationaler Temperaturskala ITS-90

Gemäß IEC 584/DIN EN 60584:

Thermoelemente Typen T, E, J, K, N, S, R, B

Gemäß IEC 751/DIN EN 60751:

Widerstandsthermometer Pt100

Nach Temperaturskala IPTS-68

Gemäß DIN 43710 (seit 1994 zurückgezogen. Keine Neuauflage):

Thermoelemente Typen U und L

Gemäß DIN 43760:

Widerstandsthermometer Ni100

Widerstandsthermometer mit Sondermesswiderständen

Pt50, Pt200, Pt500, Pt1000

Der genormte Messwiderstand Pt100 nach IEC 751/DIN EN 60751 hat einen Nennwiderstand von 100 Ω bei 0 °C. In Anlehnung an diese Norm sind Messwiderstände mit Teilen oder ganzzahligen Vielfachen dieses Nennwiderstandes im Handel. Nach Aussagen der Hersteller gelten dafür folgende Umrechnungen.

Bezeichnung	Nennwiderstand bei 0 °C	Faktor	Widerstandswerte
Pt50	50 Ω	0,5	0,5 x Pt100 IEC 751/DIN EN 60751
Pt200	200 Ω	2	2 x Pt100 IEC 751/DIN EN 60751
Pt500	500 Ω	5	5 x Pt100 IEC 751/DIN EN 60751
Pt1000	1000 Ω	10	10 x Pt100 IEC 751/DIN EN 60751

Für Ni-Widerstandsthermometer gilt sinngemäß die gleiche Vorgehensweise.

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
-270	-6,258	-9,835		-6,458	-4,345								-270
-269	-6,256	-9,833		-6,457	-4,345								-269
-268	-6,255	-9,831		-6,456	-4,344								-268
-267	-6,253	-9,828		-6,455	-4,344								-267
-266	-6,251	-9,825		-6,453	-4,343								-266
-265	-6,248	-9,821		-6,452	-4,342								-265
-264	-6,245	-9,817		-6,450	-4,341								-264
-263	-6,242	-9,813		-6,448	-4,340								-263
-262	-6,239	-9,808		-6,446	-4,339								-262
-261	-6,236	-9,802		-6,444	-4,337								-261
-260	-6,232	-9,797		-6,441	-4,336								-260
-259	-6,228	-9,790		-6,438	-4,334								-259
-258	-6,223	-9,784		-6,435	-4,332								-258
-257	-6,219	-9,777		-6,432	-4,330								-257
-256	-6,214	-9,770		-6,429	-4,328								-256
-255	-6,209	-9,762		-6,425	-4,326								-255
-254	-6,204	-9,754		-6,421	-4,324								-254
-253	-6,198	-9,746		-6,417	-4,321								-253
-252	-6,193	-9,737		-6,413	-4,319								-252
-251	-6,187	-9,728		-6,408	-4,316								-251
-250	-6,180	-9,718		-6,404	-4,313								-250
-249	-6,174	-9,709		-6,399	-4,310								-249
-248	-6,167	-9,698		-6,393	-4,307								-248
-247	-6,160	-9,688		-6,388	-4,304								-247
-246	-6,153	-9,677		-6,382	-4,300								-246
-245	-6,146	-9,666		-6,377	-4,297								-245
-244	-6,138	-9,654		-6,370	-4,293								-244
-243	-6,130	-9,642		-6,364	-4,289								-243
-242	-6,122	-9,630		-6,358	-4,285								-242
-241	-6,114	-9,617		-6,351	-4,281								-241
-240	-6,105	-9,604		-6,344	-4,277								-240
-239	-6,096	-9,591		-6,337	-4,273								-239
-238	-6,087	-9,577		-6,329	-4,268								-238
-237	-6,078	-9,563		-6,322	-4,263								-237
-236	-6,068	-9,548		-6,314	-4,258								-236
-235	-6,059	-9,534		-6,306	-4,254								-235
-234	-6,049	-9,519		-6,297	-4,248								-234
-233	-6,038	-9,503		-6,289	-4,243								-233
-232	-6,028	-9,487		-6,280	-4,238								-232
-231	-6,017	-9,471		-6,271	-4,232								-231
-230	-6,007	-9,455		-6,262	-4,226								-230
-229	-5,996	-9,438		-6,252	-4,221								-229
-228	-5,985	-9,421		-6,243	-4,215								-228
-227	-5,973	-9,404		-6,233	-4,209								-227
-226	-5,962	-9,386		-6,223	-4,202								-226
-225	-5,950	-9,368		-6,213	-4,196								-225
-224	-5,938	-9,350		-6,202	-4,189								-224
-223	-5,926	-9,331		-6,192	-4,183								-223
-222	-5,914	-9,313		-6,181	-4,176								-222
-221	-5,901	-9,293		-6,170	-4,169								-221

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
-220	-5,888	-9,274		-6,158	-4,162								-220
-219	-5,876	-9,254		-6,147	-4,154								-219
-218	-5,863	-9,234		-6,135	-4,147								-218
-217	-5,850	-9,214		-6,123	-4,140								-217
-216	-5,836	-9,193		-6,111	-4,132								-216
-215	-5,823	-9,172		-6,099	-4,124								-215
-214	-5,809	-9,151		-6,087	-4,116								-214
-213	-5,795	-9,129		-6,074	-4,108								-213
-212	-5,782	-9,107		-6,061	-4,100								-212
-211	-5,767	-9,085		-6,048	-4,091								-211
-210	-5,753	-9,063	-8,095	-6,035	-4,083								-210
-209	-5,739	-9,040	-8,076	-6,021	-4,074								-209
-208	-5,724	-9,017	-8,057	-6,007	-4,066								-208
-207	-5,710	-8,994	-8,037	-5,994	-4,057								-207
-206	-5,695	-8,971	-8,017	-5,980	-4,048								-206
-205	-5,680	-8,947	-7,996	-5,965	-4,038								-205
-204	-5,665	-8,923	-7,976	-5,951	-4,029								-204
-203	-5,650	-8,899	-7,955	-5,936	-4,020								-203
-202	-5,634	-8,874	-7,934	-5,922	-4,010								-202
-201	-5,619	-8,850	-7,912	-5,907	-4,000								-201
-200	-5,603	-8,825	-7,890	-5,891	-3,990				-5,70	-8,15	18,52		-200
-199	-5,587	-8,799	-7,868	-5,876	-3,980				-5,68	-8,12	18,95		-199
-198	-5,571	-8,774	-7,846	-5,861	-3,970				-5,66	-8,09	19,38		-198
-197	-5,555	-8,748	-7,824	-5,845	-3,960				-5,64	-8,06	19,82		-197
-196	-5,539	-8,722	-7,801	-5,829	-3,950				-5,62	-8,03	20,25		-196
-195	-5,523	-8,696	-7,778	-5,813	-3,939				-5,60	-8,00	20,68		-195
-194	-5,506	-8,669	-7,755	-5,797	-3,928				-5,59	-7,98	21,11		-194
-193	-5,489	-8,643	-7,731	-5,780	-3,918				-5,57	-7,95	21,54		-193
-192	-5,473	-8,616	-7,707	-5,763	-3,907				-5,55	-7,92	21,97		-192
-191	-5,456	-8,588	-7,683	-5,747	-3,896				-5,53	-7,89	22,40		-191
-190	-5,439	-8,561	-7,659	-5,730	-3,884				-5,51	-7,86	22,83		-190
-189	-5,421	-8,533	-7,634	-5,713	-3,873				-5,49	-7,83	23,25		-189
-188	-5,404	-8,505	-7,610	-5,695	-3,862				-5,47	-7,80	23,68		-188
-187	-5,387	-8,477	-7,585	-5,678	-3,850				-5,45	-7,77	24,11		-187
-186	-5,369	-8,449	-7,559	-5,660	-3,838				-5,43	-7,74	24,54		-186
-185	-5,351	-8,420	-7,534	-5,642	-3,827				-5,41	-7,71	24,97		-185
-184	-5,334	-8,391	-7,508	-5,624	-3,815				-5,40	-7,68	25,39		-184
-183	-5,316	-8,362	-7,482	-5,606	-3,803				-5,38	-7,65	25,82		-183
-182	-5,297	-8,333	-7,456	-5,588	-3,790				-5,36	-7,62	26,25		-182
-181	-5,279	-8,303	-7,429	-5,569	-3,778				-5,34	-7,59	26,67		-181
-180	-5,261	-8,273	-7,403	-5,550	-3,766				-5,32	-7,56	27,10		-180
-179	-5,242	-8,243	-7,376	-5,531	-3,753				-5,30	-7,53	27,52		-179
-178	-5,224	-8,213	-7,348	-5,512	-3,740				-5,28	-7,50	27,95		-178
-177	-5,205	-8,183	-7,321	-5,493	-3,728				-5,26	-7,47	28,37		-177
-176	-5,186	-8,152	-7,293	-5,474	-3,715				-5,24	-7,44	28,80		-176
-175	-5,167	-8,121	-7,265	-5,454	-3,702				-5,22	-7,40	29,22		-175
-174	-5,148	-8,090	-7,237	-5,435	-3,688				-5,20	-7,37	29,64		-174
-173	-5,128	-8,059	-7,209	-5,415	-3,675				-5,18	-7,34	30,07		-173
-172	-5,109	-8,027	-7,181	-5,395	-3,662				-5,16	-7,31	30,49		-172
-171	-5,089	-7,995	-7,152	-5,374	-3,648				-5,14	-7,28	30,91		-171

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
-170	-5,070	-7,963	-7,123	-5,354	-3,634				-5,12	-7,25	31,34		-170
-169	-5,050	-7,931	-7,094	-5,333	-3,621				-5,10	-7,22	31,76		-169
-168	-5,030	-7,899	-7,064	-5,313	-3,607				-5,08	-7,19	32,18		-168
-167	-5,010	-7,866	-7,035	-5,292	-3,593				-5,06	-7,15	32,60		-167
-166	-4,989	-7,833	-7,005	-5,271	-3,578				-5,04	-7,12	33,02		-166
-165	-4,969	-7,800	-6,975	-5,250	-3,564				-5,02	-7,09	33,44		-165
-164	-4,949	-7,767	-6,944	-5,228	-3,550				-4,99	-7,06	33,86		-164
-163	-4,928	-7,733	-6,914	-5,207	-3,535				-4,97	-7,03	34,28		-163
-162	-4,907	-7,700	-6,883	-5,185	-3,521				-4,95	-6,99	34,70		-162
-161	-4,886	-7,666	-6,853	-5,163	-3,506				-4,93	-6,96	35,12		-161
-160	-4,865	-7,632	-6,821	-5,141	-3,491				-4,91	-6,93	35,54		-160
-159	-4,844	-7,597	-6,790	-5,119	-3,476				-4,89	-6,90	35,96		-159
-158	-4,823	-7,563	-6,759	-5,097	-3,461				-4,87	-6,86	36,38		-158
-157	-4,802	-7,528	-6,727	-5,074	-3,446				-4,84	-6,83	36,80		-157
-156	-4,780	-7,493	-6,695	-5,052	-3,431				-4,82	-6,80	37,22		-156
-155	-4,759	-7,458	-6,663	-5,029	-3,415				-4,80	-6,76	37,64		-155
-154	-4,737	-7,423	-6,631	-5,006	-3,400				-4,78	-6,73	38,06		-154
-153	-4,715	-7,387	-6,598	-4,983	-3,384				-4,76	-6,70	38,47		-153
-152	-4,693	-7,351	-6,566	-4,960	-3,368				-4,73	-6,66	38,89		-152
-151	-4,671	-7,315	-6,533	-4,936	-3,352				-4,71	-6,63	39,31		-151
-150	-4,648	-7,279	-6,500	-4,913	-3,336				-4,69	-6,60	39,72		-150
-149	-4,626	-7,243	-6,467	-4,889	-3,320				-4,67	-6,56	40,14		-149
-148	-4,604	-7,206	-6,433	-4,865	-3,304				-4,64	-6,53	40,56		-148
-147	-4,581	-7,170	-6,400	-4,841	-3,288				-4,62	-6,50	40,97		-147
-146	-4,558	-7,133	-6,366	-4,817	-3,271				-4,60	-6,46	41,39		-146
-145	-4,535	-7,096	-6,332	-4,793	-3,255				-4,58	-6,43	41,80		-145
-144	-4,512	-7,058	-6,298	-4,768	-3,238				-4,55	-6,39	42,22		-144
-143	-4,489	-7,021	-6,263	-4,744	-3,221				-4,53	-6,36	42,63		-143
-142	-4,466	-6,983	-6,229	-4,719	-3,205				-4,51	-6,33	43,05		-142
-141	-4,443	-6,945	-6,194	-4,694	-3,188				-4,48	-6,29	43,46		-141
-140	-4,419	-6,907	-6,159	-4,669	-3,171				-4,46	-6,26	43,88		-140
-139	-4,395	-6,869	-6,124	-4,644	-3,153				-4,43	-6,22	44,29		-139
-138	-4,372	-6,831	-6,089	-4,618	-3,136				-4,41	-6,19	44,70		-138
-137	-4,348	-6,792	-6,054	-4,593	-3,119				-4,38	-6,15	45,12		-137
-136	-4,324	-6,753	-6,018	-4,567	-3,101				-4,36	-6,11	45,53		-136
-135	-4,300	-6,714	-5,982	-4,542	-3,084				-4,33	-6,08	45,94		-135
-134	-4,275	-6,675	-5,946	-4,516	-3,066				-4,31	-6,04	46,36		-134
-133	-4,251	-6,636	-5,910	-4,490	-3,048				-4,28	-6,01	46,77		-133
-132	-4,226	-6,596	-5,874	-4,463	-3,030				-4,26	-5,97	47,18		-132
-131	-4,202	-6,556	-5,838	-4,437	-3,012				-4,23	-5,93	47,59		-131
-130	-4,177	-6,516	-5,801	-4,411	-2,994				-4,21	-5,90	48,01		-130
-129	-4,152	-6,476	-5,764	-4,384	-2,976				-4,18	-5,86	48,42		-129
-128	-4,127	-6,436	-5,727	-4,357	-2,958				-4,16	-5,82	48,83		-128
-127	-4,102	-6,396	-5,690	-4,330	-2,939				-4,13	-5,79	49,24		-127
-126	-4,077	-6,355	-5,653	-4,303	-2,921				-4,11	-5,75	49,65		-126
-125	-4,052	-6,314	-5,616	-4,276	-2,902				-4,08	-5,71	50,06		-125
-124	-4,026	-6,273	-5,578	-4,249	-2,883				-4,05	-5,68	50,47		-124
-123	-4,000	-6,232	-5,541	-4,221	-2,865				-4,03	-5,64	50,88		-123
-122	-3,975	-6,191	-5,503	-4,194	-2,846				-4,00	-5,60	51,29		-122
-121	-3,949	-6,149	-5,465	-4,166	-2,827				-3,98	-5,57	51,70		-121

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
-120	-3,923	-6,107	-5,426	-4,138	-2,808				-3,95	-5,53	52,11		-120
-119	-3,897	-6,065	-5,388	-4,110	-2,789				-3,92	-5,49	52,52		-119
-118	-3,871	-6,023	-5,350	-4,082	-2,769				-3,90	-5,45	52,93		-118
-117	-3,844	-5,981	-5,311	-4,054	-2,750				-3,87	-5,41	53,34		-117
-116	-3,818	-5,939	-5,272	-4,025	-2,730				-3,84	-5,38	53,75		-116
-115	-3,791	-5,896	-5,233	-3,997	-2,711				-3,81	-5,34	54,15		-115
-114	-3,765	-5,853	-5,194	-3,968	-2,691				-3,79	-5,30	54,56		-114
-113	-3,738	-5,810	-5,155	-3,939	-2,672				-3,76	-5,26	54,97		-113
-112	-3,711	-5,767	-5,116	-3,911	-2,652				-3,73	-5,22	55,38		-112
-111	-3,684	-5,724	-5,076	-3,882	-2,632				-3,71	-5,19	55,79		-111
-110	-3,657	-5,681	-5,037	-3,852	-2,612				-3,68	-5,15	56,19		-110
-109	-3,629	-5,637	-4,997	-3,823	-2,592				-3,65	-5,11	56,60		-109
-108	-3,602	-5,593	-4,957	-3,794	-2,571				-3,62	-5,07	57,01		-108
-107	-3,574	-5,549	-4,917	-3,764	-2,551				-3,60	-5,03	57,41		-107
-106	-3,547	-5,505	-4,877	-3,734	-2,531				-3,57	-4,99	57,82		-106
-105	-3,519	-5,461	-4,836	-3,705	-2,510				-3,54	-4,95	58,23		-105
-104	-3,491	-5,417	-4,796	-3,675	-2,490				-3,51	-4,91	58,63		-104
-103	-3,463	-5,372	-4,755	-3,645	-2,469				-3,48	-4,87	59,04		-103
-102	-3,435	-5,327	-4,714	-3,614	-2,448				-3,46	-4,83	59,44		-102
-101	-3,407	-5,282	-4,674	-3,584	-2,428				-3,43	-4,79	59,85		-101
-100	-3,379	-5,237	-4,633	-3,554	-2,407				-3,40	-4,75	60,26		-100
- 99	-3,350	-5,192	-4,591	-3,523	-2,386				-3,37	-4,71	60,66		- 99
- 98	-3,322	-5,147	-4,550	-3,492	-2,365				-3,34	-4,66	61,07		- 98
- 97	-3,293	-5,101	-4,509	-3,462	-2,344				-3,31	-4,62	61,47		- 97
- 96	-3,264	-5,055	-4,467	-3,431	-2,322				-3,28	-4,58	61,88		- 96
- 95	-3,235	-5,009	-4,425	-3,400	-2,301				-3,25	-4,54	62,28		- 95
- 94	-3,206	-4,963	-4,384	-3,368	-2,280				-3,23	-4,50	62,68		- 94
- 93	-3,177	-4,917	-4,342	-3,337	-2,258				-3,20	-4,45	63,09		- 93
- 92	-3,148	-4,871	-4,300	-3,306	-2,237				-3,17	-4,41	63,49		- 92
- 91	-3,118	-4,824	-4,257	-3,274	-2,215				-3,14	-4,37	63,90		- 91
- 90	-3,089	-4,777	-4,215	-3,243	-2,193				-3,11	-4,33	64,30		- 90
- 89	-3,059	-4,731	-4,173	-3,211	-2,172				-3,08	-4,28	64,70		- 89
- 88	-3,030	-4,684	-4,130	-3,179	-2,150				-3,05	-4,24	65,11		- 88
- 87	-3,000	-4,636	-4,088	-3,147	-2,128				-3,02	-4,20	65,51		- 87
- 86	-2,970	-4,589	-4,045	-3,115	-2,106				-2,99	-4,15	65,91		- 86
- 85	-2,940	-4,542	-4,002	-3,083	-2,084				-2,96	-4,11	66,31		- 85
- 84	-2,910	-4,494	-3,959	-3,050	-2,062				-2,93	-4,06	66,72		- 84
- 83	-2,879	-4,446	-3,916	-3,018	-2,039				-2,90	-4,02	67,12		- 83
- 82	-2,849	-4,398	-3,872	-2,986	-2,017				-2,87	-3,98	67,52		- 82
- 81	-2,818	-4,350	-3,829	-2,953	-1,995				-2,84	-3,93	67,92		- 81
- 80	-2,788	-4,302	-3,786	-2,920	-1,972				-2,81	-3,89	68,33		- 80
- 79	-2,757	-4,254	-3,742	-2,887	-1,950				-2,78	-3,84	68,73		- 79
- 78	-2,726	-4,205	-3,698	-2,854	-1,927				-2,75	-3,80	69,13		- 78
- 77	-2,695	-4,156	-3,654	-2,821	-1,905				-2,72	-3,75	69,53		- 77
- 76	-2,664	-4,107	-3,610	-2,788	-1,882				-2,69	-3,71	69,93		- 76
- 75	-2,633	-4,058	-3,566	-2,755	-1,859				-2,66	-3,66	70,33		- 75
- 74	-2,602	-4,009	-3,522	-2,721	-1,836				-2,62	-3,62	70,73		- 74
- 73	-2,571	-3,960	-3,478	-2,688	-1,813				-2,59	-3,57	71,13		- 73
- 72	-2,539	-3,911	-3,434	-2,654	-1,790				-2,56	-3,53	71,53		- 72
- 71	-2,507	-3,861	-3,389	-2,620	-1,767				-2,53	-3,48	71,93		- 71

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
- 70	-2,476	-3,811	-3,344	-2,587	-1,744				-2,50	-3,44	72,33		- 70
- 69	-2,444	-3,761	-3,300	-2,553	-1,721				-2,47	-3,39	72,73		- 69
- 68	-2,412	-3,711	-3,255	-2,519	-1,698				-2,44	-3,35	73,13		- 68
- 67	-2,380	-3,661	-3,210	-2,485	-1,674				-2,40	-3,30	73,53		- 67
- 66	-2,348	-3,611	-3,165	-2,450	-1,651				-2,37	-3,25	73,93		- 66
- 65	-2,316	-3,561	-3,120	-2,416	-1,627				-2,34	-3,21	74,33		- 65
- 64	-2,283	-3,510	-3,075	-2,382	-1,604				-2,31	-3,16	74,73		- 64
- 63	-2,251	-3,459	-3,029	-2,347	-1,580				-2,28	-3,12	75,13		- 63
- 62	-2,218	-3,408	-2,984	-2,312	-1,557				-2,24	-3,07	75,53		- 62
- 61	-2,186	-3,357	-2,938	-2,278	-1,533				-2,21	-3,02	75,93		- 61
- 60	-2,153	-3,306	-2,893	-2,243	-1,509				-2,18	-2,98	76,33	69,5	- 60
- 59	-2,120	-3,255	-2,847	-2,208	-1,485				-2,15	-2,93	76,73	70,0	- 59
- 58	-2,087	-3,204	-2,801	-2,173	-1,462				-2,11	-2,88	77,12	70,5	- 58
- 57	-2,054	-3,152	-2,755	-2,138	-1,438				-2,08	-2,84	77,52	70,9	- 57
- 56	-2,021	-3,100	-2,709	-2,103	-1,414				-2,05	-2,79	77,92	71,4	- 56
- 55	-1,987	-3,048	-2,663	-2,067	-1,390				-2,02	-2,74	78,32	71,9	- 55
- 54	-1,954	-2,996	-2,617	-2,032	-1,366				-1,98	-2,70	78,72	72,3	- 54
- 53	-1,920	-2,944	-2,571	-1,996	-1,341				-1,95	-2,65	79,11	72,8	- 53
- 52	-1,887	-2,892	-2,524	-1,961	-1,317				-1,92	-2,60	79,51	73,3	- 52
- 51	-1,853	-2,840	-2,478	-1,925	-1,293				-1,88	-2,56	79,91	73,8	- 51
- 50	-1,819	-2,787	-2,431	-1,889	-1,269	-0,236	-0,226		-1,85	-2,51	80,31	74,3	- 50
- 49	-1,785	-2,735	-2,385	-1,854	-1,244	-0,232	-0,223		-1,81	-2,46	80,70	74,7	- 49
- 48	-1,751	-2,682	-2,338	-1,818	-1,220	-0,228	-0,219		-1,78	-2,41	81,10	75,2	- 48
- 47	-1,717	-2,629	-2,291	-1,782	-1,195	-0,224	-0,215		-1,74	-2,36	81,50	75,7	- 47
- 46	-1,683	-2,576	-2,244	-1,745	-1,171	-0,219	-0,211		-1,71	-2,32	81,89	76,2	- 46
- 45	-1,648	-2,523	-2,197	-1,709	-1,146	-0,215	-0,208		-1,67	-2,27	82,29	76,7	- 45
- 44	-1,614	-2,469	-2,150	-1,673	-1,122	-0,211	-0,204		-1,64	-2,22	82,69	77,2	- 44
- 43	-1,579	-2,416	-2,103	-1,637	-1,097	-0,207	-0,200		-1,60	-2,17	83,08	77,7	- 43
- 42	-1,545	-2,362	-2,055	-1,600	-1,072	-0,203	-0,196		-1,57	-2,12	83,48	78,1	- 42
- 41	-1,510	-2,309	-2,008	-1,564	-1,048	-0,199	-0,192		-1,53	-2,08	83,87	78,6	- 41
- 40	-1,475	-2,255	-1,961	-1,527	-1,023	-0,194	-0,188		-1,50	-2,03	84,27	79,1	- 40
- 39	-1,440	-2,201	-1,913	-1,490	-0,998	-0,190	-0,184		-1,46	-1,98	84,67	79,6	- 39
- 38	-1,405	-2,147	-1,865	-1,453	-0,973	-0,186	-0,180		-1,43	-1,93	85,06	80,1	- 38
- 37	-1,370	-2,093	-1,818	-1,417	-0,948	-0,181	-0,175		-1,39	-1,88	85,46	80,6	- 37
- 36	-1,335	-2,038	-1,770	-1,380	-0,923	-0,177	-0,171		-1,36	-1,83	85,85	81,1	- 36
- 35	-1,299	-1,984	-1,722	-1,343	-0,898	-0,173	-0,167		-1,32	-1,78	86,25	81,6	- 35
- 34	-1,264	-1,929	-1,674	-1,305	-0,873	-0,168	-0,163		-1,28	-1,73	86,64	82,1	- 34
- 33	-1,228	-1,874	-1,626	-1,268	-0,848	-0,164	-0,158		-1,25	-1,68	87,04	82,6	- 33
- 32	-1,192	-1,820	-1,578	-1,231	-0,823	-0,159	-0,154		-1,21	-1,63	87,43	83,1	- 32
- 31	-1,157	-1,765	-1,530	-1,194	-0,798	-0,155	-0,150		-1,18	-1,58	87,83	83,6	- 31
- 30	-1,121	-1,709	-1,482	-1,156	-0,772	-0,150	-0,145		-1,14	-1,53	88,22	84,1	- 30
- 29	-1,085	-1,654	-1,433	-1,119	-0,747	-0,146	-0,141		-1,10	-1,48	88,62	84,7	- 29
- 28	-1,049	-1,599	-1,385	-1,081	-0,722	-0,141	-0,137		-1,07	-1,43	89,01	85,2	- 28
- 27	-1,013	-1,543	-1,336	-1,043	-0,696	-0,136	-0,132		-1,03	-1,38	89,40	85,7	- 27
- 26	-0,976	-1,488	-1,288	-1,006	-0,671	-0,132	-0,128		-0,99	-1,32	89,80	86,2	- 26
- 25	-0,940	-1,432	-1,239	-0,968	-0,646	-0,127	-0,123		-0,95	-1,27	90,19	86,7	- 25
- 24	-0,904	-1,376	-1,190	-0,930	-0,620	-0,122	-0,119		-0,92	-1,22	90,59	87,2	- 24
- 23	-0,867	-1,320	-1,142	-0,892	-0,595	-0,117	-0,114		-0,88	-1,17	90,98	87,7	- 23
- 22	-0,830	-1,264	-1,093	-0,854	-0,569	-0,113	-0,109		-0,84	-1,12	91,37	88,3	- 22
- 21	-0,794	-1,208	-1,044	-0,816	-0,544	-0,108	-0,105		-0,81	-1,07	91,77	88,8	- 21

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
- 20	-0,757	-1,152	-0,995	-0,778	-0,518	-0,103	-0,100		-0,77	-1,02	92,16	89,3	- 20
- 19	-0,720	-1,095	-0,946	-0,739	-0,492	-0,098	-0,095		-0,73	-0,97	92,55	89,8	- 19
- 18	-0,683	-1,039	-0,896	-0,701	-0,467	-0,093	-0,091		-0,69	-0,92	92,95	90,3	- 18
- 17	-0,646	-0,982	-0,847	-0,663	-0,441	-0,088	-0,086		-0,66	-0,87	93,34	90,9	- 17
- 16	-0,608	-0,925	-0,798	-0,624	-0,415	-0,083	-0,081		-0,62	-0,81	93,73	91,4	- 16
- 15	-0,571	-0,868	-0,749	-0,586	-0,390	-0,078	-0,076		-0,58	-0,76	94,12	91,9	- 15
- 14	-0,534	-0,811	-0,699	-0,547	-0,364	-0,073	-0,071		-0,54	-0,71	94,52	92,5	- 14
- 13	-0,496	-0,754	-0,650	-0,508	-0,338	-0,068	-0,066		-0,50	-0,66	94,91	93,0	- 13
- 12	-0,459	-0,697	-0,600	-0,470	-0,312	-0,063	-0,061		-0,47	-0,61	95,30	93,5	- 12
- 11	-0,421	-0,639	-0,550	-0,431	-0,286	-0,058	-0,056		-0,43	-0,56	95,69	94,0	- 11
- 10	-0,383	-0,582	-0,501	-0,392	-0,260	-0,053	-0,051		-0,39	-0,51	96,09	94,6	- 10
- 9	-0,345	-0,524	-0,451	-0,353	-0,234	-0,048	-0,046		-0,35	-0,46	96,48	95,1	- 9
- 8	-0,307	-0,466	-0,401	-0,314	-0,209	-0,042	-0,041		-0,31	-0,41	96,87	95,7	- 8
- 7	-0,269	-0,408	-0,351	-0,275	-0,183	-0,037	-0,036		-0,27	-0,36	97,26	96,2	- 7
- 6	-0,231	-0,350	-0,301	-0,236	-0,157	-0,032	-0,031		-0,23	-0,31	97,65	96,7	- 6
- 5	-0,193	-0,292	-0,251	-0,197	-0,131	-0,027	-0,026		-0,19	-0,25	98,04	97,3	- 5
- 4	-0,154	-0,234	-0,201	-0,157	-0,104	-0,021	-0,021		-0,16	-0,20	98,44	97,8	- 4
- 3	-0,116	-0,176	-0,151	-0,118	-0,078	-0,016	-0,016		-0,12	-0,15	98,83	98,4	- 3
- 2	-0,077	-0,117	-0,101	-0,079	-0,052	-0,011	-0,011		-0,08	-0,10	99,22	98,9	- 2
- 1	-0,039	-0,059	-0,050	-0,039	-0,026	-0,005	-0,005		-0,04	-0,05	99,61	99,5	- 1
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	100,00	100,0	0
1	0,039	0,059	0,050	0,039	0,026	0,005	0,005	0,000	0,04	0,05	100,39	100,5	1
2	0,078	0,118	0,101	0,079	0,052	0,011	0,011	0,000	0,08	0,10	100,78	101,1	2
3	0,117	0,176	0,151	0,119	0,078	0,016	0,016	-0,001	0,12	0,16	101,17	101,7	3
4	0,156	0,235	0,202	0,158	0,104	0,022	0,021	-0,001	0,16	0,21	101,56	102,2	4
5	0,195	0,294	0,253	0,198	0,130	0,027	0,027	-0,001	0,20	0,26	101,95	102,8	5
6	0,234	0,354	0,303	0,238	0,156	0,033	0,032	-0,001	0,24	0,31	102,34	103,3	6
7	0,273	0,413	0,354	0,277	0,182	0,038	0,038	-0,001	0,28	0,36	102,73	103,9	7
8	0,312	0,472	0,405	0,317	0,208	0,044	0,043	-0,002	0,32	0,42	103,12	104,4	8
9	0,352	0,532	0,456	0,357	0,235	0,050	0,049	-0,002	0,36	0,47	103,51	105,0	9
10	0,391	0,591	0,507	0,397	0,261	0,055	0,054	-0,002	0,40	0,52	103,90	105,6	10
11	0,431	0,651	0,558	0,437	0,287	0,061	0,060	-0,002	0,44	0,57	104,29	106,1	11
12	0,470	0,711	0,609	0,477	0,313	0,067	0,065	-0,002	0,48	0,63	104,68	106,7	12
13	0,510	0,770	0,660	0,517	0,340	0,072	0,071	-0,002	0,52	0,68	105,07	107,2	13
14	0,549	0,830	0,711	0,557	0,366	0,078	0,077	-0,002	0,56	0,73	105,46	107,8	14
15	0,589	0,890	0,762	0,597	0,393	0,084	0,082	-0,002	0,60	0,78	105,85	108,4	15
16	0,629	0,950	0,814	0,637	0,419	0,090	0,088	-0,002	0,64	0,84	106,24	109,0	16
17	0,669	1,010	0,865	0,677	0,446	0,095	0,094	-0,002	0,68	0,89	106,63	109,5	17
18	0,709	1,071	0,916	0,718	0,472	0,101	0,100	-0,003	0,72	0,94	107,02	110,1	18
19	0,749	1,131	0,968	0,758	0,499	0,107	0,105	-0,003	0,76	1,00	107,41	110,7	19
20	0,790	1,192	1,019	0,798	0,525	0,113	0,111	-0,003	0,80	1,05	107,79	111,2	20
21	0,830	1,252	1,071	0,838	0,552	0,119	0,117	-0,003	0,84	1,10	108,18	111,8	21
22	0,870	1,313	1,122	0,879	0,578	0,125	0,123	-0,003	0,88	1,16	108,57	112,4	22
23	0,911	1,373	1,174	0,919	0,605	0,131	0,129	-0,003	0,92	1,21	108,96	113,0	23
24	0,951	1,434	1,226	0,960	0,632	0,137	0,135	-0,003	0,96	1,26	109,35	113,5	24
25	0,992	1,495	1,277	1,000	0,659	0,143	0,141	-0,002	1,00	1,31	109,73	114,1	25
26	1,033	1,556	1,329	1,041	0,685	0,149	0,147	-0,002	1,05	1,37	110,12	114,7	26
27	1,074	1,617	1,381	1,081	0,712	0,155	0,153	-0,002	1,09	1,42	110,51	115,3	27
28	1,114	1,678	1,433	1,122	0,739	0,161	0,159	-0,002	1,13	1,47	110,90	115,9	28
29	1,155	1,740	1,485	1,163	0,766	0,167	0,165	-0,002	1,17	1,53	111,29	116,5	29
30	1,196	1,801	1,537	1,203	0,793	0,173	0,171	-0,002	1,21	1,58	111,67	117,1	30

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Ptt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
31	1,238	1,862	1,589	1,244	0,820	0,179	0,177	-0,002	1,25	1,63	112,06	117,6	31
32	1,279	1,924	1,641	1,285	0,847	0,185	0,183	-0,002	1,29	1,69	112,45	118,2	32
33	1,320	1,986	1,693	1,326	0,874	0,191	0,189	-0,002	1,34	1,74	112,83	118,8	33
34	1,362	2,047	1,745	1,366	0,901	0,197	0,195	-0,002	1,38	1,79	113,22	119,4	34
35	1,403	2,109	1,797	1,407	0,928	0,204	0,201	-0,001	1,42	1,84	113,61	120,0	35
36	1,445	2,171	1,849	1,448	0,955	0,210	0,207	-0,001	1,46	1,90	114,00	120,6	36
37	1,486	2,233	1,902	1,489	0,983	0,216	0,214	-0,001	1,50	1,95	114,38	121,2	37
38	1,528	2,295	1,954	1,530	1,010	0,222	0,220	-0,001	1,55	2,00	114,77	121,8	38
39	1,570	2,357	2,006	1,571	1,037	0,229	0,226	-0,001	1,59	2,06	115,15	122,4	39
40	1,612	2,420	2,059	1,612	1,065	0,235	0,232	0,000	1,63	2,11	115,54	123,0	40
41	1,654	2,482	2,111	1,653	1,092	0,241	0,239	0,000	1,67	2,16	115,93	123,6	41
42	1,696	2,545	2,164	1,694	1,119	0,248	0,245	0,000	1,71	2,22	116,31	124,2	42
43	1,738	2,607	2,216	1,735	1,147	0,254	0,251	0,000	1,76	2,27	116,70	124,8	43
44	1,780	2,670	2,269	1,776	1,174	0,260	0,258	0,000	1,80	2,33	117,08	125,4	44
45	1,823	2,733	2,322	1,817	1,202	0,267	0,264	0,001	1,84	2,38	117,47	126,0	45
46	1,865	2,795	2,374	1,858	1,229	0,273	0,271	0,001	1,88	2,43	117,86	126,7	46
47	1,908	2,858	2,427	1,899	1,257	0,280	0,277	0,001	1,92	2,49	118,24	127,3	47
48	1,950	2,921	2,480	1,941	1,284	0,286	0,284	0,002	1,97	2,54	118,63	127,9	48
49	1,993	2,984	2,532	1,982	1,312	0,292	0,290	0,002	2,01	2,60	119,01	128,5	49
50	2,036	3,048	2,585	2,023	1,340	0,299	0,296	0,002	2,05	2,65	119,40	129,1	50
51	2,079	3,111	2,638	2,064	1,368	0,305	0,303	0,003	2,09	2,70	119,78	129,7	51
52	2,122	3,174	2,691	2,106	1,395	0,312	0,310	0,003	2,14	2,76	120,17	130,3	52
53	2,165	3,238	2,744	2,147	1,423	0,319	0,316	0,003	2,18	2,81	120,55	131,0	53
54	2,208	3,301	2,797	2,188	1,451	0,325	0,323	0,004	2,22	2,87	120,94	131,6	54
55	2,251	3,365	2,850	2,230	1,479	0,332	0,329	0,004	2,26	2,92	121,32	132,2	55
56	2,294	3,429	2,903	2,271	1,507	0,338	0,336	0,004	2,31	2,97	121,71	132,8	56
57	2,338	3,492	2,956	2,312	1,535	0,345	0,343	0,005	2,35	3,03	122,09	133,5	57
58	2,381	3,556	3,009	2,354	1,563	0,352	0,349	0,005	2,39	3,08	122,47	134,1	58
59	2,425	3,620	3,062	2,395	1,591	0,358	0,356	0,006	2,44	3,14	122,86	134,7	59
60	2,468	3,685	3,116	2,436	1,619	0,365	0,363	0,006	2,48	3,19	123,24	135,3	60
61	2,512	3,749	3,169	2,478	1,647	0,372	0,369	0,007	2,52	3,24	123,63	136,0	61
62	2,556	3,813	3,222	2,519	1,675	0,378	0,376	0,007	2,57	3,30	124,01	136,6	62
63	2,600	3,877	3,275	2,561	1,703	0,385	0,383	0,008	2,61	3,35	124,39	137,2	63
64	2,643	3,942	3,329	2,602	1,732	0,392	0,390	0,008	2,65	3,41	124,78	137,9	64
65	2,687	4,006	3,382	2,644	1,760	0,399	0,397	0,009	2,69	3,46	125,16	138,5	65
66	2,732	4,071	3,436	2,685	1,788	0,405	0,403	0,009	2,74	3,51	125,54	139,2	66
67	2,776	4,136	3,489	2,727	1,817	0,412	0,410	0,010	2,78	3,57	125,93	139,8	67
68	2,820	4,200	3,543	2,768	1,845	0,419	0,417	0,010	2,82	3,62	126,31	140,4	68
69	2,864	4,265	3,596	2,810	1,873	0,426	0,424	0,011	2,87	3,68	126,69	141,1	69
70	2,909	4,330	3,650	2,851	1,902	0,433	0,431	0,011	2,91	3,73	127,08	141,7	70
71	2,953	4,395	3,703	2,893	1,930	0,440	0,438	0,012	2,95	3,78	127,46	142,4	71
72	2,998	4,460	3,757	2,934	1,959	0,446	0,445	0,012	3,00	3,84	127,84	143,0	72
73	3,043	4,526	3,810	2,976	1,988	0,453	0,452	0,013	3,04	3,89	128,22	143,7	73
74	3,087	4,591	3,864	3,017	2,016	0,460	0,459	0,014	3,09	3,95	128,61	144,3	74
75	3,132	4,656	3,918	3,059	2,045	0,467	0,466	0,014	3,13	4,00	128,99	145,0	75
76	3,177	4,722	3,971	3,100	2,074	0,474	0,473	0,015	3,17	4,05	129,37	145,6	76
77	3,222	4,788	4,025	3,142	2,102	0,481	0,480	0,015	3,22	4,11	129,75	146,3	77
78	3,267	4,853	4,079	3,184	2,131	0,488	0,487	0,016	3,26	4,16	130,13	146,9	78
79	3,312	4,919	4,133	3,225	2,160	0,495	0,494	0,017	3,31	4,22	130,52	147,6	79
80	3,358	4,985	4,187	3,267	2,189	0,502	0,501	0,017	3,35	4,27	130,90	148,3	80

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Ptt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
81	3,403	5,051	4,240	3,308	2,218	0,509	0,508	0,018	3,39	4,32	131,28	148,9	81
82	3,448	5,117	4,294	3,350	2,247	0,516	0,516	0,019	3,44	4,38	131,66	149,6	82
83	3,494	5,183	4,348	3,391	2,276	0,523	0,523	0,020	3,48	4,43	132,04	150,2	83
84	3,539	5,249	4,402	3,433	2,305	0,530	0,530	0,020	3,53	4,49	132,42	150,9	84
85	3,585	5,315	4,456	3,474	2,334	0,538	0,537	0,021	3,57	4,54	132,80	151,6	85
86	3,631	5,382	4,510	3,516	2,363	0,545	0,544	0,022	3,62	4,60	133,18	152,2	86
87	3,677	5,448	4,564	3,557	2,392	0,552	0,552	0,022	3,66	4,65	133,57	152,9	87
88	3,722	5,514	4,618	3,599	2,421	0,559	0,559	0,023	3,71	4,71	133,95	153,6	88
89	3,768	5,581	4,672	3,640	2,450	0,566	0,566	0,024	3,75	4,77	134,33	154,3	89
90	3,814	5,648	4,726	3,682	2,480	0,573	0,573	0,025	3,80	4,82	134,71	154,9	90
91	3,860	5,714	4,781	3,723	2,509	0,580	0,581	0,026	3,84	4,87	135,09	155,6	91
92	3,907	5,781	4,835	3,765	2,538	0,588	0,588	0,026	3,89	4,93	135,47	156,3	92
93	3,953	5,848	4,889	3,806	2,568	0,595	0,595	0,027	3,93	4,98	135,85	157,0	93
94	3,999	5,915	4,943	3,848	2,597	0,602	0,603	0,028	3,98	5,04	136,23	157,7	94
95	4,046	5,982	4,997	3,889	2,626	0,609	0,610	0,029	4,02	5,09	136,61	158,3	95
96	4,092	6,049	5,052	3,931	2,656	0,617	0,618	0,030	4,07	5,15	136,99	159,0	96
97	4,138	6,117	5,106	3,972	2,685	0,624	0,625	0,031	4,11	5,20	137,37	159,7	97
98	4,185	6,184	5,160	4,013	2,715	0,631	0,632	0,031	4,16	5,26	137,75	160,4	98
99	4,232	6,251	5,215	4,055	2,744	0,639	0,640	0,032	4,20	5,32	138,13	161,1	99
100	4,279	6,319	5,269	4,096	2,774	0,646	0,647	0,033	4,25	5,37	138,51	161,8	100
101	4,325	6,386	5,323	4,138	2,804	0,653	0,655	0,034	4,30	5,42	138,88	162,5	101
102	4,372	6,454	5,378	4,179	2,833	0,661	0,662	0,035	4,34	5,48	139,26	163,2	102
103	4,419	6,522	5,432	4,220	2,863	0,668	0,670	0,036	4,39	5,53	139,64	163,9	103
104	4,466	6,590	5,487	4,262	2,893	0,675	0,677	0,037	4,43	5,59	140,02	164,6	104
105	4,513	6,658	5,541	4,303	2,923	0,683	0,685	0,038	4,48	5,64	140,40	165,3	105
106	4,561	6,725	5,595	4,344	2,953	0,690	0,693	0,039	4,53	5,70	140,78	166,0	106
107	4,608	6,794	5,650	4,385	2,983	0,698	0,700	0,040	4,57	5,75	141,16	166,7	107
108	4,655	6,862	5,705	4,427	3,012	0,705	0,708	0,041	4,62	5,81	141,54	167,4	108
109	4,702	6,930	5,759	4,468	3,042	0,713	0,715	0,042	4,66	5,87	141,91	168,1	109
110	4,750	6,998	5,814	4,509	3,072	0,720	0,723	0,043	4,71	5,92	142,29	168,8	110
111	4,798	7,066	5,868	4,550	3,102	0,727	0,731	0,044	4,76	5,97	142,67	169,5	111
112	4,845	7,135	5,923	4,591	3,133	0,735	0,738	0,045	4,80	6,03	143,05	170,2	112
113	4,893	7,203	5,977	4,633	3,163	0,743	0,746	0,046	4,85	6,08	143,43	170,9	113
114	4,941	7,272	6,032	4,674	3,193	0,750	0,754	0,047	4,90	6,14	143,80	171,6	114
115	4,988	7,341	6,087	4,715	3,223	0,758	0,761	0,048	4,94	6,19	144,18	172,4	115
116	5,036	7,409	6,141	4,756	3,253	0,765	0,769	0,049	4,99	6,25	144,56	173,1	116
117	5,084	7,478	6,196	4,797	3,283	0,773	0,777	0,050	5,04	6,30	144,94	173,8	117
118	5,132	7,547	6,251	4,838	3,314	0,780	0,785	0,051	5,09	6,36	145,31	174,5	118
119	5,180	7,616	6,306	4,879	3,344	0,788	0,792	0,052	5,13	6,42	145,69	175,2	119
120	5,228	7,685	6,360	4,920	3,374	0,795	0,800	0,053	5,18	6,47	146,07	176,0	120
121	5,277	7,754	6,415	4,961	3,405	0,803	0,808	0,055	5,23	6,53	146,44	176,7	121
122	5,325	7,823	6,470	5,002	3,435	0,811	0,816	0,056	5,27	6,58	146,82	177,4	122
123	5,373	7,892	6,525	5,043	3,466	0,818	0,824	0,057	5,32	6,64	147,20	178,2	123
124	5,422	7,962	6,579	5,084	3,496	0,826	0,832	0,058	5,37	6,69	147,57	178,9	124
125	5,470	8,031	6,634	5,124	3,527	0,834	0,839	0,059	5,41	6,75	147,95	179,6	125
126	5,519	8,101	6,689	5,165	3,557	0,841	0,847	0,060	5,46	6,81	148,33	180,4	126
127	5,567	8,170	6,744	5,206	3,588	0,849	0,855	0,062	5,51	6,86	148,70	181,1	127
128	5,616	8,240	6,799	5,247	3,619	0,857	0,863	0,063	5,56	6,92	149,08	181,8	128
129	5,665	8,309	6,854	5,288	3,649	0,865	0,871	0,064	5,60	6,97	149,46	182,6	129
130	5,714	8,379	6,909	5,328	3,680	0,872	0,879	0,065	5,65	7,03	149,83	183,3	130

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Ptt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
131	5,763	8,449	6,964	5,369	3,711	0,880	0,887	0,066	5,70	7,09	150,21	184,1	131
132	5,812	8,519	7,019	5,410	3,742	0,888	0,895	0,068	5,75	7,14	150,58	184,8	132
133	5,861	8,589	7,074	5,450	3,772	0,896	0,903	0,069	5,79	7,20	150,96	185,6	133
134	5,910	8,659	7,129	5,491	3,803	0,903	0,911	0,070	5,84	7,25	151,33	186,3	134
135	5,959	8,729	7,184	5,532	3,834	0,911	0,919	0,072	5,89	7,31	151,71	187,1	135
136	6,008	8,799	7,239	5,572	3,865	0,919	0,927	0,073	5,94	7,37	152,08	187,8	136
137	6,057	8,869	7,294	5,613	3,896	0,927	0,935	0,074	5,99	7,42	152,46	188,6	137
138	6,107	8,940	7,349	5,653	3,927	0,935	0,943	0,075	6,03	7,48	152,83	189,4	138
139	6,156	9,010	7,404	5,694	3,958	0,942	0,951	0,077	6,08	7,53	153,21	190,1	139
140	6,206	9,081	7,459	5,735	3,989	0,950	0,959	0,078	6,13	7,59	153,58	190,9	140
141	6,255	9,151	7,514	5,775	4,020	0,958	0,967	0,079	6,18	7,65	153,96	191,7	141
142	6,305	9,222	7,569	5,815	4,051	0,966	0,976	0,081	6,23	7,70	154,33	192,4	142
143	6,355	9,292	7,624	5,856	4,083	0,974	0,984	0,082	6,28	7,76	154,71	193,2	143
144	6,404	9,363	7,679	5,896	4,114	0,982	0,992	0,084	6,33	7,81	155,08	194,0	144
145	6,454	9,434	7,734	5,937	4,145	0,990	1,000	0,085	6,37	7,87	155,46	194,7	145
146	6,504	9,505	7,789	5,977	4,176	0,998	1,008	0,086	6,42	7,93	155,83	195,5	146
147	6,554	9,576	7,844	6,017	4,208	1,006	1,016	0,088	6,47	7,98	156,20	196,3	147
148	6,604	9,647	7,900	6,058	4,239	1,013	1,025	0,089	6,52	8,04	156,58	197,1	148
149	6,654	9,718	7,955	6,098	4,270	1,021	1,033	0,091	6,57	8,09	156,95	197,9	149
150	6,704	9,789	8,010	6,138	4,302	1,029	1,041	0,092	6,62	8,15	157,33	198,6	150
151	6,754	9,860	8,065	6,179	4,333	1,037	1,049	0,094	6,67	8,21	157,70	199,4	151
152	6,805	9,931	8,120	6,219	4,365	1,045	1,058	0,095	6,72	8,26	158,07	200,2	152
153	6,855	10,003	8,175	6,259	4,396	1,053	1,066	0,096	6,77	8,32	158,45	201,0	153
154	6,905	10,074	8,231	6,299	4,428	1,061	1,074	0,098	6,82	8,37	158,82	201,8	154
155	6,956	10,145	8,286	6,339	4,459	1,069	1,082	0,099	6,87	8,43	159,19	202,6	155
156	7,006	10,217	8,341	6,380	4,491	1,077	1,091	0,101	6,92	8,49	159,56	203,4	156
157	7,057	10,288	8,396	6,420	4,523	1,085	1,099	0,102	6,97	8,54	159,94	204,2	157
158	7,107	10,360	8,452	6,460	4,554	1,094	1,107	0,104	7,02	8,60	160,31	205,0	158
159	7,158	10,432	8,507	6,500	4,586	1,102	1,116	0,106	7,07	8,65	160,68	205,8	159
160	7,209	10,503	8,562	6,540	4,618	1,110	1,124	0,107	7,12	8,71	161,05	206,6	160
161	7,260	10,575	8,618	6,580	4,650	1,118	1,132	0,109	7,17	8,77	161,43	207,4	161
162	7,310	10,647	8,673	6,620	4,681	1,126	1,141	0,110	7,22	8,82	161,80	208,2	162
163	7,361	10,719	8,728	6,660	4,713	1,134	1,149	0,112	7,27	8,88	162,17	209,0	163
164	7,412	10,791	8,783	6,701	4,745	1,142	1,158	0,113	7,33	8,93	162,54	209,8	164
165	7,463	10,863	8,839	6,741	4,777	1,150	1,166	0,115	7,37	8,99	162,91	210,6	165
166	7,515	10,935	8,894	6,781	4,809	1,158	1,175	0,117	7,43	9,05	163,29	211,5	166
167	7,566	11,007	8,949	6,821	4,841	1,167	1,183	0,118	7,48	9,10	163,66	212,3	167
168	7,617	11,080	9,005	6,861	4,873	1,175	1,191	0,120	7,53	9,16	164,03	213,1	168
169	7,668	11,152	9,060	6,901	4,905	1,183	1,200	0,122	7,58	9,21	164,40	213,9	169
170	7,720	11,224	9,115	6,941	4,937	1,191	1,208	0,123	7,63	9,27	164,77	214,8	170
171	7,771	11,297	9,171	6,981	4,969	1,199	1,217	0,125	7,68	9,33	165,14	215,6	171
172	7,823	11,369	9,226	7,021	5,001	1,207	1,225	0,127	7,73	9,38	165,51	216,4	172
173	7,874	11,442	9,282	7,060	5,033	1,216	1,234	0,128	7,79	9,44	165,89	217,3	173
174	7,926	11,514	9,337	7,100	5,066	1,224	1,242	0,130	7,84	9,49	166,26	218,1	174
175	7,977	11,587	9,392	7,140	5,098	1,232	1,251	0,132	7,89	9,55	166,63	218,9	175
176	8,029	11,660	9,448	7,180	5,130	1,240	1,260	0,134	7,94	9,61	167,00	219,8	176
177	8,081	11,733	9,503	7,220	5,162	1,249	1,268	0,135	7,99	9,66	167,37	220,6	177
178	8,133	11,805	9,559	7,260	5,195	1,257	1,277	0,137	8,05	9,72	167,74	221,5	178
179	8,185	11,878	9,614	7,300	5,227	1,265	1,285	0,139	8,10	9,77	168,11	222,3	179
180	8,237	11,951	9,669	7,340	5,259	1,273	1,294	0,141	8,15	9,83	168,48	223,2	180

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
181	8,289	12,024	9,725	7,380	5,292	1,282	1,303	0,142	8,20	9,89	168,85	224,0	181
182	8,341	12,097	9,780	7,420	5,324	1,290	1,311	0,144	8,25	9,94	169,22	224,9	182
183	8,393	12,170	9,836	7,460	5,357	1,298	1,320	0,146	8,31	10,00	169,59	225,7	183
184	8,445	12,243	9,891	7,500	5,389	1,307	1,329	0,148	8,36	10,05	169,96	226,6	184
185	8,497	12,317	9,947	7,540	5,422	1,315	1,337	0,150	8,41	10,11	170,33	227,4	185
186	8,550	12,390	10,002	7,579	5,454	1,323	1,346	0,151	8,46	10,17	170,70	228,3	186
187	8,602	12,463	10,057	7,619	5,487	1,332	1,355	0,153	8,51	10,22	171,07	229,2	187
188	8,654	12,537	10,113	7,659	5,520	1,340	1,363	0,155	8,57	10,28	171,43	230,0	188
189	8,707	12,610	10,168	7,699	5,552	1,348	1,372	0,157	8,62	10,33	171,80	230,9	189
190	8,759	12,684	10,224	7,739	5,585	1,357	1,381	0,159	8,67	10,39	172,17	231,8	190
191	8,812	12,757	10,279	7,779	5,618	1,365	1,389	0,161	8,72	10,45	172,54	232,7	191
192	8,865	12,831	10,335	7,819	5,650	1,373	1,398	0,163	8,78	10,50	172,91	233,5	192
193	8,917	12,904	10,390	7,859	5,683	1,382	1,407	0,165	8,83	10,56	173,28	234,4	193
194	8,970	12,978	10,446	7,899	5,716	1,390	1,416	0,166	8,88	10,61	173,65	235,3	194
195	9,023	13,052	10,501	7,939	5,749	1,399	1,425	0,168	8,93	10,67	174,02	236,2	195
196	9,076	13,126	10,557	7,979	5,782	1,407	1,433	0,170	8,99	10,73	174,38	237,1	196
197	9,129	13,199	10,612	8,019	5,815	1,415	1,442	0,172	9,04	10,78	174,75	238,0	197
198	9,182	13,273	10,668	8,059	5,847	1,424	1,451	0,174	9,09	10,84	175,12	238,9	198
199	9,235	13,347	10,723	8,099	5,880	1,432	1,460	0,176	9,15	10,89	175,49	239,8	199
200	9,288	13,421	10,779	8,138	5,913	1,441	1,469	0,178	9,20	10,95	175,86	240,7	200
201	9,341	13,495	10,834	8,178	5,946	1,449	1,477	0,180	9,25	11,01	176,22	241,6	201
202	9,395	13,569	10,890	8,218	5,979	1,458	1,486	0,182	9,31	11,06	176,59	242,5	202
203	9,448	13,644	10,945	8,258	6,013	1,466	1,495	0,184	9,36	11,12	176,96	243,4	203
204	9,501	13,718	11,001	8,298	6,046	1,475	1,504	0,186	9,42	11,17	177,33	244,3	204
205	9,555	13,792	11,056	8,338	6,079	1,483	1,513	0,188	9,47	11,23	177,69	245,2	205
206	9,608	13,866	11,112	8,378	6,112	1,492	1,522	0,190	9,52	11,29	178,06	246,1	206
207	9,662	13,941	11,167	8,418	6,145	1,500	1,531	0,192	9,58	11,34	178,43	247,0	207
208	9,715	14,015	11,223	8,458	6,178	1,509	1,540	0,195	9,63	11,40	178,79	247,9	208
209	9,769	14,090	11,278	8,499	6,211	1,517	1,549	0,197	9,69	11,45	179,16	248,9	209
210	9,822	14,164	11,334	8,539	6,245	1,526	1,558	0,199	9,74	11,51	179,53	249,8	210
211	9,876	14,239	11,389	8,579	6,278	1,534	1,567	0,201	9,79	11,57	179,89	250,7	211
212	9,930	14,313	11,445	8,619	6,311	1,543	1,575	0,203	9,85	11,62	180,26	251,7	212
213	9,984	14,388	11,501	8,659	6,345	1,551	1,584	0,205	9,90	11,68	180,63	252,6	213
214	10,038	14,463	11,556	8,699	6,378	1,560	1,593	0,207	9,96	11,73	180,99	253,5	214
215	10,092	14,537	11,612	8,739	6,411	1,569	1,602	0,209	10,01	11,79	181,36	254,5	215
216	10,146	14,612	11,667	8,779	6,445	1,577	1,611	0,212	10,07	11,85	181,72	255,4	216
217	10,200	14,687	11,723	8,819	6,478	1,586	1,620	0,214	10,12	11,90	182,09	256,3	217
218	10,254	14,762	11,778	8,860	6,512	1,594	1,629	0,216	10,18	11,96	182,46	257,3	218
219	10,308	14,837	11,834	8,900	6,545	1,603	1,639	0,218	10,23	12,01	182,82	258,2	219
220	10,362	14,912	11,889	8,940	6,579	1,612	1,648	0,220	10,29	12,07	183,19	259,2	220
221	10,417	14,987	11,945	8,980	6,612	1,620	1,657	0,222	10,35	12,13	183,55	260,2	221
222	10,471	15,062	12,000	9,020	6,646	1,629	1,666	0,225	10,40	12,18	183,92	261,1	222
223	10,525	15,137	12,056	9,061	6,680	1,638	1,675	0,227	10,46	12,24	184,28	262,1	223
224	10,580	15,212	12,111	9,101	6,713	1,646	1,684	0,229	10,51	12,29	184,65	263,0	224
225	10,634	15,287	12,167	9,141	6,747	1,655	1,693	0,231	10,57	12,35	185,01	264,0	225
226	10,689	15,362	12,222	9,181	6,781	1,663	1,702	0,234	10,62	12,41	185,38	265,0	226
227	10,743	15,438	12,278	9,222	6,814	1,672	1,711	0,236	10,68	12,46	185,74	266,0	227
228	10,798	15,513	12,334	9,262	6,848	1,681	1,720	0,238	10,74	12,52	186,11	266,9	228
229	10,853	15,588	12,389	9,302	6,882	1,690	1,729	0,241	10,79	12,57	186,47	267,9	229
230	10,907	15,664	12,445	9,343	6,916	1,698	1,739	0,243	10,85	12,63	186,84	268,9	230

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
231	10,962	15,739	12,500	9,383	6,949	1,707	1,748	0,245	10,91	12,69	187,20	269,9	231
232	11,017	15,815	12,556	9,423	6,983	1,716	1,757	0,248	10,96	12,74	187,56	270,9	232
233	11,072	15,890	12,611	9,464	7,017	1,724	1,766	0,250	11,02	12,80	187,93	271,8	233
234	11,127	15,966	12,667	9,504	7,051	1,733	1,775	0,252	11,07	12,85	188,29	272,8	234
235	11,182	16,041	12,722	9,545	7,085	1,742	1,784	0,255	11,13	12,91	188,66	273,8	235
236	11,237	16,117	12,778	9,585	7,119	1,751	1,794	0,257	11,19	12,97	189,02	274,8	236
237	11,292	16,193	12,833	9,626	7,153	1,759	1,803	0,259	11,24	13,02	189,38	275,8	237
238	11,347	16,269	12,889	9,666	7,187	1,768	1,812	0,262	11,30	13,08	189,75	276,8	238
239	11,403	16,344	12,944	9,707	7,221	1,777	1,821	0,264	11,35	13,13	190,11	277,9	239
240	11,458	16,420	13,000	9,747	7,255	1,786	1,831	0,267	11,41	13,19	190,47	278,9	240
241	11,513	16,496	13,056	9,788	7,289	1,794	1,840	0,269	11,47	13,25	190,84	279,9	241
242	11,569	16,572	13,111	9,828	7,323	1,803	1,849	0,271	11,52	13,30	191,20	280,9	242
243	11,624	16,648	13,167	9,869	7,357	1,812	1,858	0,274	11,58	13,36	191,56	281,9	243
244	11,680	16,724	13,222	9,909	7,392	1,821	1,868	0,276	11,64	13,41	191,92	282,9	244
245	11,735	16,800	13,278	9,950	7,426	1,829	1,877	0,279	11,69	13,47	192,29	284,0	245
246	11,791	16,876	13,333	9,991	7,460	1,838	1,886	0,281	11,75	13,53	192,65	285,0	246
247	11,846	16,952	13,389	10,031	7,494	1,847	1,895	0,284	11,81	13,58	193,01	286,0	247
248	11,902	17,028	13,444	10,072	7,528	1,856	1,905	0,286	11,87	13,64	193,37	287,1	248
249	11,958	17,104	13,500	10,113	7,563	1,865	1,914	0,289	11,92	13,69	193,74	288,1	249
250	12,013	17,181	13,555	10,153	7,597	1,874	1,923	0,291	11,98	13,75	194,10	289,2	250
251	12,069	17,257	13,611	10,194	7,631	1,882	1,933	0,294	12,04	13,81	194,46		251
252	12,125	17,333	13,666	10,235	7,666	1,891	1,942	0,296	12,09	13,86	194,82		252
253	12,181	17,409	13,722	10,276	7,700	1,900	1,951	0,299	12,15	13,92	195,18		253
254	12,237	17,486	13,777	10,316	7,734	1,909	1,961	0,301	12,21	13,97	195,55		254
255	12,293	17,562	13,833	10,357	7,769	1,918	1,970	0,304	12,26	14,03	195,91		255
256	12,349	17,639	13,888	10,398	7,803	1,927	1,980	0,307	12,32	14,09	196,27		256
257	12,405	17,715	13,944	10,439	7,838	1,936	1,989	0,309	12,38	14,14	196,63		257
258	12,461	17,792	13,999	10,480	7,872	1,944	1,998	0,312	12,44	14,20	196,99		258
259	12,518	17,868	14,055	10,520	7,907	1,953	2,008	0,314	12,49	14,25	197,35		259
260	12,574	17,945	14,110	10,561	7,941	1,962	2,017	0,317	12,55	14,31	197,71		260
261	12,630	18,021	14,166	10,602	7,976	1,971	2,027	0,320	12,61	14,37	198,07		261
262	12,687	18,098	14,221	10,643	8,010	1,980	2,036	0,322	12,67	14,42	198,43		262
263	12,743	18,175	14,277	10,684	8,045	1,989	2,046	0,325	12,72	14,48	198,79		263
264	12,799	18,252	14,332	10,725	8,080	1,998	2,055	0,328	12,78	14,54	199,15		264
265	12,856	18,328	14,388	10,766	8,114	2,007	2,064	0,330	12,84	14,59	199,51		265
266	12,912	18,405	14,443	10,807	8,149	2,016	2,074	0,333	12,90	14,65	199,87		266
267	12,969	18,482	14,499	10,848	8,184	2,025	2,083	0,336	12,96	14,71	200,23		267
268	13,026	18,559	14,554	10,889	8,218	2,034	2,093	0,338	13,01	14,76	200,59		268
269	13,082	18,636	14,609	10,930	8,253	2,043	2,102	0,341	13,07	14,82	200,95		269
270	13,139	18,713	14,665	10,971	8,288	2,052	2,112	0,344	13,13	14,88	201,31		270
271	13,196	18,790	14,720	11,012	8,323	2,061	2,121	0,347	13,19	14,94	201,67		271
272	13,253	18,867	14,776	11,053	8,358	2,070	2,131	0,349	13,25	14,99	202,03		272
273	13,310	18,944	14,831	11,094	8,392	2,078	2,140	0,352	13,30	15,05	202,39		273
274	13,366	19,021	14,887	11,135	8,427	2,087	2,150	0,355	13,36	15,10	202,75		274
275	13,423	19,098	14,942	11,176	8,462	2,096	2,159	0,358	13,42	15,16	203,11		275
276	13,480	19,175	14,998	11,217	8,497	2,105	2,169	0,360	13,48	15,22	203,47		276
277	13,537	19,252	15,053	11,259	8,532	2,114	2,179	0,363	13,54	15,27	203,83		277
278	13,595	19,330	15,109	11,300	8,567	2,123	2,188	0,366	13,59	15,33	204,19		278
279	13,652	19,407	15,164	11,341	8,602	2,132	2,198	0,369	13,65	15,38	204,55		279
280	13,709	19,484	15,219	11,382	8,637	2,141	2,207	0,372	13,71	15,44	204,90		280

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
281	13,766	19,561	15,275	11,423	8,672	2,151	2,217	0,375	13,77	15,50	205,26		281
282	13,823	19,639	15,330	11,465	8,707	2,160	2,226	0,377	13,83	15,55	205,62		282
283	13,881	19,716	15,386	11,506	8,742	2,169	2,236	0,380	13,89	15,61	205,98		283
284	13,938	19,794	15,441	11,547	8,777	2,178	2,246	0,383	13,95	15,66	206,34		284
285	13,995	19,871	15,496	11,588	8,812	2,187	2,255	0,386	14,00	15,72	206,70		285
286	14,053	19,948	15,552	11,630	8,847	2,196	2,265	0,389	14,06	15,78	207,05		286
287	14,110	20,026	15,607	11,671	8,882	2,205	2,275	0,392	14,12	15,83	207,41		287
288	14,168	20,103	15,663	11,712	8,918	2,214	2,284	0,395	14,18	15,89	207,77		288
289	14,226	20,181	15,718	11,753	8,953	2,223	2,294	0,398	14,24	15,94	208,13		289
290	14,283	20,259	15,773	11,795	8,988	2,232	2,304	0,401	14,30	16,00	208,48		290
291	14,341	20,336	15,829	11,836	9,023	2,241	2,313	0,404	14,36	16,06	208,84		291
292	14,399	20,414	15,884	11,877	9,058	2,250	2,323	0,407	14,42	16,11	209,20		292
293	14,456	20,492	15,940	11,919	9,094	2,259	2,333	0,410	14,48	16,17	209,56		293
294	14,514	20,569	15,995	11,960	9,129	2,268	2,342	0,413	14,54	16,22	209,91		294
295	14,572	20,647	16,050	12,001	9,164	2,277	2,352	0,416	14,60	16,28	210,27		295
296	14,630	20,725	16,106	12,043	9,200	2,287	2,362	0,419	14,66	16,34	210,63		296
297	14,688	20,803	16,161	12,084	9,235	2,296	2,371	0,422	14,72	16,39	210,98		297
298	14,746	20,880	16,216	12,126	9,270	2,305	2,381	0,425	14,78	16,45	211,34		298
299	14,804	20,958	16,272	12,167	9,306	2,314	2,391	0,428	14,84	16,50	211,70		299
300	14,862	21,036	16,327	12,209	9,341	2,323	2,401	0,431	14,90	16,56	212,05		300
301	14,920	21,114	16,383	12,250	9,377	2,332	2,410	0,434	14,96	16,62	212,41		301
302	14,978	21,192	16,438	12,291	9,412	2,341	2,420	0,437	15,02	16,67	212,76		302
303	15,036	21,270	16,493	12,333	9,448	2,350	2,430	0,440	15,08	16,73	213,12		303
304	15,095	21,348	16,549	12,374	9,483	2,360	2,440	0,443	15,14	16,78	213,48		304
305	15,153	21,426	16,604	12,416	9,519	2,369	2,449	0,446	15,20	16,84	213,83		305
306	15,211	21,504	16,659	12,457	9,554	2,378	2,459	0,449	15,26	16,90	214,19		306
307	15,270	21,582	16,715	12,499	9,590	2,387	2,469	0,452	15,32	16,95	214,54		307
308	15,328	21,660	16,770	12,540	9,625	2,396	2,479	0,455	15,38	17,01	214,90		308
309	15,386	21,739	16,825	12,582	9,661	2,405	2,488	0,458	15,44	17,06	215,25		309
310	15,445	21,817	16,881	12,624	9,696	2,415	2,498	0,462	15,50	17,12	215,61		310
311	15,503	21,895	16,936	12,665	9,732	2,424	2,508	0,465	15,56	17,18	215,96		311
312	15,562	21,973	16,991	12,707	9,768	2,433	2,518	0,468	15,62	17,23	216,32		312
313	15,621	22,051	17,046	12,748	9,803	2,442	2,528	0,471	15,68	17,29	216,67		313
314	15,679	22,130	17,102	12,790	9,839	2,451	2,538	0,474	15,74	17,34	217,03		314
315	15,738	22,208	17,157	12,831	9,875	2,461	2,547	0,478	15,80	17,40	217,38		315
316	15,797	22,286	17,212	12,873	9,910	2,470	2,557	0,481	15,86	17,46	217,74		316
317	15,856	22,365	17,268	12,915	9,946	2,479	2,567	0,484	15,92	17,51	218,09		317
318	15,914	22,443	17,323	12,956	9,982	2,488	2,577	0,487	15,98	17,57	218,44		318
319	15,973	22,522	17,378	12,998	10,018	2,497	2,587	0,490	16,04	17,62	218,80		319
320	16,032	22,600	17,434	13,040	10,054	2,507	2,597	0,494	16,10	17,68	219,15		320
321	16,091	22,678	17,489	13,081	10,089	2,516	2,607	0,497	16,16	17,74	219,51		321
322	16,150	22,757	17,544	13,123	10,125	2,525	2,617	0,500	16,22	17,79	219,86		322
323	16,209	22,835	17,599	13,165	10,161	2,534	2,626	0,503	16,28	17,85	220,21		323
324	16,268	22,914	17,655	13,206	10,197	2,544	2,636	0,507	16,34	17,90	220,57		324
325	16,327	22,993	17,710	13,248	10,233	2,553	2,646	0,510	16,40	17,96	220,92		325
326	16,387	23,071	17,765	13,290	10,269	2,562	2,656	0,513	16,46	18,02	221,27		326
327	16,446	23,150	17,820	13,331	10,305	2,571	2,666	0,517	16,52	18,07	221,63		327
328	16,505	23,228	17,876	13,373	10,341	2,581	2,676	0,520	16,58	18,13	221,98		328
329	16,564	23,307	17,931	13,415	10,377	2,590	2,686	0,523	16,64	18,18	222,33		329
330	16,624	23,386	17,986	13,457	10,413	2,599	2,696	0,527	16,70	18,24	222,68		330

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
331	16,683	23,464	18,041	13,498	10,449	2,609	2,706	0,530	16,76	18,30	223,04		331
332	16,742	23,543	18,097	13,540	10,485	2,618	2,716	0,533	16,82	18,35	223,39		332
333	16,802	23,622	18,152	13,582	10,521	2,627	2,726	0,537	16,88	18,41	223,74		333
334	16,861	23,701	18,207	13,624	10,557	2,636	2,736	0,540	16,94	18,46	224,09		334
335	16,921	23,780	18,262	13,665	10,593	2,646	2,746	0,544	17,00	18,52	224,45		335
336	16,980	23,858	18,318	13,707	10,629	2,655	2,756	0,547	17,07	18,58	224,80		336
337	17,040	23,937	18,373	13,749	10,665	2,664	2,766	0,550	17,13	18,63	225,15		337
338	17,100	24,016	18,428	13,791	10,701	2,674	2,776	0,554	17,19	18,69	225,50		338
339	17,159	24,095	18,483	13,833	10,737	2,683	2,786	0,557	17,24	18,74	225,85		339
340	17,219	24,174	18,538	13,874	10,774	2,692	2,796	0,561	17,31	18,80	226,21		340
341	17,279	24,253	18,594	13,916	10,810	2,702	2,806	0,564	17,37	18,86	226,56		341
342	17,339	24,332	18,649	13,958	10,846	2,711	2,816	0,568	17,43	18,91	226,91		342
343	17,399	24,411	18,704	14,000	10,882	2,720	2,826	0,571	17,49	18,97	227,26		343
344	17,458	24,490	18,759	14,042	10,918	2,730	2,836	0,575	17,55	19,02	227,61		344
345	17,518	24,569	18,814	14,084	10,955	2,739	2,846	0,578	17,61	19,08	227,96		345
346	17,578	24,648	18,870	14,126	10,991	2,748	2,856	0,582	17,68	19,14	228,31		346
347	17,638	24,727	18,925	14,167	11,027	2,758	2,866	0,585	17,74	19,19	228,66		347
348	17,698	24,806	18,980	14,209	11,064	2,767	2,876	0,589	17,80	19,25	229,02		348
349	17,759	24,885	19,035	14,251	11,100	2,776	2,886	0,592	17,86	19,30	229,37		349
350	17,819	24,964	19,090	14,293	11,136	2,786	2,896	0,596	17,92	19,36	229,72		350
351	17,879	25,044	19,146	14,335	11,173	2,795	2,906	0,599	17,98	19,42	230,07		351
352	17,939	25,123	19,201	14,377	11,209	2,805	2,916	0,603	18,04	19,47	230,42		352
353	17,999	25,202	19,256	14,419	11,245	2,814	2,926	0,607	18,10	19,53	230,77		353
354	18,060	25,281	19,311	14,461	11,282	2,823	2,937	0,610	18,16	19,58	231,12		354
355	18,120	25,360	19,366	14,503	11,318	2,833	2,947	0,614	18,22	19,64	231,47		355
356	18,180	25,440	19,422	14,545	11,355	2,842	2,957	0,617	18,29	19,70	231,82		356
357	18,241	25,519	19,477	14,587	11,391	2,851	2,967	0,621	18,35	19,75	232,17		357
358	18,301	25,598	19,532	14,629	11,428	2,861	2,977	0,625	18,41	19,81	232,52		358
359	18,362	25,678	19,587	14,671	11,464	2,870	2,987	0,628	18,47	19,86	232,87		359
360	18,422	25,757	19,642	14,713	11,501	2,880	2,997	0,632	18,53	19,92	233,21		360
361	18,483	25,836	19,697	14,755	11,537	2,889	3,007	0,636	18,59	19,98	233,56		361
362	18,543	25,916	19,753	14,797	11,574	2,899	3,018	0,639	18,65	20,03	233,91		362
363	18,604	25,995	19,808	14,839	11,610	2,908	3,028	0,643	18,71	20,09	234,26		363
364	18,665	26,075	19,863	14,881	11,647	2,917	3,038	0,647	18,77	20,14	234,61		364
365	18,725	26,154	19,918	14,923	11,683	2,927	3,048	0,650	18,83	20,20	234,96		365
366	18,786	26,233	19,973	14,965	11,720	2,936	3,058	0,654	18,89	20,26	235,31		366
367	18,847	26,313	20,028	15,007	11,757	2,946	3,068	0,658	18,96	20,31	235,66		367
368	18,908	26,392	20,083	15,049	11,793	2,955	3,079	0,662	19,02	20,37	236,00		368
369	18,969	26,472	20,139	15,091	11,830	2,965	3,089	0,665	19,08	20,42	236,35		369
370	19,030	26,552	20,194	15,133	11,867	2,974	3,099	0,669	19,14	20,48	236,70		370
371	19,091	26,631	20,249	15,175	11,903	2,983	3,109	0,673	19,20	20,54	237,05		371
372	19,152	26,711	20,304	15,217	11,940	2,993	3,119	0,677	19,26	20,59	237,40		372
373	19,213	26,790	20,359	15,259	11,977	3,002	3,130	0,680	19,33	20,65	237,74		373
374	19,274	26,870	20,414	15,301	12,013	3,012	3,140	0,684	19,39	20,70	238,09		374
375	19,335	26,950	20,469	15,343	12,050	3,021	3,150	0,688	19,45	20,76	238,44		375
376	19,396	27,029	20,525	15,385	12,087	3,031	3,160	0,692	19,51	20,82	238,79		376
377	19,457	27,109	20,580	15,427	12,124	3,040	3,171	0,696	19,57	20,87	239,13		377
378	19,518	27,189	20,635	15,469	12,160	3,050	3,181	0,700	19,64	20,93	239,48		378
379	19,579	27,268	20,690	15,511	12,197	3,059	3,191	0,703	19,70	20,98	239,83		379
380	19,641	27,348	20,745	15,554	12,234	3,069	3,201	0,707	19,76	21,04	240,18		380

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
381	19,702	27,428	20,800	15,596	12,271	3,078	3,212	0,711	19,82	21,10	240,52		381
382	19,763	27,507	20,855	15,638	12,308	3,088	3,222	0,715	19,89	21,15	240,87		382
383	19,825	27,587	20,911	15,680	12,345	3,097	3,232	0,719	19,95	21,21	241,22		383
384	19,886	27,667	20,966	15,722	12,382	3,107	3,242	0,723	20,01	21,26	241,56		384
385	19,947	27,747	21,021	15,764	12,418	3,116	3,253	0,727	20,07	21,32	241,91		385
386	20,009	27,827	21,076	15,806	12,455	3,126	3,263	0,731	20,13	21,38	242,26		386
387	20,070	27,907	21,131	15,849	12,492	3,135	3,273	0,735	20,19	21,43	242,60		387
388	20,132	27,986	21,186	15,891	12,529	3,145	3,284	0,738	20,26	21,49	242,95		388
389	20,193	28,066	21,241	15,933	12,566	3,154	3,294	0,742	20,32	21,54	243,29		389
390	20,255	28,146	21,297	15,975	12,603	3,164	3,304	0,746	20,38	21,60	243,64		390
391	20,317	28,226	21,352	16,017	12,640	3,173	3,315	0,750	20,44	21,66	243,99		391
392	20,378	28,306	21,407	16,059	12,677	3,183	3,325	0,754	20,50	21,71	244,33		392
393	20,440	28,386	21,462	16,102	12,714	3,192	3,335	0,758	20,57	21,77	244,68		393
394	20,502	28,466	21,517	16,144	12,751	3,202	3,346	0,762	20,63	21,82	245,02		394
395	20,563	28,546	21,572	16,186	12,788	3,212	3,356	0,766	20,69	21,88	245,37		395
396	20,625	28,626	21,627	16,228	12,825	3,221	3,366	0,770	20,75	21,94	245,71		396
397	20,687	28,706	21,683	16,270	12,862	3,231	3,377	0,774	20,81	21,99	246,06		397
398	20,748	28,786	21,738	16,313	12,899	3,240	3,387	0,778	20,88	22,05	246,40		398
399	20,810	28,866	21,793	16,355	12,937	3,250	3,397	0,782	20,94	22,10	246,75		399
400	20,872	28,946	21,848	16,397	12,974	3,259	3,408	0,787	21,00	22,16	247,09		400
401		29,026	21,903	16,439	13,011	3,269	3,418	0,791	21,06	22,22	247,44		401
402		29,106	21,958	16,482	13,048	3,278	3,428	0,795	21,12	22,27	247,78		402
403		29,186	22,014	16,524	13,085	3,288	3,439	0,799	21,19	22,33	248,13		403
404		29,266	22,069	16,566	13,122	3,298	3,449	0,803	21,25	22,38	248,47		404
405		29,346	22,124	16,608	13,159	3,307	3,460	0,807	21,31	22,44	248,81		405
406		29,427	22,179	16,651	13,197	3,317	3,470	0,811	21,37	22,50	249,16		406
407		29,507	22,234	16,693	13,234	3,326	3,480	0,815	21,43	22,55	249,50		407
408		29,587	22,289	16,735	13,271	3,336	3,491	0,819	21,50	22,61	249,85		408
409		29,667	22,345	16,778	13,308	3,346	3,501	0,824	21,56	22,66	250,19		409
410		29,747	22,400	16,820	13,346	3,355	3,512	0,828	21,62	22,72	250,53		410
411		29,827	22,455	16,862	13,383	3,365	3,522	0,832	21,68	22,78	250,88		411
412		29,908	22,510	16,904	13,420	3,374	3,533	0,836	21,75	22,83	251,22		412
413		29,988	22,565	16,947	13,457	3,384	3,543	0,840	21,81	22,89	251,56		413
414		30,068	22,620	16,989	13,495	3,394	3,553	0,844	21,87	22,95	251,91		414
415		30,148	22,676	17,031	13,532	3,403	3,564	0,849	21,93	23,00	252,25		415
416		30,229	22,731	17,074	13,569	3,413	3,574	0,853	22,00	23,06	252,59		416
417		30,309	22,786	17,116	13,607	3,423	3,585	0,857	22,06	23,12	252,93		417
418		30,389	22,841	17,158	13,644	3,432	3,595	0,861	22,12	23,18	253,28		418
419		30,470	22,896	17,201	13,682	3,442	3,606	0,866	22,19	23,23	253,62		419
420		30,550	22,952	17,243	13,719	3,451	3,616	0,870	22,25	23,29	253,96		420
421		30,630	23,007	17,285	13,756	3,461	3,627	0,874	22,31	23,35	254,30		421
422		30,711	23,062	17,328	13,794	3,471	3,637	0,878	22,38	23,40	254,65		422
423		30,791	23,117	17,370	13,831	3,480	3,648	0,883	22,44	23,46	254,99		423
424		30,871	23,172	17,413	13,869	3,490	3,658	0,887	22,50	23,52	255,33		424
425		30,952	23,228	17,455	13,906	3,500	3,669	0,891	22,56	23,57	255,67		425
426		31,032	23,283	17,497	13,944	3,509	3,679	0,896	22,63	23,63	256,01		426
427		31,112	23,338	17,540	13,981	3,519	3,690	0,900	22,69	23,69	256,35		427
428		31,193	23,393	17,582	14,019	3,529	3,700	0,904	22,75	23,74	256,70		428
429		31,273	23,449	17,624	14,056	3,538	3,711	0,909	22,82	23,80	257,04		429
430		31,354	23,504	17,667	14,094	3,548	3,721	0,913	22,88	23,86	257,38		430

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
431		31,434	23,559	17,709	14,131	3,558	3,732	0,917	22,94	23,92	257,72		431
432		31,515	23,614	17,752	14,169	3,567	3,742	0,922	23,01	23,97	258,06		432
433		31,595	23,670	17,794	14,206	3,577	3,753	0,926	23,07	24,03	258,40		433
434		31,676	23,725	17,837	14,244	3,587	3,764	0,930	23,13	24,09	258,74		434
435		31,756	23,780	17,879	14,281	3,596	3,774	0,935	23,19	24,14	259,08		435
436		31,837	23,835	17,921	14,319	3,606	3,785	0,939	23,26	24,20	259,42		436
437		31,917	23,891	17,964	14,356	3,616	3,795	0,944	23,32	24,26	259,76		437
438		31,998	23,946	18,006	14,394	3,626	3,806	0,948	23,38	24,32	260,10		438
439		32,078	24,001	18,049	14,432	3,635	3,816	0,953	23,45	24,37	260,44		439
440		32,159	24,057	18,091	14,469	3,645	3,827	0,957	23,51	24,43	260,78		440
441		32,239	24,112	18,134	14,507	3,655	3,838	0,961	23,57	24,49	261,12		441
442		32,320	24,167	18,176	14,545	3,664	3,848	0,966	23,64	24,54	261,46		442
443		32,400	24,223	18,218	14,582	3,674	3,859	0,970	23,70	24,60	261,80		443
444		32,481	24,278	18,261	14,620	3,684	3,869	0,975	23,77	24,66	262,14		444
445		32,562	24,333	18,303	14,658	3,694	3,880	0,979	23,83	24,71	262,48		445
446		32,642	24,389	18,346	14,695	3,703	3,891	0,984	23,89	24,77	262,82		446
447		32,723	24,444	18,388	14,733	3,713	3,901	0,988	23,96	24,83	263,16		447
448		32,803	24,499	18,431	14,771	3,723	3,912	0,993	24,02	24,89	263,50		448
449		32,884	24,555	18,473	14,809	3,732	3,922	0,997	24,09	24,94	263,84		449
450		32,965	24,610	18,516	14,846	3,742	3,933	1,002	24,15	25,00	264,18		450
451		33,045	24,665	18,558	14,884	3,752	3,944	1,007	24,21	25,06	264,52		451
452		33,126	24,721	18,601	14,922	3,762	3,954	1,011	24,28	25,11	264,86		452
453		33,207	24,776	18,643	14,960	3,771	3,965	1,016	24,34	25,17	265,20		453
454		33,287	24,832	18,686	14,998	3,781	3,976	1,020	24,41	25,23	265,53		454
455		33,368	24,887	18,728	15,035	3,791	3,986	1,025	24,47	25,28	265,87		455
456		33,449	24,943	18,771	15,073	3,801	3,997	1,030	24,53	25,34	266,21		456
457		33,529	24,998	18,813	15,111	3,810	4,008	1,034	24,60	25,40	266,55		457
458		33,610	25,053	18,856	15,149	3,820	4,018	1,039	24,66	25,46	266,89		458
459		33,691	25,109	18,898	15,187	3,830	4,029	1,043	24,73	25,51	267,22		459
460		33,772	25,164	18,941	15,225	3,840	4,040	1,048	24,79	25,57	267,56		460
461		33,852	25,220	18,983	15,262	3,850	4,050	1,053	24,85	25,63	267,90		461
462		33,933	25,275	19,026	15,300	3,859	4,061	1,057	24,92	25,68	268,24		462
463		34,014	25,331	19,068	15,338	3,869	4,072	1,062	24,98	25,74	268,57		463
464		34,095	25,386	19,111	15,376	3,879	4,083	1,067	25,05	25,80	268,91		464
465		34,175	25,442	19,154	15,414	3,889	4,093	1,071	25,11	25,85	269,25		465
466		34,256	25,497	19,196	15,452	3,898	4,104	1,076	25,18	25,91	269,59		466
467		34,337	25,553	19,239	15,490	3,908	4,115	1,081	25,24	25,97	269,92		467
468		34,418	25,608	19,281	15,528	3,918	4,125	1,086	25,31	26,03	270,26		468
469		34,498	25,664	19,324	15,566	3,928	4,136	1,090	25,37	26,08	270,60		469
470		34,579	25,720	19,366	15,604	3,938	4,147	1,095	25,44	26,14	270,93		470
471		34,660	25,775	19,409	15,642	3,947	4,158	1,100	25,50	26,20	271,27		471
472		34,741	25,831	19,451	15,680	3,957	4,168	1,105	25,57	26,25	271,61		472
473		34,822	25,886	19,494	15,718	3,967	4,179	1,109	25,63	26,31	271,94		473
474		34,902	25,942	19,537	15,756	3,977	4,190	1,114	25,70	26,37	272,28		474
475		34,983	25,998	19,579	15,794	3,987	4,201	1,119	25,76	26,42	272,61		475
476		35,064	26,053	19,622	15,832	3,997	4,211	1,124	25,83	26,48	272,95		476
477		35,145	26,109	19,664	15,870	4,006	4,222	1,129	25,89	26,54	273,29		477
478		35,226	26,165	19,707	15,908	4,016	4,233	1,133	25,95	26,60	273,62		478
479		35,307	26,220	19,750	15,946	4,026	4,244	1,138	26,02	26,65	273,96		479
480		35,387	26,276	19,792	15,984	4,036	4,255	1,143	26,09	26,71	274,29		480

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
481		35,468	26,332	19,835	16,022	4,046	4,265	1,148	26,16	26,77	274,63		481
482		35,549	26,387	19,877	16,060	4,056	4,276	1,153	26,22	26,82	274,96		482
483		35,630	26,443	19,920	16,099	4,065	4,287	1,158	26,29	26,88	275,30		483
484		35,711	26,499	19,962	16,137	4,075	4,298	1,163	26,35	26,94	275,63		484
485		35,792	26,555	20,005	16,175	4,085	4,309	1,167	26,42	26,99	275,97		485
486		35,873	26,610	20,048	16,213	4,095	4,319	1,172	26,49	27,05	276,30		486
487		35,954	26,666	20,090	16,251	4,105	4,330	1,177	26,55	27,11	276,64		487
488		36,034	26,722	20,133	16,289	4,115	4,341	1,182	26,62	27,17	276,97		488
489		36,115	26,778	20,175	16,327	4,125	4,352	1,187	26,68	27,22	277,31		489
490		36,196	26,834	20,218	16,366	4,134	4,363	1,192	26,75	27,28	277,64		490
491		36,277	26,889	20,261	16,404	4,144	4,373	1,197	26,82	27,34	277,98		491
492		36,358	26,945	20,303	16,442	4,154	4,384	1,202	26,88	27,39	278,31		492
493		36,439	27,001	20,346	16,480	4,164	4,395	1,207	26,95	27,45	278,64		493
494		36,520	27,057	20,389	16,518	4,174	4,406	1,212	27,01	27,51	278,98		494
495		36,601	27,113	20,431	16,557	4,184	4,417	1,217	27,08	27,56	279,31		495
496		36,682	27,169	20,474	16,595	4,194	4,428	1,222	27,15	27,62	279,64		496
497		36,763	27,225	20,516	16,633	4,204	4,439	1,227	27,21	27,68	279,98		497
498		36,843	27,281	20,559	16,671	4,213	4,449	1,232	27,28	27,74	280,31		498
499		36,924	27,337	20,602	16,710	4,223	4,460	1,237	27,34	27,79	280,64		499
500		37,005	27,393	20,644	16,748	4,233	4,471	1,242	27,41	27,85	280,98		500
501		37,086	27,449	20,687	16,786	4,243	4,482	1,247	27,48	27,91	281,31		501
502		37,167	27,505	20,730	16,824	4,253	4,493	1,252	27,54	27,97	281,64		502
503		37,248	27,561	20,772	16,863	4,263	4,504	1,257	27,61	28,02	281,98		503
504		37,329	27,617	20,815	16,901	4,273	4,515	1,262	27,68	28,08	282,31		504
505		37,410	27,673	20,857	16,939	4,283	4,526	1,267	27,74	28,14	282,64		505
506		37,491	27,729	20,900	16,978	4,293	4,537	1,272	27,81	28,20	282,97		506
507		37,572	27,785	20,943	17,016	4,303	4,548	1,277	27,88	28,26	283,31		507
508		37,653	27,841	20,985	17,054	4,313	4,558	1,282	27,95	28,31	283,64		508
509		37,734	27,897	21,028	17,093	4,323	4,569	1,288	28,01	28,37	283,97		509
510		37,815	27,953	21,071	17,131	4,332	4,580	1,293	28,08	28,43	284,30		510
511		37,896	28,010	21,113	17,169	4,342	4,591	1,298	28,15	28,49	284,63		511
512		37,977	28,066	21,156	17,208	4,352	4,602	1,303	28,21	28,55	284,97		512
513		38,058	28,122	21,199	17,246	4,362	4,613	1,308	28,28	28,60	285,30		513
514		38,139	28,178	21,241	17,285	4,372	4,624	1,313	28,35	28,66	285,63		514
515		38,220	28,234	21,284	17,323	4,382	4,635	1,318	28,41	28,72	285,96		515
516		38,300	28,291	21,326	17,361	4,392	4,646	1,324	28,48	28,78	286,29		516
517		38,381	28,347	21,369	17,400	4,402	4,657	1,329	28,55	28,84	286,62		517
518		38,462	28,403	21,412	17,438	4,412	4,668	1,334	28,62	28,89	286,95		518
519		38,543	28,460	21,454	17,477	4,422	4,679	1,339	28,68	28,95	287,29		519
520		38,624	28,516	21,497	17,515	4,432	4,690	1,344	28,75	29,01	287,62		520
521		38,705	28,572	21,540	17,554	4,442	4,701	1,350	28,82	29,07	287,95		521
522		38,786	28,629	21,582	17,592	4,452	4,712	1,355	28,89	29,13	288,28		522
523		38,867	28,685	21,625	17,630	4,462	4,723	1,360	28,95	29,18	288,61		523
524		38,948	28,741	21,668	17,669	4,472	4,734	1,365	29,02	29,24	288,94		524
525		39,029	28,798	21,710	17,707	4,482	4,745	1,371	29,09	29,30	289,27		525
526		39,110	28,854	21,753	17,746	4,492	4,756	1,376	29,16	29,36	289,60		526
527		39,191	28,911	21,796	17,784	4,502	4,767	1,381	29,23	29,42	289,93		527
528		39,272	28,967	21,838	17,823	4,512	4,778	1,387	29,29	29,47	290,26		528
529		39,353	29,024	21,881	17,861	4,522	4,789	1,392	29,36	29,53	290,59		529
530		39,434	29,080	21,924	17,900	4,532	4,800	1,397	29,43	29,59	290,92		530

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
531		39,515	29,137	21,966	17,938	4,542	4,811	1,402	29,50	29,65	291,25		531
532		39,596	29,194	22,009	17,977	4,552	4,822	1,408	29,57	29,71	291,58		532
533		39,677	29,250	22,052	18,016	4,562	4,833	1,413	29,63	29,76	291,91		533
534		39,758	29,307	22,094	18,054	4,572	4,844	1,418	29,70	29,82	292,24		534
535		39,839	29,363	22,137	18,093	4,582	4,855	1,424	29,77	29,88	292,56		535
536		39,920	29,420	22,179	18,131	4,592	4,866	1,429	29,84	29,94	292,89		536
537		40,001	29,477	22,222	18,170	4,602	4,877	1,435	29,91	30,00	293,22		537
538		40,082	29,534	22,265	18,208	4,612	4,888	1,440	29,97	30,05	293,55		538
539		40,163	29,590	22,307	18,247	4,622	4,899	1,445	30,04	30,11	293,88		539
540		40,243	29,647	22,350	18,286	4,632	4,910	1,451	30,11	30,17	294,21		540
541		40,324	29,704	22,393	18,324	4,642	4,922	1,456	30,18	30,23	294,54		541
542		40,405	29,761	22,435	18,363	4,652	4,933	1,462	30,25	30,29	294,86		542
543		40,486	29,818	22,478	18,401	4,662	4,944	1,467	30,32	30,34	295,19		543
544		40,567	29,874	22,521	18,440	4,672	4,955	1,472	30,39	30,40	295,52		544
545		40,648	29,931	22,563	18,479	4,682	4,966	1,478	30,45	30,46	295,85		545
546		40,729	29,988	22,606	18,517	4,692	4,977	1,483	30,52	30,52	296,18		546
547		40,810	30,045	22,649	18,556	4,702	4,988	1,489	30,59	30,58	296,50		547
548		40,891	30,102	22,691	18,595	4,712	4,999	1,494	30,66	30,63	296,83		548
549		40,972	30,159	22,734	18,633	4,722	5,010	1,500	30,73	30,69	297,16		549
550		41,053	30,216	22,776	18,672	4,732	5,021	1,505	30,80	30,75	297,49		550
551		41,134	30,273	22,819	18,711	4,742	5,033	1,511	30,87	30,81	297,81		551
552		41,215	30,330	22,862	18,749	4,752	5,044	1,516	30,94	30,87	298,14		552
553		41,296	30,387	22,904	18,788	4,762	5,055	1,522	31,01	30,92	298,47		553
554		41,377	30,444	22,947	18,827	4,772	5,066	1,527	31,08	30,98	298,80		554
555		41,457	30,502	22,990	18,865	4,782	5,077	1,533	31,14	31,04	299,12		555
556		41,538	30,559	23,032	18,904	4,793	5,088	1,539	31,21	31,10	299,45		556
557		41,619	30,616	23,075	18,943	4,803	5,099	1,544	31,28	31,16	299,78		557
558		41,700	30,673	23,117	18,982	4,813	5,111	1,550	31,35	31,21	300,10		558
559		41,781	30,730	23,160	19,020	4,823	5,122	1,555	31,42	31,27	300,43		559
560		41,862	30,788	23,203	19,059	4,833	5,133	1,561	31,49	31,33	300,75		560
561		41,943	30,845	23,245	19,098	4,843	5,144	1,566	31,56	31,39	301,08		561
562		42,024	30,902	23,288	19,136	4,853	5,155	1,572	31,63	31,45	301,41		562
563		42,105	30,960	23,331	19,175	4,863	5,166	1,578	31,70	31,50	301,73		563
564		42,185	31,017	23,373	19,214	4,873	5,178	1,583	31,77	31,56	302,06		564
565		42,266	31,074	23,416	19,253	4,883	5,189	1,589	31,84	31,62	302,38		565
566		42,347	31,132	23,458	19,292	4,893	5,200	1,595	31,91	31,68	302,71		566
567		42,428	31,189	23,501	19,330	4,904	5,211	1,600	31,98	31,74	303,03		567
568		42,509	31,247	23,544	19,369	4,914	5,222	1,606	32,05	31,79	303,36		568
569		42,590	31,304	23,586	19,408	4,924	5,234	1,612	32,12	31,85	303,69		569
570		42,671	31,362	23,629	19,447	4,934	5,245	1,617	32,19	31,91	304,01		570
571		42,751	31,419	23,671	19,485	4,944	5,256	1,623	32,26	31,97	304,34		571
572		42,832	31,477	23,714	19,524	4,954	5,267	1,629	32,33	32,03	304,66		572
573		42,913	31,535	23,757	19,563	4,964	5,279	1,634	32,40	32,08	304,98		573
574		42,994	31,592	23,799	19,602	4,974	5,290	1,640	32,47	32,14	305,31		574
575		43,075	31,650	23,842	19,641	4,984	5,301	1,646	32,54	32,20	305,63		575
576		43,156	31,708	23,884	19,680	4,995	5,312	1,652	32,61	32,26	305,96		576
577		43,236	31,766	23,927	19,718	5,005	5,323	1,657	32,68	32,32	306,28		577
578		43,317	31,823	23,970	19,757	5,015	5,335	1,663	32,75	32,37	306,61		578
579		43,398	31,881	24,012	19,796	5,025	5,346	1,669	32,82	32,43	306,93		579
580		43,479	31,939	24,055	19,835	5,035	5,357	1,675	32,89	32,49	307,25		580

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
581		43,560	31,997	24,097	19,874	5,045	5,369	1,680	32,96	32,55	307,58		581
582		43,640	32,055	24,140	19,913	5,055	5,380	1,686	33,03	32,61	307,90		582
583		43,721	32,113	24,182	19,952	5,066	5,391	1,692	33,10	32,66	308,23		583
584		43,802	32,171	24,225	19,990	5,076	5,402	1,698	33,17	32,72	308,55		584
585		43,883	32,229	24,267	20,029	5,086	5,414	1,704	33,24	32,78	308,87		585
586		43,963	32,287	24,310	20,068	5,096	5,425	1,709	33,32	32,84	309,20		586
587		44,044	32,345	24,353	20,107	5,106	5,436	1,715	33,39	32,90	309,52		587
588		44,125	32,403	24,395	20,146	5,116	5,448	1,721	33,46	32,96	309,84		588
589		44,206	32,461	24,438	20,185	5,127	5,459	1,727	33,53	33,02	310,16		589
590		44,286	32,519	24,480	20,224	5,137	5,470	1,733	33,60	33,08	310,49		590
591		44,367	32,577	24,523	20,263	5,147	5,481	1,739	33,67	33,14	310,81		591
592		44,448	32,636	24,565	20,302	5,157	5,493	1,745	33,74	33,20	311,13		592
593		44,529	32,694	24,608	20,341	5,167	5,504	1,750	33,81	33,26	311,45		593
594		44,609	32,752	24,650	20,379	5,177	5,515	1,756	33,88	33,32	311,78		594
595		44,690	32,810	24,693	20,418	5,188	5,527	1,762	33,95	33,38	312,10		595
596		44,771	32,869	24,735	20,457	5,198	5,538	1,768	34,03	33,43	312,42		596
597		44,851	32,927	24,778	20,496	5,208	5,549	1,774	34,10	33,49	312,74		597
598		44,932	32,985	24,820	20,535	5,218	5,561	1,780	34,17	33,55	313,06		598
599		45,013	33,044	24,863	20,574	5,228	5,572	1,786	34,24	33,61	313,39		599
600		45,093	33,102	24,905	20,613	5,239	5,583	1,792	34,31	33,67	313,71		600
601		45,174	33,161	24,948	20,652	5,249	5,595	1,798		33,73	314,03		601
602		45,255	33,219	24,990	20,691	5,259	5,606	1,804		33,79	314,35		602
603		45,335	33,278	25,033	20,730	5,269	5,618	1,810		33,85	314,67		603
604		45,416	33,337	25,075	20,769	5,280	5,629	1,816		33,91	314,99		604
605		45,497	33,395	25,118	20,808	5,290	5,640	1,822		33,97	315,31		605
606		45,577	33,454	25,160	20,847	5,300	5,652	1,828		34,02	315,64		606
607		45,658	33,513	25,203	20,886	5,310	5,663	1,834		34,08	315,96		607
608		45,738	33,571	25,245	20,925	5,320	5,674	1,840		34,14	316,28		608
609		45,819	33,630	25,288	20,964	5,331	5,686	1,846		34,20	316,60		609
610		45,900	33,689	25,330	21,003	5,341	5,697	1,852		34,26	316,92		610
611		45,980	33,748	25,373	21,042	5,351	5,709	1,858		34,32	317,24		611
612		46,061	33,807	25,415	21,081	5,361	5,720	1,864		34,38	317,56		612
613		46,141	33,866	25,458	21,120	5,372	5,731	1,870		34,44	317,88		613
614		46,222	33,925	25,500	21,159	5,382	5,743	1,876		34,50	318,20		614
615		46,302	33,984	25,543	21,198	5,392	5,754	1,882		34,56	318,52		615
616		46,383	34,043	25,585	21,237	5,402	5,766	1,888		34,61	318,84		616
617		46,463	34,102	25,627	21,276	5,413	5,777	1,894		34,67	319,16		617
618		46,544	34,161	25,670	21,315	5,423	5,789	1,901		34,73	319,48		618
619		46,624	34,220	25,712	21,354	5,433	5,800	1,907		34,79	319,80		619
620		46,705	34,279	25,755	21,393	5,443	5,812	1,913		34,85	320,12		620
621		46,785	34,338	25,797	21,432	5,454	5,823	1,919		34,91	320,43		621
622		46,866	34,397	25,840	21,471	5,464	5,834	1,925		34,97	320,75		622
623		46,946	34,457	25,882	21,510	5,474	5,846	1,931		35,03	321,07		623
624		47,027	34,516	25,924	21,549	5,485	5,857	1,937		35,09	321,39		624
625		47,107	34,575	25,967	21,588	5,495	5,869	1,944		35,15	321,71		625
626		47,188	34,635	26,009	21,628	5,505	5,880	1,950		35,20	322,03		626
627		47,268	34,694	26,052	21,667	5,515	5,892	1,956		35,26	322,35		627
628		47,349	34,754	26,094	21,706	5,526	5,903	1,962		35,32	322,67		628
629		47,429	34,813	26,136	21,745	5,536	5,915	1,968		35,38	322,98		629
630		47,509	34,873	26,179	21,784	5,546	5,926	1,975		35,44	323,30		630

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
631		47,590	34,932	26,221	21,823	5,557	5,938	1,981		35,50	323,62		631
632		47,670	34,992	26,263	21,862	5,567	5,949	1,987		35,56	323,94		632
633		47,751	35,051	26,306	21,901	5,577	5,961	1,993		35,62	324,26		633
634		47,831	35,111	26,348	21,940	5,588	5,972	1,999		35,68	324,57		634
635		47,911	35,171	26,390	21,979	5,598	5,984	2,006		35,74	324,89		635
636		47,992	35,230	26,433	22,018	5,608	5,995	2,012		35,80	325,21		636
637		48,072	35,290	26,475	22,058	5,618	6,007	2,018		35,86	325,53		637
638		48,152	35,350	26,517	22,097	5,629	6,018	2,025		35,92	325,84		638
639		48,233	35,410	26,560	22,136	5,639	6,030	2,031		35,98	326,16		639
640		48,313	35,470	26,602	22,175	5,649	6,041	2,037		36,04	326,48		640
641		48,393	35,530	26,644	22,214	5,660	6,053	2,043		36,10	326,79		641
642		48,474	35,590	26,687	22,253	5,670	6,065	2,050		36,16	327,11		642
643		48,554	35,650	26,729	22,292	5,680	6,076	2,056		36,22	327,43		643
644		48,634	35,710	26,771	22,331	5,691	6,088	2,062		36,28	327,74		644
645		48,715	35,770	26,814	22,370	5,701	6,099	2,069		36,34	328,06		645
646		48,795	35,830	26,856	22,410	5,712	6,111	2,075		36,40	328,38		646
647		48,875	35,890	26,898	22,449	5,722	6,122	2,082		36,46	328,69		647
648		48,955	35,950	26,940	22,488	5,732	6,134	2,088		36,52	329,01		648
649		49,035	36,010	26,983	22,527	5,743	6,146	2,094		36,58	329,32		649
650		49,116	36,071	27,025	22,566	5,753	6,157	2,101		36,64	329,64		650
651		49,196	36,131	27,067	22,605	5,763	6,169	2,107		36,70	329,96		651
652		49,276	36,191	27,109	22,644	5,774	6,180	2,113		36,76	330,27		652
653		49,356	36,252	27,152	22,684	5,784	6,192	2,120		36,82	330,59		653
654		49,436	36,312	27,194	22,723	5,794	6,204	2,126		36,88	330,90		654
655		49,517	36,373	27,236	22,762	5,805	6,215	2,133		36,95	331,22		655
656		49,597	36,433	27,278	22,801	5,815	6,227	2,139		37,01	331,53		656
657		49,677	36,494	27,320	22,840	5,826	6,238	2,146		37,07	331,85		657
658		49,757	36,554	27,363	22,879	5,836	6,250	2,152		37,13	332,16		658
659		49,837	36,615	27,405	22,919	5,846	6,262	2,158		37,19	332,48		659
660		49,917	36,675	27,447	22,958	5,857	6,273	2,165		37,25	332,79		660
661		49,997	36,736	27,489	22,997	5,867	6,285	2,171		37,30	333,11		661
662		50,077	36,797	27,531	23,036	5,878	6,297	2,178		37,36	333,42		662
663		50,157	36,858	27,574	23,075	5,888	6,308	2,184		37,42	333,74		663
664		50,238	36,918	27,616	23,115	5,898	6,320	2,191		37,48	334,05		664
665		50,318	36,979	27,658	23,154	5,909	6,332	2,197		37,55	334,36		665
666		50,398	37,040	27,700	23,193	5,919	6,343	2,204		37,61	334,68		666
667		50,478	37,101	27,742	23,232	5,930	6,355	2,210		37,67	334,99		667
668		50,558	37,162	27,784	23,271	5,940	6,367	2,217		37,73	335,31		668
669		50,638	37,223	27,826	23,311	5,950	6,378	2,224		37,79	335,62		669
670		50,718	37,284	27,869	23,350	5,961	6,390	2,230		37,85	335,93		670
671		50,798	37,345	27,911	23,389	5,971	6,402	2,237		37,91	336,25		671
672		50,878	37,406	27,953	23,428	5,982	6,413	2,243		37,97	336,56		672
673		50,958	37,467	27,995	23,467	5,992	6,425	2,250		38,04	336,87		673
674		51,038	37,528	28,037	23,507	6,003	6,437	2,256		38,10	337,18		674
675		51,118	37,590	28,079	23,546	6,013	6,448	2,263		38,16	337,50		675
676		51,197	37,651	28,121	23,585	6,024	6,460	2,270		38,22	337,81		676
677		51,277	37,712	28,163	23,624	6,034	6,472	2,276		38,28	338,12		677
678		51,357	37,773	28,205	23,663	6,044	6,484	2,283		38,35	338,44		678
679		51,437	37,835	28,247	23,703	6,055	6,495	2,289		38,41	338,75		679
680		51,517	37,896	28,289	23,742	6,065	6,507	2,296		38,47	339,06		680

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
681		51,597	37,958	28,332	23,781	6,076	6,519	2,303		38,53	339,37		681
682		51,677	38,019	28,374	23,820	6,086	6,531	2,309		38,59	339,69		682
683		51,757	38,081	28,416	23,860	6,097	6,542	2,316		38,66	340,00		683
684		51,837	38,142	28,458	23,899	6,107	6,554	2,323		38,72	340,31		684
685		51,916	38,204	28,500	23,938	6,118	6,566	2,329		38,78	340,62		685
686		51,996	38,265	28,542	23,977	6,128	6,578	2,336		38,84	340,93		686
687		52,076	38,327	28,584	24,016	6,139	6,589	2,343		38,90	341,24		687
688		52,156	38,389	28,626	24,056	6,149	6,601	2,350		38,97	341,56		688
689		52,236	38,450	28,668	24,095	6,160	6,613	2,356		39,03	341,87		689
690		52,315	38,512	28,710	24,134	6,170	6,625	2,363		39,09	342,18		690
691		52,395	38,574	28,752	24,173	6,181	6,636	2,370		39,15	342,49		691
692		52,475	38,636	28,794	24,213	6,191	6,648	2,376		39,22	342,80		692
693		52,555	38,698	28,835	24,252	6,202	6,660	2,383		39,28	343,11		693
694		52,634	38,760	28,877	24,291	6,212	6,672	2,390		39,34	343,42		694
695		52,714	38,822	28,919	24,330	6,223	6,684	2,397		39,41	343,73		695
696		52,794	38,884	28,961	24,370	6,233	6,695	2,403		39,47	344,04		696
697		52,873	38,946	29,003	24,409	6,244	6,707	2,410		39,53	344,35		697
698		52,953	39,008	29,045	24,448	6,254	6,719	2,417		39,59	344,66		698
699		53,033	39,070	29,087	24,487	6,265	6,731	2,424		39,66	344,97		699
700		53,112	39,132	29,129	24,527	6,275	6,743	2,431		39,72	345,28		700
701		53,192	39,194	29,171	24,566	6,286	6,755	2,437		39,78	345,59		701
702		53,272	39,256	29,213	24,605	6,296	6,766	2,444		39,85	345,90		702
703		53,351	39,318	29,255	24,644	6,307	6,778	2,451		39,91	346,21		703
704		53,431	39,381	29,297	24,684	6,317	6,790	2,458		39,97	346,52		704
705		53,510	39,443	29,338	24,723	6,328	6,802	2,465		40,04	346,83		705
706		53,590	39,505	29,380	24,762	6,338	6,814	2,472		40,10	347,14		706
707		53,670	39,568	29,422	24,801	6,349	6,826	2,479		40,16	347,45		707
708		53,749	39,630	29,464	24,841	6,360	6,838	2,485		40,22	347,76		708
709		53,829	39,693	29,506	24,880	6,370	6,849	2,492		40,29	348,07		709
710		53,908	39,755	29,548	24,919	6,381	6,861	2,499		40,35	348,38		710
711		53,988	39,818	29,589	24,959	6,391	6,873	2,506		40,41	348,69		711
712		54,067	39,880	29,631	24,998	6,402	6,885	2,513		40,48	348,99		712
713		54,147	39,943	29,673	25,037	6,412	6,897	2,520		40,54	349,30		713
714		54,226	40,005	29,715	25,076	6,423	6,909	2,527		40,60	349,61		714
715		54,306	40,068	29,757	25,116	6,434	6,921	2,534		40,67	349,92		715
716		54,385	40,131	29,798	25,155	6,444	6,933	2,541		40,73	350,23		716
717		54,465	40,193	29,840	25,194	6,455	6,945	2,548		40,80	350,54		717
718		54,544	40,256	29,882	25,233	6,465	6,956	2,555		40,86	350,84		718
719		54,624	40,319	29,924	25,273	6,476	6,968	2,562		40,93	351,15		719
720		54,703	40,382	29,965	25,312	6,486	6,980	2,569		40,98	351,46		720
721		54,782	40,445	30,007	25,351	6,497	6,992	2,576		41,04	351,77		721
722		54,862	40,508	30,049	25,391	6,508	7,004	2,583		41,11	352,08		722
723		54,941	40,570	30,090	25,430	6,518	7,016	2,590		41,17	352,38		723
724		55,021	40,633	30,132	25,469	6,529	7,028	2,597		41,23	352,69		724
725		55,100	40,696	30,174	25,508	6,539	7,040	2,604		41,30	353,00		725
726		55,179	40,759	30,216	25,548	6,550	7,052	2,611		41,36	353,30		726
727		55,259	40,822	30,257	25,587	6,561	7,064	2,618		41,43	353,61		727
728		55,338	40,886	30,299	25,626	6,571	7,076	2,625		41,49	353,92		728
729		55,417	40,949	30,341	25,666	6,582	7,088	2,632		41,56	354,22		729
730		55,497	41,012	30,382	25,705	6,593	7,100	2,639		41,62	354,53		730

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
731		55,576	41,075	30,424	25,744	6,603	7,112	2,646		41,69	354,84		731
732		55,655	41,138	30,466	25,783	6,614	7,124	2,653		41,75	355,14		732
733		55,734	41,201	30,507	25,823	6,624	7,136	2,660		41,82	355,45		733
734		55,814	41,265	30,549	25,862	6,635	7,148	2,667		41,88	355,76		734
735		55,893	41,328	30,590	25,901	6,646	7,160	2,674		41,95	356,06		735
736		55,972	41,391	30,632	25,941	6,656	7,172	2,681		42,01	356,37		736
737		56,051	41,455	30,674	25,980	6,667	7,184	2,688		42,08	356,67		737
738		56,131	41,518	30,715	26,019	6,678	7,196	2,696		42,14	356,98		738
739		56,210	41,581	30,757	26,058	6,688	7,208	2,703		42,21	357,28		739
740		56,289	41,645	30,798	26,098	6,699	7,220	2,710		42,27	357,59		740
741		56,368	41,708	30,840	26,137	6,710	7,232	2,717		42,34	357,90		741
742		56,447	41,772	30,881	26,176	6,720	7,244	2,724		42,40	358,20		742
743		56,526	41,835	30,923	26,216	6,731	7,256	2,731		42,47	358,51		743
744		56,606	41,899	30,964	26,255	6,742	7,268	2,738		42,53	358,81		744
745		56,685	41,962	31,006	26,294	6,752	7,280	2,746		42,60	359,12		745
746		56,764	42,026	31,047	26,333	6,763	7,292	2,753		42,66	359,42		746
747		56,843	42,089	31,089	26,373	6,774	7,304	2,760		42,73	359,72		747
748		56,922	42,153	31,130	26,412	6,784	7,316	2,767		42,79	360,03		748
749		57,001	42,217	31,172	26,451	6,795	7,328	2,775		42,86	360,33		749
750		57,080	42,281	31,213	26,491	6,806	7,340	2,782		42,92	360,64		750
751		57,159	42,344	31,255	26,530	6,817	7,352	2,789		42,99	360,94		751
752		57,238	42,408	31,296	26,569	6,827	7,364	2,796		43,05	361,25		752
753		57,317	42,472	31,338	26,608	6,838	7,376	2,803		43,12	361,55		753
754		57,396	42,536	31,379	26,648	6,849	7,389	2,811		43,18	361,85		754
755		57,475	42,599	31,421	26,687	6,859	7,401	2,818		43,25	362,16		755
756		57,554	42,663	31,462	26,726	6,870	7,413	2,825		43,31	362,46		756
757		57,633	42,727	31,504	26,766	6,881	7,425	2,833		43,38	362,76		757
758		57,712	42,791	31,545	26,805	6,892	7,437	2,840		43,44	363,07		758
759		57,791	42,855	31,586	26,844	6,902	7,449	2,847		43,51	363,37		759
760		57,870	42,919	31,628	26,883	6,913	7,461	2,854		43,57	363,67		760
761		57,949	42,983	31,669	26,923	6,924	7,473	2,862		43,64	363,98		761
762		58,028	43,047	31,710	26,962	6,934	7,485	2,869		43,70	364,28		762
763		58,107	43,111	31,752	27,001	6,945	7,498	2,876		43,77	364,58		763
764		58,186	43,175	31,793	27,041	6,956	7,510	2,884		43,83	364,89		764
765		58,265	43,239	31,834	27,080	6,967	7,522	2,891		43,90	365,19		765
766		58,343	43,303	31,876	27,119	6,977	7,534	2,898		43,97	365,49		766
767		58,422	43,367	31,917	27,158	6,988	7,546	2,906		44,03	365,79		767
768		58,501	43,431	31,958	27,198	6,999	7,558	2,913		44,10	366,10		768
769		58,580	43,495	32,000	27,237	7,010	7,570	2,921		44,16	366,40		769
770		58,659	43,559	32,041	27,276	7,020	7,583	2,928		44,23	366,70		770
771		58,738	43,624	32,082	27,316	7,031	7,595	2,935		44,30	367,00		771
772		58,816	43,688	32,124	27,355	7,042	7,607	2,943		44,36	367,30		772
773		58,895	43,752	32,165	27,394	7,053	7,619	2,950		44,43	367,60		773
774		58,974	43,817	32,206	27,433	7,064	7,631	2,958		44,49	367,91		774
775		59,053	43,881	32,247	27,473	7,074	7,644	2,965		44,56	368,21		775
776		59,131	43,945	32,289	27,512	7,085	7,656	2,973		44,63	368,51		776
777		59,210	44,010	32,330	27,551	7,096	7,668	2,980		44,69	368,81		777
778		59,289	44,074	32,371	27,591	7,107	7,680	2,987		44,76	369,11		778
779		59,367	44,139	32,412	27,630	7,117	7,692	2,995		44,82	369,41		779
780		59,446	44,203	32,453	27,669	7,128	7,705	3,002		44,89	369,71		780

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
781		59,525	44,267	32,495	27,708	7,139	7,717	3,010		44,96	370,01		781
782		59,604	44,332	32,536	27,748	7,150	7,729	3,017		45,02	370,31		782
783		59,682	44,396	32,577	27,787	7,161	7,741	3,025		45,09	370,61		783
784		59,761	44,461	32,618	27,826	7,171	7,753	3,032		45,15	370,91		784
785		59,839	44,525	32,659	27,866	7,182	7,766	3,040		45,22	371,21		785
786		59,918	44,590	32,700	27,905	7,193	7,778	3,047		45,29	371,51		786
787		59,997	44,655	32,742	27,944	7,204	7,790	3,055		45,35	371,81		787
788		60,075	44,719	32,783	27,983	7,215	7,802	3,062		45,42	372,11		788
789		60,154	44,784	32,824	28,023	7,226	7,815	3,070		45,48	372,41		789
790		60,232	44,848	32,865	28,062	7,236	7,827	3,078		45,55	372,71		790
791		60,311	44,913	32,906	28,101	7,247	7,839	3,085		45,62	373,01		791
792		60,390	44,977	32,947	28,140	7,258	7,852	3,093		45,68	373,31		792
793		60,468	45,042	32,988	28,180	7,269	7,864	3,100		45,75	373,61		793
794		60,547	45,107	33,029	28,219	7,280	7,876	3,108		45,82	373,91		794
795		60,625	45,171	33,070	28,258	7,291	7,888	3,116		45,89	374,21		795
796		60,704	45,236	33,111	28,297	7,302	7,901	3,123		45,95	374,51		796
797		60,782	45,301	33,152	28,337	7,312	7,913	3,131		46,02	374,81		797
798		60,860	45,365	33,193	28,376	7,323	7,925	3,138		46,09	375,11		798
799		60,939	45,430	33,234	28,415	7,334	7,938	3,146		46,15	375,41		799
800		61,017	45,494	33,275	28,455	7,345	7,950	3,154		46,22	375,70		800
801		61,096	45,559	33,316	28,494	7,356	7,962	3,161		46,29	376,00		801
802		61,174	45,624	33,357	28,533	7,367	7,974	3,169		46,35	376,30		802
803		61,253	45,688	33,398	28,572	7,378	7,987	3,177		46,42	376,60		803
804		61,331	45,753	33,439	28,612	7,388	7,999	3,184		46,49	376,90		804
805		61,409	45,818	33,480	28,651	7,399	8,011	3,192		46,56	377,19		805
806		61,488	45,882	33,521	28,690	7,410	8,024	3,200		46,62	377,49		806
807		61,566	45,947	33,562	28,729	7,421	8,036	3,207		46,69	377,79		807
808		61,644	46,011	33,603	28,769	7,432	8,048	3,215		46,76	378,09		808
809		61,723	46,076	33,644	28,808	7,443	8,061	3,223		46,82	378,39		809
810		61,801	46,141	33,685	28,847	7,454	8,073	3,230		46,89	378,68		810
811		61,879	46,205	33,726	28,886	7,465	8,086	3,238		46,96	378,98		811
812		61,958	46,270	33,767	28,926	7,476	8,098	3,246		47,03	379,28		812
813		62,036	46,334	33,808	28,965	7,487	8,110	3,254		47,09	379,57		813
814		62,114	46,399	33,848	29,004	7,497	8,123	3,261		47,16	379,87		814
815		62,192	46,464	33,889	29,043	7,508	8,135	3,269		47,23	380,17		815
816		62,271	46,528	33,930	29,083	7,519	8,147	3,277		47,30	380,46		816
817		62,349	46,593	33,971	29,122	7,530	8,160	3,285		47,37	380,76		817
818		62,427	46,657	34,012	29,161	7,541	8,172	3,292		47,43	381,06		818
819		62,505	46,722	34,053	29,200	7,552	8,185	3,300		47,50	381,35		819
820		62,583	46,786	34,093	29,239	7,563	8,197	3,308		47,57	381,65		820
821		62,662	46,851	34,134	29,279	7,574	8,209	3,316		47,64	381,95		821
822		62,740	46,915	34,175	29,318	7,585	8,222	3,324		47,71	382,24		822
823		62,818	46,980	34,216	29,357	7,596	8,234	3,331		47,77	382,54		823
824		62,896	47,044	34,257	29,396	7,607	8,247	3,339		47,84	382,83		824
825		62,974	47,109	34,297	29,436	7,618	8,259	3,347		47,91	383,13		825
826		63,052	47,173	34,338	29,475	7,629	8,272	3,355		47,98	383,42		826
827		63,130	47,238	34,379	29,514	7,640	8,284	3,363		48,05	383,72		827
828		63,208	47,302	34,420	29,553	7,651	8,296	3,371		48,11	384,01		828
829		63,286	47,367	34,460	29,592	7,662	8,309	3,379		48,18	384,31		829
830		63,364	47,431	34,501	29,632	7,673	8,321	3,386		48,25	384,60		830

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
831		63,442	47,495	34,542	29,671	7,684	8,334	3,394		48,32	384,90		831
832		63,520	47,560	34,582	29,710	7,695	8,346	3,402		48,39	385,19		832
833		63,598	47,624	34,623	29,749	7,706	8,359	3,410		48,46	385,49		833
834		63,676	47,688	34,664	29,789	7,717	8,371	3,418		48,53	385,78		834
835		63,754	47,753	34,704	29,828	7,728	8,384	3,426		48,60	386,08		835
836		63,832	47,817	34,745	29,867	7,739	8,396	3,434		48,66	386,37		836
837		63,910	47,881	34,786	29,906	7,750	8,409	3,442		48,73	386,67		837
838		63,988	47,946	34,826	29,945	7,761	8,421	3,450		48,80	386,96		838
839		64,066	48,010	34,867	29,985	7,772	8,434	3,458		48,87	387,25		839
840		64,144	48,074	34,908	30,024	7,783	8,446	3,466		48,94	387,55		840
841		64,222	48,138	34,948	30,063	7,794	8,459	3,474		49,01	387,84		841
842		64,300	48,202	34,989	30,102	7,805	8,471	3,482		49,08	388,14		842
843		64,377	48,267	35,029	30,141	7,816	8,484	3,490		49,15	388,43		843
844		64,455	48,331	35,070	30,181	7,827	8,496	3,498		49,22	388,72		844
845		64,533	48,395	35,110	30,220	7,838	8,509	3,506		49,29	389,02		845
846		64,611	48,459	35,151	30,259	7,849	8,521	3,514		49,35	389,31		846
847		64,689	48,523	35,192	30,298	7,860	8,534	3,522		49,42	389,60		847
848		64,766	48,587	35,232	30,337	7,871	8,546	3,530		49,49	389,90		848
849		64,844	48,651	35,273	30,376	7,882	8,559	3,538		49,56	390,19		849
850		64,922	48,715	35,313	30,416	7,893	8,571	3,546		49,63	390,48		850
851		65,000	48,779	35,354	30,455	7,904	8,584	3,554		49,70			851
852		65,077	48,843	35,394	30,494	7,915	8,597	3,562		49,77			852
853		65,155	48,907	35,435	30,533	7,926	8,609	3,570		49,84			853
854		65,233	48,971	35,475	30,572	7,937	8,622	3,578		49,91			854
855		65,310	49,034	35,516	30,611	7,948	8,634	3,586		49,98			855
856		65,388	49,098	35,556	30,651	7,959	8,647	3,594		50,04			856
857		65,465	49,162	35,596	30,690	7,970	8,659	3,602		50,11			857
858		65,543	49,226	35,637	30,729	7,981	8,672	3,610		50,18			858
859		65,621	49,290	35,677	30,768	7,992	8,685	3,618		50,25			859
860		65,698	49,353	35,718	30,807	8,003	8,697	3,626		50,32			860
861		65,776	49,417	35,758	30,846	8,014	8,710	3,634		50,39			861
862		65,853	49,481	35,798	30,886	8,026	8,722	3,643		50,46			862
863		65,931	49,544	35,839	30,925	8,037	8,735	3,651		50,53			863
864		66,008	49,608	35,879	30,964	8,048	8,748	3,659		50,60			864
865		66,086	49,672	35,920	31,003	8,059	8,760	3,667		50,67			865
866		66,163	49,735	35,960	31,042	8,070	8,773	3,675		50,74			866
867		66,241	49,799	36,000	31,081	8,081	8,785	3,683		50,81			867
868		66,318	49,862	36,041	31,120	8,092	8,798	3,692		50,88			868
869		66,396	49,926	36,081	31,160	8,103	8,811	3,700		50,95			869
870		66,473	49,989	36,121	31,199	8,114	8,823	3,708		51,02			870
871		66,550	50,052	36,162	31,238	8,125	8,836	3,716		51,09			871
872		66,628	50,116	36,202	31,277	8,137	8,849	3,724		51,16			872
873		66,705	50,179	36,242	31,316	8,148	8,861	3,732		51,23			873
874		66,782	50,243	36,282	31,355	8,159	8,874	3,741		51,30			874
875		66,860	50,306	36,323	31,394	8,170	8,887	3,749		51,37			875
876		66,937	50,369	36,363	31,433	8,181	8,899	3,757		51,44			876
877		67,014	50,432	36,403	31,473	8,192	8,912	3,765		51,51			877
878		67,092	50,495	36,443	31,512	8,203	8,925	3,774		51,58			878
879		67,169	50,559	36,484	31,551	8,214	8,937	3,782		51,65			879
880		67,246	50,622	36,524	31,590	8,226	8,950	3,790		51,72			880

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
881		67,323	50,685	36,564	31,629	8,237	8,963	3,798		51,79			881
882		67,400	50,748	36,604	31,668	8,248	8,975	3,807		51,86			882
883		67,478	50,811	36,644	31,707	8,259	8,988	3,815		51,93			883
884		67,555	50,874	36,685	31,746	8,270	9,001	3,823		52,00			884
885		67,632	50,937	36,725	31,785	8,281	9,014	3,832		52,08			885
886		67,709	51,000	36,765	31,824	8,293	9,026	3,840		52,15			886
887		67,786	51,063	36,805	31,863	8,304	9,039	3,848		52,22			887
888		67,863	51,126	36,845	31,903	8,315	9,052	3,857		52,29			888
889		67,940	51,188	36,885	31,942	8,326	9,065	3,865		52,36			889
890		68,017	51,251	36,925	31,981	8,337	9,077	3,873		52,43			890
891		68,094	51,314	36,965	32,020	8,348	9,090	3,882		52,50			891
892		68,171	51,377	37,006	32,059	8,360	9,103	3,890		52,57			892
893		68,248	51,439	37,046	32,098	8,371	9,115	3,898		52,64			893
894		68,325	51,502	37,086	32,137	8,382	9,128	3,907		52,71			894
895		68,402	51,565	37,126	32,176	8,393	9,141	3,915		52,79			895
896		68,479	51,627	37,166	32,215	8,404	9,154	3,923		52,86			896
897		68,556	51,690	37,206	32,254	8,416	9,167	3,932		52,93			897
898		68,633	51,752	37,246	32,293	8,427	9,179	3,940		53,00			898
899		68,710	51,815	37,286	32,332	8,438	9,192	3,949		53,07			899
900		68,787	51,877	37,326	32,371	8,449	9,205	3,957		53,14			900
901		68,863	51,940	37,366	32,410	8,460	9,218	3,965					901
902		68,940	52,002	37,406	32,449	8,472	9,230	3,974					902
903		69,017	52,064	37,446	32,488	8,483	9,243	3,982					903
904		69,094	52,127	37,486	32,527	8,494	9,256	3,991					904
905		69,171	52,189	37,526	32,566	8,505	9,269	3,999					905
906		69,247	52,251	37,566	32,605	8,517	9,282	4,008					906
907		69,324	52,314	37,606	32,644	8,528	9,294	4,016					907
908		69,401	52,376	37,646	32,683	8,539	9,307	4,024					908
909		69,477	52,438	37,686	32,722	8,550	9,320	4,033					909
910		69,554	52,500	37,725	32,761	8,562	9,333	4,041					910
911		69,631	52,562	37,765	32,800	8,573	9,346	4,050					911
912		69,707	52,624	37,805	32,839	8,584	9,359	4,058					912
913		69,784	52,686	37,845	32,878	8,595	9,371	4,067					913
914		69,860	52,748	37,885	32,917	8,607	9,384	4,075					914
915		69,937	52,810	37,925	32,956	8,618	9,397	4,084					915
916		70,013	52,872	37,965	32,995	8,629	9,410	4,093					916
917		70,090	52,934	38,005	33,034	8,640	9,423	4,101					917
918		70,166	52,996	38,044	33,073	8,652	9,436	4,110					918
919		70,243	53,057	38,084	33,112	8,663	9,449	4,118					919
920		70,319	53,119	38,124	33,151	8,674	9,462	4,127					920
921		70,396	53,181	38,164	33,190	8,685	9,474	4,135					921
922		70,472	53,243	38,204	33,229	8,697	9,487	4,144					922
923		70,548	53,304	38,243	33,268	8,708	9,500	4,152					923
924		70,625	53,366	38,283	33,307	8,719	9,513	4,161					924
925		70,701	53,427	38,323	33,346	8,731	9,526	4,170					925
926		70,777	53,489	38,363	33,385	8,742	9,539	4,178					926
927		70,854	53,550	38,402	33,424	8,753	9,552	4,187					927
928		70,930	53,612	38,442	33,463	8,765	9,565	4,195					928
929		71,006	53,673	38,482	33,502	8,776	9,578	4,204					929
930		71,082	53,735	38,522	33,541	8,787	9,591	4,213					930

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
931		71,159	53,796	38,561	33,580	8,798	9,603	4,221					931
932		71,235	53,857	38,601	33,619	8,810	9,616	4,230					932
933		71,311	53,919	38,641	33,658	8,821	9,629	4,239					933
934		71,387	53,980	38,680	33,697	8,832	9,642	4,247					934
935		71,463	54,041	38,720	33,736	8,844	9,655	4,256					935
936		71,539	54,102	38,760	33,774	8,855	9,668	4,265					936
937		71,615	54,164	38,799	33,813	8,866	9,681	4,273					937
938		71,692	54,225	38,839	33,852	8,878	9,694	4,282					938
939		71,768	54,286	38,878	33,891	8,889	9,707	4,291					939
940		71,844	54,347	38,918	33,930	8,900	9,720	4,299					940
941		71,920	54,408	38,958	33,969	8,912	9,733	4,308					941
942		71,996	54,469	38,997	34,008	8,923	9,746	4,317					942
943		72,072	54,530	39,037	34,047	8,935	9,759	4,326					943
944		72,147	54,591	39,076	34,086	8,946	9,772	4,334					944
945		72,223	54,652	39,116	34,124	8,957	9,785	4,343					945
946		72,299	54,713	39,155	34,163	8,969	9,798	4,352					946
947		72,375	54,773	39,195	34,202	8,980	9,811	4,360					947
948		72,451	54,834	39,235	34,241	8,991	9,824	4,369					948
949		72,527	54,895	39,274	34,280	9,003	9,837	4,378					949
950		72,603	54,956	39,314	34,319	9,014	9,850	4,387					950
951		72,678	55,016	39,353	34,358	9,025	9,863	4,396					951
952		72,754	55,077	39,393	34,396	9,037	9,876	4,404					952
953		72,830	55,138	39,432	34,435	9,048	9,889	4,413					953
954		72,906	55,198	39,471	34,474	9,060	9,902	4,422					954
955		72,981	55,259	39,511	34,513	9,071	9,915	4,431					955
956		73,057	55,319	39,550	34,552	9,082	9,928	4,440					956
957		73,133	55,380	39,590	34,591	9,094	9,941	4,448					957
958		73,208	55,440	39,629	34,629	9,105	9,954	4,457					958
959		73,284	55,501	39,669	34,668	9,117	9,967	4,466					959
960		73,360	55,561	39,708	34,707	9,128	9,980	4,475					960
961		73,435	55,622	39,747	34,746	9,139	9,993	4,484					961
962		73,511	55,682	39,787	34,785	9,151	10,006	4,493					962
963		73,586	55,742	39,826	34,823	9,162	10,019	4,501					963
964		73,662	55,803	39,866	34,862	9,174	10,032	4,510					964
965		73,738	55,863	39,905	34,901	9,185	10,046	4,519					965
966		73,813	55,923	39,944	34,940	9,197	10,059	4,528					966
967		73,889	55,983	39,984	34,979	9,208	10,072	4,537					967
968		73,964	56,043	40,023	35,017	9,219	10,085	4,546					968
969		74,040	56,104	40,062	35,056	9,231	10,098	4,555					969
970		74,115	56,164	40,101	35,095	9,242	10,111	4,564					970
971		74,190	56,224	40,141	35,134	9,254	10,124	4,573					971
972		74,266	56,284	40,180	35,172	9,265	10,137	4,582					972
973		74,341	56,344	40,219	35,211	9,277	10,150	4,591					973
974		74,417	56,404	40,259	35,250	9,288	10,163	4,599					974
975		74,492	56,464	40,298	35,289	9,300	10,177	4,608					975
976		74,567	56,524	40,337	35,327	9,311	10,190	4,617					976
977		74,643	56,584	40,376	35,366	9,323	10,203	4,626					977
978		74,718	56,643	40,415	35,405	9,334	10,216	4,635					978
979		74,793	56,703	40,455	35,444	9,345	10,229	4,644					979
980		74,869	56,763	40,494	35,482	9,357	10,242	4,653					980

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
981		74,944	56,823	40,533	35,521	9,368	10,255	4,662					981
982		75,019	56,883	40,572	35,560	9,380	10,269	4,671					982
983		75,095	56,942	40,611	35,598	9,391	10,282	4,680					983
984		75,170	57,002	40,651	35,637	9,403	10,295	4,689					984
985		75,245	57,062	40,690	35,676	9,414	10,308	4,698					985
986		75,320	57,121	40,729	35,714	9,426	10,321	4,707					986
987		75,395	57,181	40,768	35,753	9,437	10,334	4,716					987
988		75,471	57,240	40,807	35,792	9,449	10,348	4,725					988
989		75,546	57,300	40,846	35,831	9,460	10,361	4,734					989
990		75,621	57,360	40,885	35,869	9,472	10,374	4,743					990
991		75,696	57,419	40,924	35,908	9,483	10,387	4,753					991
992		75,771	57,479	40,963	35,946	9,495	10,400	4,762					992
993		75,847	57,538	41,002	35,985	9,506	10,413	4,771					993
994		75,922	57,597	41,042	36,024	9,518	10,427	4,780					994
995		75,997	57,657	41,081	36,062	9,529	10,440	4,789					995
996		76,072	57,716	41,120	36,101	9,541	10,453	4,798					996
997		76,147	57,776	41,159	36,140	9,552	10,466	4,807					997
998		76,223	57,835	41,198	36,178	9,564	10,480	4,816					998
999		76,298	57,894	41,237	36,217	9,576	10,493	4,825					999
1000		76,373	57,953	41,276	36,256	9,587	10,506	4,834					1000
1001			58,013	41,315	36,294	9,599	10,519	4,843					1001
1002			58,072	41,354	36,333	9,610	10,532	4,853					1002
1003			58,131	41,393	36,371	9,622	10,546	4,862					1003
1004			58,190	41,431	36,410	9,633	10,559	4,871					1004
1005			58,249	41,470	36,449	9,645	10,572	4,880					1005
1006			58,309	41,509	36,487	9,656	10,585	4,889					1006
1007			58,368	41,548	36,526	9,668	10,599	4,898					1007
1008			58,427	41,587	36,564	9,679	10,612	4,908					1008
1009			58,486	41,626	36,603	9,691	10,625	4,917					1009
1010			58,545	41,665	36,641	9,703	10,639	4,926					1010
1011			58,604	41,704	36,680	9,714	10,652	4,935					1011
1012			58,663	41,743	36,718	9,726	10,665	4,944					1012
1013			58,722	41,781	36,757	9,737	10,678	4,954					1013
1014			58,781	41,820	36,796	9,749	10,692	4,963					1014
1015			58,840	41,859	36,834	9,761	10,705	4,972					1015
1016			58,899	41,898	36,873	9,772	10,718	4,981					1016
1017			58,957	41,937	36,911	9,784	10,732	4,990					1017
1018			59,016	41,976	36,950	9,795	10,745	5,000					1018
1019			59,075	42,014	36,988	9,807	10,758	5,009					1019
1020			59,134	42,053	37,027	9,818	10,771	5,018					1020
1021			59,193	42,092	37,065	9,830	10,785	5,027					1021
1022			59,252	42,131	37,104	9,842	10,798	5,037					1022
1023			59,310	42,169	37,142	9,853	10,811	5,046					1023
1024			59,369	42,208	37,181	9,865	10,825	5,055					1024
1025			59,428	42,247	37,219	9,877	10,838	5,065					1025
1026			59,487	42,286	37,258	9,888	10,851	5,074					1026
1027			59,545	42,324	37,296	9,900	10,865	5,083					1027
1028			59,604	42,363	37,334	9,911	10,878	5,092					1028
1029			59,663	42,402	37,373	9,923	10,891	5,102					1029
1030			59,721	42,440	37,411	9,935	10,905	5,111					1030

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1031			59,780	42,479	37,450	9,946	10,918	5,120					1031
1032			59,838	42,518	37,488	9,958	10,932	5,130					1032
1033			59,897	42,556	37,527	9,970	10,945	5,139					1033
1034			59,956	42,595	37,565	9,981	10,958	5,148					1034
1035			60,014	42,633	37,603	9,993	10,972	5,158					1035
1036			60,073	42,672	37,642	10,005	10,985	5,167					1036
1037			60,131	42,711	37,680	10,016	10,998	5,176					1037
1038			60,190	42,749	37,719	10,028	11,012	5,186					1038
1039			60,248	42,788	37,757	10,040	11,025	5,195					1039
1040			60,307	42,826	37,795	10,051	11,039	5,205					1040
1041			60,365	42,865	37,834	10,063	11,052	5,214					1041
1042			60,423	42,903	37,872	10,075	11,065	5,223					1042
1043			60,482	42,942	37,911	10,086	11,079	5,233					1043
1044			60,540	42,980	37,949	10,098	11,092	5,242					1044
1045			60,599	43,019	37,987	10,110	11,106	5,252					1045
1046			60,657	43,057	38,026	10,121	11,119	5,261					1046
1047			60,715	43,096	38,064	10,133	11,133	5,270					1047
1048			60,774	43,134	38,102	10,145	11,146	5,280					1048
1049			60,832	43,173	38,141	10,156	11,159	5,289					1049
1050			60,890	43,211	38,179	10,168	11,173	5,299					1050
1051			60,949	43,250	38,217	10,180	11,186	5,308					1051
1052			61,007	43,288	38,256	10,191	11,200	5,318					1052
1053			61,065	43,327	38,294	10,203	11,213	5,327					1053
1054			61,123	43,365	38,332	10,215	11,227	5,337					1054
1055			61,182	43,403	38,370	10,227	11,240	5,346					1055
1056			61,240	43,442	38,409	10,238	11,254	5,356					1056
1057			61,298	43,480	38,447	10,250	11,267	5,365					1057
1058			61,356	43,518	38,485	10,262	11,280	5,375					1058
1059			61,415	43,557	38,524	10,273	11,294	5,384					1059
1060			61,473	43,595	38,562	10,285	11,307	5,394					1060
1061			61,531	43,633	38,600	10,297	11,321	5,403					1061
1062			61,589	43,672	38,638	10,309	11,334	5,413					1062
1063			61,647	43,710	38,677	10,320	11,348	5,422					1063
1064			61,705	43,748	38,715	10,332	11,361	5,432					1064
1065			61,763	43,787	38,753	10,344	11,375	5,441					1065
1066			61,822	43,825	38,791	10,356	11,388	5,451					1066
1067			61,880	43,863	38,829	10,367	11,402	5,460					1067
1068			61,938	43,901	38,868	10,379	11,415	5,470					1068
1069			61,996	43,940	38,906	10,391	11,429	5,480					1069
1070			62,054	43,978	38,944	10,403	11,442	5,489					1070
1071			62,112	44,016	38,982	10,414	11,456	5,499					1071
1072			62,170	44,054	39,020	10,426	11,469	5,508					1072
1073			62,228	44,092	39,059	10,438	11,483	5,518					1073
1074			62,286	44,130	39,097	10,450	11,496	5,528					1074
1075			62,344	44,169	39,135	10,461	11,510	5,537					1075
1076			62,402	44,207	39,173	10,473	11,524	5,547					1076
1077			62,460	44,245	39,211	10,485	11,537	5,556					1077
1078			62,518	44,283	39,249	10,497	11,551	5,566					1078
1079			62,576	44,321	39,287	10,509	11,564	5,576					1079
1080			62,634	44,359	39,326	10,520	11,578	5,585					1080

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1081			62,692	44,397	39,364	10,532	11,591	5,595					1081
1082			62,750	44,435	39,402	10,544	11,605	5,605					1082
1083			62,808	44,473	39,440	10,556	11,618	5,614					1083
1084			62,866	44,512	39,478	10,567	11,632	5,624					1084
1085			62,924	44,550	39,516	10,579	11,646	5,634					1085
1086			62,982	44,588	39,554	10,591	11,659	5,643					1086
1087			63,040	44,626	39,592	10,603	11,673	5,653					1087
1088			63,098	44,664	39,630	10,615	11,686	5,663					1088
1089			63,156	44,702	39,668	10,626	11,700	5,672					1089
1090			63,214	44,740	39,706	10,638	11,714	5,682					1090
1091			63,271	44,778	39,744	10,650	11,727	5,692					1091
1092			63,329	44,816	39,783	10,662	11,741	5,702					1092
1093			63,387	44,853	39,821	10,674	11,754	5,711					1093
1094			63,445	44,891	39,859	10,686	11,768	5,721					1094
1095			63,503	44,929	39,897	10,697	11,782	5,731					1095
1096			63,561	44,967	39,935	10,709	11,795	5,740					1096
1097			63,619	45,005	39,973	10,721	11,809	5,750					1097
1098			63,677	45,043	40,011	10,733	11,822	5,760					1098
1099			63,734	45,081	40,049	10,745	11,836	5,770					1099
1100			63,792	45,119	40,087	10,757	11,850	5,780					1100
1101			63,850	45,157	40,125	10,768	11,863	5,789					1101
1102			63,908	45,194	40,163	10,780	11,877	5,799					1102
1103			63,966	45,232	40,201	10,792	11,891	5,809					1103
1104			64,024	45,270	40,238	10,804	11,904	5,819					1104
1105			64,081	45,308	40,276	10,816	11,918	5,828					1105
1106			64,139	45,346	40,314	10,828	11,931	5,838					1106
1107			64,197	45,383	40,352	10,839	11,945	5,848					1107
1108			64,255	45,421	40,390	10,851	11,959	5,858					1108
1109			64,313	45,459	40,428	10,863	11,972	5,868					1109
1110			64,370	45,497	40,466	10,875	11,986	5,878					1110
1111			64,428	45,534	40,504	10,887	12,000	5,887					1111
1112			64,486	45,572	40,542	10,899	12,013	5,897					1112
1113			64,544	45,610	40,580	10,911	12,027	5,907					1113
1114			64,602	45,647	40,618	10,922	12,041	5,917					1114
1115			64,659	45,685	40,655	10,934	12,054	5,927					1115
1116			64,717	45,723	40,693	10,946	12,068	5,937					1116
1117			64,775	45,760	40,731	10,958	12,082	5,947					1117
1118			64,833	45,798	40,769	10,970	12,096	5,956					1118
1119			64,890	45,836	40,807	10,982	12,109	5,966					1119
1120			64,948	45,873	40,845	10,994	12,123	5,976					1120
1121			65,006	45,911	40,883	11,006	12,137	5,986					1121
1122			65,064	45,948	40,920	11,017	12,150	5,996					1122
1123			65,121	45,986	40,958	11,029	12,164	6,006					1123
1124			65,179	46,024	40,996	11,041	12,178	6,016					1124
1125			65,237	46,061	41,034	11,053	12,191	6,026					1125
1126			65,295	46,099	41,072	11,065	12,205	6,036					1126
1127			65,352	46,136	41,109	11,077	12,219	6,046					1127
1128			65,410	46,174	41,147	11,089	12,233	6,055					1128
1129			65,468	46,211	41,185	11,101	12,246	6,065					1129
1130			65,525	46,249	41,223	11,113	12,260	6,075					1130

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1131			65,583	46,286	41,260	11,125	12,274	6,085					1131
1132			65,641	46,324	41,298	11,136	12,288	6,095					1132
1133			65,699	46,361	41,336	11,148	12,301	6,105					1133
1134			65,756	46,398	41,374	11,160	12,315	6,115					1134
1135			65,814	46,436	41,411	11,172	12,329	6,125					1135
1136			65,872	46,473	41,449	11,184	12,342	6,135					1136
1137			65,929	46,511	41,487	11,196	12,356	6,145					1137
1138			65,987	46,548	41,525	11,208	12,370	6,155					1138
1139			66,045	46,585	41,562	11,220	12,384	6,165					1139
1140			66,102	46,623	41,600	11,232	12,397	6,175					1140
1141			66,160	46,660	41,638	11,244	12,411	6,185					1141
1142			66,218	46,697	41,675	11,256	12,425	6,195					1142
1143			66,275	46,735	41,713	11,268	12,439	6,205					1143
1144			66,333	46,772	41,751	11,280	12,453	6,215					1144
1145			66,391	46,809	41,788	11,291	12,466	6,225					1145
1146			66,448	46,847	41,826	11,303	12,480	6,235					1146
1147			66,506	46,884	41,864	11,315	12,494	6,245					1147
1148			66,564	46,921	41,901	11,327	12,508	6,256					1148
1149			66,621	46,958	41,939	11,339	12,521	6,266					1149
1150			66,679	46,995	41,976	11,351	12,535	6,276					1150
1151			66,737	47,033	42,014	11,363	12,549	6,286					1151
1152			66,794	47,070	42,052	11,375	12,563	6,296					1152
1153			66,852	47,107	42,089	11,387	12,577	6,306					1153
1154			66,910	47,144	42,127	11,399	12,590	6,316					1154
1155			66,967	47,181	42,164	11,411	12,604	6,326					1155
1156			67,025	47,218	42,202	11,423	12,618	6,336					1156
1157			67,082	47,256	42,239	11,435	12,632	6,346					1157
1158			67,140	47,293	42,277	11,447	12,646	6,356					1158
1159			67,198	47,330	42,314	11,459	12,659	6,367					1159
1160			67,255	47,367	42,352	11,471	12,673	6,377					1160
1161			67,313	47,404	42,390	11,483	12,687	6,387					1161
1162			67,370	47,441	42,427	11,495	12,701	6,397					1162
1163			67,428	47,478	42,465	11,507	12,715	6,407					1163
1164			67,486	47,515	42,502	11,519	12,729	6,417					1164
1165			67,543	47,552	42,540	11,531	12,742	6,427					1165
1166			67,601	47,589	42,577	11,542	12,756	6,438					1166
1167			67,658	47,626	42,614	11,554	12,770	6,448					1167
1168			67,716	47,663	42,652	11,566	12,784	6,458					1168
1169			67,773	47,700	42,689	11,578	12,798	6,468					1169
1170			67,831	47,737	42,727	11,590	12,812	6,478					1170
1171			67,888	47,774	42,764	11,602	12,825	6,488					1171
1172			67,946	47,811	42,802	11,614	12,839	6,499					1172
1173			68,003	47,848	42,839	11,626	12,853	6,509					1173
1174			68,061	47,884	42,877	11,638	12,867	6,519					1174
1175			68,119	47,921	42,914	11,650	12,881	6,529					1175
1176			68,176	47,958	42,951	11,662	12,895	6,539					1176
1177			68,234	47,995	42,989	11,674	12,909	6,550					1177
1178			68,291	48,032	43,026	11,686	12,922	6,560					1178
1179			68,348	48,069	43,064	11,698	12,936	6,570					1179
1180			68,406	48,105	43,101	11,710	12,950	6,580					1180

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1181			68,463	48,142	43,138	11,722	12,964	6,591					1181
1182			68,521	48,179	43,176	11,734	12,978	6,601					1182
1183			68,578	48,216	43,213	11,746	12,992	6,611					1183
1184			68,636	48,252	43,250	11,758	13,006	6,621					1184
1185			68,693	48,289	43,288	11,770	13,019	6,632					1185
1186			68,751	48,326	43,325	11,782	13,033	6,642					1186
1187			68,808	48,363	43,362	11,794	13,047	6,652					1187
1188			68,865	48,399	43,399	11,806	13,061	6,663					1188
1189			68,923	48,436	43,437	11,818	13,075	6,673					1189
1190			68,980	48,473	43,474	11,830	13,089	6,683					1190
1191			69,037	48,509	43,511	11,842	13,103	6,693					1191
1192			69,095	48,546	43,549	11,854	13,117	6,704					1192
1193			69,152	48,582	43,586	11,866	13,131	6,714					1193
1194			69,209	48,619	43,623	11,878	13,145	6,724					1194
1195			69,267	48,656	43,660	11,890	13,158	6,735					1195
1196			69,324	48,692	43,698	11,902	13,172	6,745					1196
1197			69,381	48,729	43,735	11,914	13,186	6,755					1197
1198			69,439	48,765	43,772	11,926	13,200	6,766					1198
1199			69,496	48,802	43,809	11,939	13,214	6,776					1199
1200			69,553	48,838	43,846	11,951	13,228	6,786					1200
1201				48,875	43,884	11,963	13,242	6,797					1201
1202				48,911	43,921	11,975	13,256	6,807					1202
1203				48,948	43,958	11,987	13,270	6,818					1203
1204				48,984	43,995	11,999	13,284	6,828					1204
1205				49,021	44,032	12,011	13,298	6,838					1205
1206				49,057	44,069	12,023	13,311	6,849					1206
1207				49,093	44,106	12,035	13,325	6,859					1207
1208				49,130	44,144	12,047	13,339	6,869					1208
1209				49,166	44,181	12,059	13,353	6,880					1209
1210				49,202	44,218	12,071	13,367	6,890					1210
1211				49,239	44,255	12,083	13,381	6,901					1211
1212				49,275	44,292	12,095	13,395	6,911					1212
1213				49,311	44,329	12,107	13,409	6,922					1213
1214				49,348	44,366	12,119	13,423	6,932					1214
1215				49,384	44,403	12,131	13,437	6,942					1215
1216				49,420	44,440	12,143	13,451	6,953					1216
1217				49,456	44,477	12,155	13,465	6,963					1217
1218				49,493	44,514	12,167	13,479	6,974					1218
1219				49,529	44,551	12,179	13,493	6,984					1219
1220				49,565	44,588	12,191	13,507	6,995					1220
1221				49,601	44,625	12,203	13,521	7,005					1221
1222				49,637	44,662	12,216	13,535	7,016					1222
1223				49,674	44,699	12,228	13,549	7,026					1223
1224				49,710	44,736	12,240	13,563	7,037					1224
1225				49,746	44,773	12,252	13,577	7,047					1225
1226				49,782	44,810	12,264	13,590	7,058					1226
1227				49,818	44,847	12,276	13,604	7,068					1227
1228				49,854	44,884	12,288	13,618	7,079					1228
1229				49,890	44,921	12,300	13,632	7,089					1229
1230				49,926	44,958	12,312	13,646	7,100					1230

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1231				49,962	44,995	12,324	13,660	7,110					1231
1232				49,998	45,032	12,336	13,674	7,121					1232
1233				50,034	45,069	12,348	13,688	7,131					1233
1234				50,070	45,105	12,360	13,702	7,142					1234
1235				50,106	45,142	12,372	13,716	7,152					1235
1236				50,142	45,179	12,384	13,730	7,163					1236
1237				50,178	45,216	12,397	13,744	7,173					1237
1238				50,214	45,253	12,409	13,758	7,184					1238
1239				50,250	45,290	12,421	13,772	7,194					1239
1240				50,286	45,326	12,433	13,786	7,205					1240
1241				50,322	45,363	12,445	13,800	7,216					1241
1242				50,358	45,400	12,457	13,814	7,226					1242
1243				50,393	45,437	12,469	13,828	7,237					1243
1244				50,429	45,474	12,481	13,842	7,247					1244
1245				50,465	45,510	12,493	13,856	7,258					1245
1246				50,501	45,547	12,505	13,870	7,269					1246
1247				50,537	45,584	12,517	13,884	7,279					1247
1248				50,572	45,621	12,529	13,898	7,290					1248
1249				50,608	45,657	12,542	13,912	7,300					1249
1250				50,644	45,694	12,554	13,926	7,311					1250
1251				50,680	45,731	12,566	13,940	7,322					1251
1252				50,715	45,767	12,578	13,954	7,332					1252
1253				50,751	45,804	12,590	13,968	7,343					1253
1254				50,787	45,841	12,602	13,982	7,353					1254
1255				50,822	45,877	12,614	13,996	7,364					1255
1256				50,858	45,914	12,626	14,010	7,375					1256
1257				50,894	45,951	12,638	14,024	7,385					1257
1258				50,929	45,987	12,650	14,038	7,396					1258
1259				50,965	46,024	12,662	14,052	7,407					1259
1260				51,000	46,060	12,675	14,066	7,417					1260
1261				51,036	46,097	12,687	14,081	7,428					1261
1262				51,071	46,133	12,699	14,095	7,439					1262
1263				51,107	46,170	12,711	14,109	7,449					1263
1264				51,142	46,207	12,723	14,123	7,460					1264
1265				51,178	46,243	12,735	14,137	7,471					1265
1266				51,213	46,280	12,747	14,151	7,482					1266
1267				51,249	46,316	12,759	14,165	7,492					1267
1268				51,284	46,353	12,771	14,179	7,503					1268
1269				51,320	46,389	12,783	14,193	7,514					1269
1270				51,355	46,425	12,796	14,207	7,524					1270
1271				51,391	46,462	12,808	14,221	7,535					1271
1272				51,426	46,498	12,820	14,235	7,546					1272
1273				51,461	46,535	12,832	14,249	7,557					1273
1274				51,497	46,571	12,844	14,263	7,567					1274
1275				51,532	46,608	12,856	14,277	7,578					1275
1276				51,567	46,644	12,868	14,291	7,589					1276
1277				51,603	46,680	12,880	14,305	7,600					1277
1278				51,638	46,717	12,892	14,319	7,610					1278
1279				51,673	46,753	12,905	14,333	7,621					1279
1280				51,708	46,789	12,917	14,347	7,632					1280

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1281				51,744	46,826	12,929	14,361	7,643					1281
1282				51,779	46,862	12,941	14,375	7,653					1282
1283				51,814	46,898	12,953	14,390	7,664					1283
1284				51,849	46,935	12,965	14,404	7,675					1284
1285				51,885	46,971	12,977	14,418	7,686					1285
1286				51,920	47,007	12,989	14,432	7,697					1286
1287				51,955	47,043	13,001	14,446	7,707					1287
1288				51,990	47,079	13,014	14,460	7,718					1288
1289				52,025	47,116	13,026	14,474	7,729					1289
1290				52,060	47,152	13,038	14,488	7,740					1290
1291				52,095	47,188	13,050	14,502	7,751					1291
1292				52,130	47,224	13,062	14,516	7,761					1292
1293				52,165	47,260	13,074	14,530	7,772					1293
1294				52,200	47,296	13,086	14,544	7,783					1294
1295				52,235	47,333	13,098	14,558	7,794					1295
1296				52,270	47,369	13,111	14,572	7,805					1296
1297				52,305	47,405	13,123	14,586	7,816					1297
1298				52,340	47,441	13,135	14,601	7,827					1298
1299				52,375	47,477	13,147	14,615	7,837					1299
1300				52,410	47,513	13,159	14,629	7,848					1300
1301				52,445		13,171	14,643	7,859					1301
1302				52,480		13,183	14,657	7,870					1302
1303				52,515		13,195	14,671	7,881					1303
1304				52,550		13,208	14,685	7,892					1304
1305				52,585		13,220	14,699	7,903					1305
1306				52,620		13,232	14,713	7,914					1306
1307				52,654		13,244	14,727	7,924					1307
1308				52,689		13,256	14,741	7,935					1308
1309				52,724		13,268	14,755	7,946					1309
1310				52,759		13,280	14,770	7,957					1310
1311				52,794		13,292	14,784	7,968					1311
1312				52,828		13,305	14,798	7,979					1312
1313				52,863		13,317	14,812	7,990					1313
1314				52,898		13,329	14,826	8,001					1314
1315				52,932		13,341	14,840	8,012					1315
1316				52,967		13,353	14,854	8,023					1316
1317				53,002		13,365	14,868	8,034					1317
1318				53,037		13,377	14,882	8,045					1318
1319				53,071		13,390	14,896	8,056					1319
1320				53,106		13,402	14,911	8,066					1320
1321				53,140		13,414	14,925	8,077					1321
1322				53,175		13,426	14,939	8,088					1322
1323				53,210		13,438	14,953	8,099					1323
1324				53,244		13,450	14,967	8,110					1324
1325				53,279		13,462	14,981	8,121					1325
1326				53,313		13,474	14,995	8,132					1326
1327				53,348		13,487	15,009	8,143					1327
1328				53,382		13,499	15,023	8,154					1328
1329				53,417		13,511	15,037	8,165					1329
1330				53,451		13,523	15,052	8,176					1330

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1331				53,486		13,535	15,066	8,187					1331
1332				53,520		13,547	15,080	8,198					1332
1333				53,555		13,559	15,094	8,209					1333
1334				53,589		13,572	15,108	8,220					1334
1335				53,623		13,584	15,122	8,231					1335
1336				53,658		13,596	15,136	8,242					1336
1337				53,692		13,608	15,150	8,253					1337
1338				53,727		13,620	15,164	8,264					1338
1339				53,761		13,632	15,179	8,275					1339
1340				53,795		13,644	15,193	8,286					1340
1341				53,830		13,657	15,207	8,298					1341
1342				53,864		13,669	15,221	8,309					1342
1343				53,898		13,681	15,235	8,320					1343
1344				53,932		13,693	15,249	8,331					1344
1345				53,967		13,705	15,263	8,342					1345
1346				54,001		13,717	15,277	8,353					1346
1347				54,035		13,729	15,291	8,364					1347
1348				54,069		13,742	15,306	8,375					1348
1349				54,104		13,754	15,320	8,386					1349
1350				54,138		13,766	15,334	8,397					1350
1351				54,172		13,778	15,348	8,408					1351
1352				54,206		13,790	15,362	8,419					1352
1353				54,240		13,802	15,376	8,430					1353
1354				54,274		13,814	15,390	8,441					1354
1355				54,308		13,826	15,404	8,453					1355
1356				54,343		13,839	15,419	8,464					1356
1357				54,377		13,851	15,433	8,475					1357
1358				54,411		13,863	15,447	8,486					1358
1359				54,445		13,875	15,461	8,497					1359
1360				54,479		13,887	15,475	8,508					1360
1361				54,513		13,899	15,489	8,519					1361
1362				54,547		13,911	15,503	8,530					1362
1363				54,581		13,924	15,517	8,542					1363
1364				54,615		13,936	15,531	8,553					1364
1365				54,649		13,948	15,546	8,564					1365
1366				54,683		13,960	15,560	8,575					1366
1367				54,717		13,972	15,574	8,586					1367
1368				54,751		13,984	15,588	8,597					1368
1369				54,785		13,996	15,602	8,608					1369
1370				54,819		14,009	15,616	8,620					1370
1371				54,852		14,021	15,630	8,631					1371
1372				54,886		14,033	15,645	8,642					1372
1373						14,045	15,659	8,653					1373
1374						14,057	15,673	8,664					1374
1375						14,069	15,687	8,675					1375
1376						14,081	15,701	8,687					1376
1377						14,094	15,715	8,698					1377
1378						14,106	15,729	8,709					1378
1379						14,118	15,743	8,720					1379
1380						14,130	15,758	8,731					1380

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1381						14,142	15,772	8,743					1381
1382						14,154	15,786	8,754					1382
1383						14,166	15,800	8,765					1383
1384						14,178	15,814	8,776					1384
1385						14,191	15,828	8,787					1385
1386						14,203	15,842	8,799					1386
1387						14,215	15,856	8,810					1387
1388						14,227	15,871	8,821					1388
1389						14,239	15,885	8,832					1389
1390						14,251	15,899	8,844					1390
1391						14,263	15,913	8,855					1391
1392						14,276	15,927	8,866					1392
1393						14,288	15,941	8,877					1393
1394						14,300	15,955	8,889					1394
1395						14,312	15,969	8,900					1395
1396						14,324	15,984	8,911					1396
1397						14,336	15,998	8,922					1397
1398						14,348	16,012	8,934					1398
1399						14,360	16,026	8,945					1399
1400						14,373	16,040	8,956					1400
1401						14,385	16,054	8,967					1401
1402						14,397	16,068	8,979					1402
1403						14,409	16,082	8,990					1403
1404						14,421	16,097	9,001					1404
1405						14,433	16,111	9,013					1405
1406						14,445	16,125	9,024					1406
1407						14,457	16,139	9,035					1407
1408						14,470	16,153	9,047					1408
1409						14,482	16,167	9,058					1409
1410						14,494	16,181	9,069					1410
1411						14,506	16,196	9,080					1411
1412						14,518	16,210	9,092					1412
1413						14,530	16,224	9,103					1413
1414						14,542	16,238	9,114					1414
1415						14,554	16,252	9,126					1415
1416						14,567	16,266	9,137					1416
1417						14,579	16,280	9,148					1417
1418						14,591	16,294	9,160					1418
1419						14,603	16,309	9,171					1419
1420						14,615	16,323	9,182					1420
1421						14,627	16,337	9,194					1421
1422						14,639	16,351	9,205					1422
1423						14,651	16,365	9,216					1423
1424						14,664	16,379	9,228					1424
1425						14,676	16,393	9,239					1425
1426						14,688	16,407	9,251					1426
1427						14,700	16,422	9,262					1427
1428						14,712	16,436	9,273					1428
1429						14,724	16,450	9,285					1429
1430						14,736	16,464	9,296					1430

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1431						14,748	16,478	9,307					1431
1432						14,760	16,492	9,319					1432
1433						14,773	16,506	9,330					1433
1434						14,785	16,520	9,342					1434
1435						14,797	16,534	9,353					1435
1436						14,809	16,549	9,364					1436
1437						14,821	16,563	9,376					1437
1438						14,833	16,577	9,387					1438
1439						14,845	16,591	9,398					1439
1440						14,857	16,605	9,410					1440
1441						14,869	16,619	9,421					1441
1442						14,881	16,633	9,433					1442
1443						14,894	16,647	9,444					1443
1444						14,906	16,662	9,456					1444
1445						14,918	16,676	9,467					1445
1446						14,930	16,690	9,478					1446
1447						14,942	16,704	9,490					1447
1448						14,954	16,718	9,501					1448
1449						14,966	16,732	9,513					1449
1450						14,978	16,746	9,524					1450
1451						14,990	16,760	9,536					1451
1452						15,002	16,774	9,547					1452
1453						15,015	16,789	9,558					1453
1454						15,027	16,803	9,570					1454
1455						15,039	16,817	9,581					1455
1456						15,051	16,831	9,593					1456
1457						15,063	16,845	9,604					1457
1458						15,075	16,859	9,616					1458
1459						15,087	16,873	9,627					1459
1460						15,099	16,887	9,639					1460
1461						15,111	16,901	9,650					1461
1462						15,123	16,915	9,662					1462
1463						15,135	16,930	9,673					1463
1464						15,148	16,944	9,684					1464
1465						15,160	16,958	9,696					1465
1466						15,172	16,972	9,707					1466
1467						15,184	16,986	9,719					1467
1468						15,196	17,000	9,730					1468
1469						15,208	17,014	9,742					1469
1470						15,220	17,028	9,753					1470
1471						15,232	17,042	9,765					1471
1472						15,244	17,056	9,776					1472
1473						15,256	17,071	9,788					1473
1474						15,268	17,085	9,799					1474
1475						15,280	17,099	9,811					1475
1476						15,292	17,113	9,822					1476
1477						15,304	17,127	9,834					1477
1478						15,317	17,141	9,845					1478
1479						15,329	17,155	9,857					1479
1480						15,341	17,169	9,868					1480

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1481						15,353	17,183	9,880					1481
1482						15,365	17,197	9,891					1482
1483						15,377	17,211	9,903					1483
1484						15,389	17,225	9,914					1484
1485						15,401	17,240	9,926					1485
1486						15,413	17,254	9,937					1486
1487						15,425	17,268	9,949					1487
1488						15,437	17,282	9,961					1488
1489						15,449	17,296	9,972					1489
1490						15,461	17,310	9,984					1490
1491						15,473	17,324	9,995					1491
1492						15,485	17,338	10,007					1492
1493						15,497	17,352	10,018					1493
1494						15,509	17,366	10,030					1494
1495						15,521	17,380	10,041					1495
1496						15,534	17,394	10,053					1496
1497						15,546	17,408	10,064					1497
1498						15,558	17,423	10,076					1498
1499						15,570	17,437	10,088					1499
1500						15,582	17,451	10,099					1500
1501						15,594	17,465	10,111					1501
1502						15,606	17,479	10,122					1502
1503						15,618	17,493	10,134					1503
1504						15,630	17,507	10,145					1504
1505						15,642	17,521	10,157					1505
1506						15,654	17,535	10,168					1506
1507						15,666	17,549	10,180					1507
1508						15,678	17,563	10,192					1508
1509						15,690	17,577	10,203					1509
1510						15,702	17,591	10,215					1510
1511						15,714	17,605	10,226					1511
1512						15,726	17,619	10,238					1512
1513						15,738	17,633	10,249					1513
1514						15,750	17,647	10,261					1514
1515						15,762	17,661	10,273					1515
1516						15,774	17,676	10,284					1516
1517						15,786	17,690	10,296					1517
1518						15,798	17,704	10,307					1518
1519						15,810	17,718	10,319					1519
1520						15,822	17,732	10,331					1520
1521						15,834	17,746	10,342					1521
1522						15,846	17,760	10,354					1522
1523						15,858	17,774	10,365					1523
1524						15,870	17,788	10,377					1524
1525						15,882	17,802	10,389					1525
1526						15,894	17,816	10,400					1526
1527						15,906	17,830	10,412					1527
1528						15,918	17,844	10,423					1528
1529						15,930	17,858	10,435					1529
1530						15,942	17,872	10,447					1530

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1531						15,954	17,886	10,458					1531
1532						15,966	17,900	10,470					1532
1533						15,978	17,914	10,482					1533
1534						15,990	17,928	10,493					1534
1535						16,002	17,942	10,505					1535
1536						16,014	17,956	10,516					1536
1537						16,026	17,970	10,528					1537
1538						16,038	17,984	10,540					1538
1539						16,050	17,998	10,551					1539
1540						16,062	18,012	10,563					1540
1541						16,074	18,026	10,575					1541
1542						16,086	18,040	10,586					1542
1543						16,098	18,054	10,598					1543
1544						16,110	18,068	10,609					1544
1545						16,122	18,082	10,621					1545
1546						16,134	18,096	10,633					1546
1547						16,146	18,110	10,644					1547
1548						16,158	18,124	10,656					1548
1549						16,170	18,138	10,668					1549
1550						16,182	18,152	10,679					1550
1551						16,194	18,166	10,691					1551
1552						16,205	18,180	10,703					1552
1553						16,217	18,194	10,714					1553
1554						16,229	18,208	10,726					1554
1555						16,241	18,222	10,738					1555
1556						16,253	18,236	10,749					1556
1557						16,265	18,250	10,761					1557
1558						16,277	18,264	10,773					1558
1559						16,289	18,278	10,784					1559
1560						16,301	18,292	10,796					1560
1561						16,313	18,306	10,808					1561
1562						16,325	18,320	10,819					1562
1563						16,337	18,334	10,831					1563
1564						16,349	18,348	10,843					1564
1565						16,361	18,362	10,854					1565
1566						16,373	18,376	10,866					1566
1567						16,385	18,390	10,877					1567
1568						16,396	18,404	10,889					1568
1569						16,408	18,417	10,901					1569
1570						16,420	18,431	10,913					1570
1571						16,432	18,445	10,924					1571
1572						16,444	18,459	10,936					1572
1573						16,456	18,473	10,948					1573
1574						16,468	18,487	10,959					1574
1575						16,480	18,501	10,971					1575
1576						16,492	18,515	10,983					1576
1577						16,504	18,529	10,994					1577
1578						16,516	18,543	11,006					1578
1579						16,527	18,557	11,018					1579
1580						16,539	18,571	11,029					1580

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1581						16,551	18,585	11,041					1581
1582						16,563	18,599	11,053					1582
1583						16,575	18,613	11,064					1583
1584						16,587	18,627	11,076					1584
1585						16,599	18,640	11,088					1585
1586						16,611	18,654	11,099					1586
1587						16,623	18,668	11,111					1587
1588						16,634	18,682	11,123					1588
1589						16,646	18,696	11,134					1589
1590						16,658	18,710	11,146					1590
1591						16,670	18,724	11,158					1591
1592						16,682	18,738	11,169					1592
1593						16,694	18,752	11,181					1593
1594						16,706	18,766	11,193					1594
1595						16,718	18,779	11,205					1595
1596						16,729	18,793	11,216					1596
1597						16,741	18,807	11,228					1597
1598						16,753	18,821	11,240					1598
1599						16,765	18,835	11,251					1599
1600						16,777	18,849	11,263					1600
1601						16,789	18,863	11,275					1601
1602						16,801	18,877	11,286					1602
1603						16,812	18,891	11,298					1603
1604						16,824	18,904	11,310					1604
1605						16,836	18,918	11,321					1605
1606						16,848	18,932	11,333					1606
1607						16,860	18,946	11,345					1607
1608						16,872	18,960	11,357					1608
1609						16,883	18,974	11,368					1609
1610						16,895	18,988	11,380					1610
1611						16,907	19,002	11,392					1611
1612						16,919	19,015	11,403					1612
1613						16,931	19,029	11,415					1613
1614						16,943	19,043	11,427					1614
1615						16,954	19,057	11,438					1615
1616						16,966	19,071	11,450					1616
1617						16,978	19,085	11,462					1617
1618						16,990	19,098	11,474					1618
1619						17,002	19,112	11,485					1619
1620						17,013	19,126	11,497					1620
1621						17,025	19,140	11,509					1621
1622						17,037	19,154	11,520					1622
1623						17,049	19,168	11,532					1623
1624						17,061	19,181	11,544					1624
1625						17,072	19,195	11,555					1625
1626						17,084	19,209	11,567					1626
1627						17,096	19,223	11,579					1627
1628						17,108	19,237	11,591					1628
1629						17,120	19,250	11,602					1629
1630						17,131	19,264	11,614					1630

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1631						17,143	19,278	11,626					1631
1632						17,155	19,292	11,637					1632
1633						17,167	19,306	11,649					1633
1634						17,178	19,319	11,661					1634
1635						17,190	19,333	11,673					1635
1636						17,202	19,347	11,684					1636
1637						17,214	19,361	11,696					1637
1638						17,225	19,375	11,708					1638
1639						17,237	19,388	11,719					1639
1640						17,249	19,402	11,731					1640
1641						17,261	19,416	11,743					1641
1642						17,272	19,430	11,754					1642
1643						17,284	19,444	11,766					1643
1644						17,296	19,457	11,778					1644
1645						17,308	19,471	11,790					1645
1646						17,319	19,485	11,801					1646
1647						17,331	19,499	11,813					1647
1648						17,343	19,512	11,825					1648
1649						17,355	19,526	11,836					1649
1650						17,366	19,540	11,848					1650
1651						17,378	19,554	11,860					1651
1652						17,390	19,567	11,871					1652
1653						17,401	19,581	11,883					1653
1654						17,413	19,595	11,895					1654
1655						17,425	19,609	11,907					1655
1656						17,437	19,622	11,918					1656
1657						17,448	19,636	11,930					1657
1658						17,460	19,650	11,942					1658
1659						17,472	19,663	11,953					1659
1660						17,483	19,677	11,965					1660
1661						17,495	19,691	11,977					1661
1662						17,507	19,705	11,988					1662
1663						17,518	19,718	12,000					1663
1664						17,530	19,732	12,012					1664
1665						17,542	19,746	12,024					1665
1666						17,553	19,759	12,035					1666
1667						17,565	19,773	12,047					1667
1668						17,577	19,787	12,059					1668
1669						17,588	19,800	12,070					1669
1670						17,600	19,814	12,082					1670
1671						17,612	19,828	12,094					1671
1672						17,623	19,841	12,105					1672
1673						17,635	19,855	12,117					1673
1674						17,647	19,869	12,129					1674
1675						17,658	19,882	12,141					1675
1676						17,670	19,896	12,152					1676
1677						17,682	19,910	12,164					1677
1678						17,693	19,923	12,176					1678
1679						17,705	19,937	12,187					1679
1680						17,717	19,951	12,199					1680

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1681						17,728	19,964	12,211					1681
1682						17,740	19,978	12,222					1682
1683						17,751	19,992	12,234					1683
1684						17,763	20,005	12,246					1684
1685						17,775	20,019	12,257					1685
1686						17,786	20,032	12,269					1686
1687						17,798	20,046	12,281					1687
1688						17,809	20,060	12,292					1688
1689						17,821	20,073	12,304					1689
1690						17,832	20,087	12,316					1690
1691						17,844	20,100	12,327					1691
1692						17,855	20,114	12,339					1692
1693						17,867	20,127	12,351					1693
1694						17,878	20,141	12,363					1694
1695						17,890	20,154	12,374					1695
1696						17,901	20,168	12,386					1696
1697						17,913	20,181	12,398					1697
1698						17,924	20,195	12,409					1698
1699						17,936	20,208	12,421					1699
1700						17,947	20,222	12,433					1700
1701						17,959	20,235	12,444					1701
1702						17,970	20,249	12,456					1702
1703						17,982	20,262	12,468					1703
1704						17,993	20,275	12,479					1704
1705						18,004	20,289	12,491					1705
1706						18,016	20,302	12,503					1706
1707						18,027	20,316	12,514					1707
1708						18,039	20,329	12,526					1708
1709						18,050	20,342	12,538					1709
1710						18,061	20,356	12,549					1710
1711						18,073	20,369	12,561					1711
1712						18,084	20,382	12,572					1712
1713						18,095	20,396	12,584					1713
1714						18,107	20,409	12,596					1714
1715						18,118	20,422	12,607					1715
1716						18,129	20,436	12,619					1716
1717						18,140	20,449	12,631					1717
1718						18,152	20,462	12,642					1718
1719						18,163	20,475	12,654					1719
1720						18,174	20,488	12,666					1720
1721						18,185	20,502	12,677					1721
1722						18,196	20,515	12,689					1722
1723						18,208	20,528	12,701					1723
1724						18,219	20,541	12,712					1724
1725						18,230	20,554	12,724					1725
1726						18,241	20,567	12,736					1726
1727						18,252	20,581	12,747					1727
1728						18,263	20,594	12,759					1728
1729						18,274	20,607	12,770					1729
1730						18,285	20,620	12,782					1730

°C t90	Typ T Cu- CuNi mV	Typ E NiCr- CuNi mV	Typ J Fe- CuNi mV	Typ K NiCr- Ni mV	Typ N NiCrSi- NiSi mV	Typ S Pt10Rh- Pt mV	Typ R Pt13Rh- Pt mV	Typ B Pt30Rh- Pt6Rh mV	Typ U Cu- CuNi mV	Typ L Fe- CuNi mV	Pt100 Ω	Ni100 Ω	°C t90
1731						18,297	20,633	12,794					1731
1732						18,308	20,646	12,805					1732
1733						18,319	20,659	12,817					1733
1734						18,330	20,672	12,829					1734
1735						18,341	20,685	12,840					1735
1736						18,352	20,698	12,852					1736
1737						18,362	20,711	12,863					1737
1738						18,373	20,724	12,875					1738
1739						18,384	20,736	12,887					1739
1740						18,395	20,749	12,898					1740
1741						18,406	20,762	12,910					1741
1742						18,417	20,775	12,921					1742
1743						18,428	20,788	12,933					1743
1744						18,439	20,801	12,945					1744
1745						18,449	20,813	12,956					1745
1746						18,460	20,826	12,968					1746
1747						18,471	20,839	12,980					1747
1748						18,482	20,852	12,991					1748
1749						18,493	20,864	13,003					1749
1750						18,503	20,877	13,014					1750
1751						18,514	20,890	13,026					1751
1752						18,525	20,902	13,037					1752
1753						18,535	20,915	13,049					1753
1754						18,546	20,928	13,061					1754
1755						18,557	20,940	13,072					1755
1756						18,567	20,953	13,084					1756
1757						18,578	20,965	13,095					1757
1758						18,588	20,978	13,107					1758
1759						18,599	20,990	13,119					1759
1760						18,609	21,003	13,130					1760
1761						18,620	21,015	13,142					1761
1762						18,630	21,027	13,153					1762
1763						18,641	21,040	13,165					1763
1764						18,651	21,052	13,176					1764
1765						18,661	21,065	13,188					1765
1766						18,672	21,077	13,200					1766
1767						18,682	21,089	13,211					1767
1768						18,693	21,101	13,223					1768
1769								13,234					1769
1770								13,246					1770
1771								13,257					1771
1772								13,269					1772
1773								13,280					1773
1774								13,292					1774
1775								13,304					1775
1776								13,315					1776
1777								13,327					1777
1778								13,338					1778
1779								13,350					1779
1780								13,361					1780

°C	Typ T	Typ E	Typ J	Typ K	Typ N	Typ S	Typ R	Typ B	Typ U	Typ L	Pt100	Ni100	°C
t90	Cu- CuNi mV	NiCr- CuNi mV	Fe- CuNi mV	NiCr- Ni mV	NiCrSi- NiSi mV	Pt10Rh- Pt mV	Pt13Rh- Pt mV	Pt30Rh- Pt6Rh mV	Cu- CuNi mV	Fe- CuNi mV	Ω	Ω	t90
1781								13,373					1781
1782								13,384					1782
1783								13,396					1783
1784								13,407					1784
1785								13,419					1785
1786								13,430					1786
1787								13,442					1787
1788								13,453					1788
1789								13,465					1789
1790								13,476					1790
1791								13,488					1791
1792								13,499					1792
1793								13,511					1793
1794								13,522					1794
1795								13,534					1795
1796								13,545					1796
1797								13,557					1797
1798								13,568					1798
1799								13,580					1799
1800								13,591					1800
1801								13,603					1801
1802								13,614					1802
1803								13,626					1803
1804								13,637					1804
1805								13,649					1805
1806								13,660					1806
1807								13,672					1807
1808								13,683					1808
1809								13,694					1809
1810								13,706					1810
1811								13,717					1811
1812								13,729					1812
1813								13,740					1813
1814								13,752					1814
1815								13,763					1815
1816								13,775					1816
1817								13,786					1817
1818								13,797					1818
1819								13,809					1819
1820								13,820					1820

Die wichtigsten Verfahren der Temperaturmessung und ihre Prinzipien werden beschrieben.

Eine Vielzahl praktischer Hinweise gibt dem Anwender umfassende und wertvolle Informationen rund um das Thema Temperaturmessung im industriellen Umfeld.