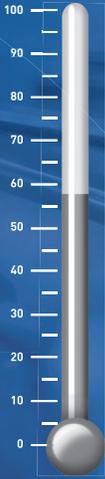




MORE THAN SENSORS
AND AUTOMATION



Elektrische Temperaturmessung

mit Widerstandsthermometern und
Thermoelementen



Manfred Schleicher

Elektrische Temperaturmessung

mit Widerstandsthermometern und
Thermoelementen



Manfred Schleicher

Vorwort

Herzlich willkommen zu unserem Fachbuch zur elektrischen Temperaturmessung. Mit Widerstandsthermometern und Thermoelementen behandelt es die beiden wichtigsten Arten von elektrischen Thermometern.

Unsere Ausführungen sollen Ihnen helfen, die Sensorik sicher einzusetzen. Sie lernen die Messprinzipien kennen und erfahren, wie die elektrischen Signale ausgewertet werden. Das Buch zeigt, wie die Sensorik an Auswerteeinheiten angeschlossen wird und was hier zu beachten ist. Verbreitete Thermometerausführungen in der Industrie werden vorgestellt und Sie erhalten wichtige Informationen zu ihrer Anwendung.

Wir haben versucht, unser Wissen leicht und verständlich niederzuschreiben. Dieses Buch soll als Leitfaden für Praktiker dienen und helfen, Fehler zu vermeiden und eine möglichst genaue Temperaturmessung zu erreichen. Wir hoffen, Sie können hilfreiche Informationen daraus ziehen. Vielleicht haben Sie sogar ein wenig Freude daran, etwas Zeit auf dem Gebiet der Temperaturmesstechnik zu verbringen.

Fulda, im März 2024

Dipl.-Ing. (FH) Manfred Schleicher



JUMO GmbH & Co. KG
Moritz-Juchheim-Straße 1
36039 Fulda, Germany
Telefon: +49 661 6003-0
Telefax: +49 661 6003-500
E-Mail: mail@jumo.net
Internet: www.jumo.net

Nachdruck mit Quellennachweis gestattet!

Teilenummer: 30059632
Buchnummer: FAS 146
Druckdatum: 2024
ISBN: 978-3-935742-06-1

Diese Broschüre wurde nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Für mögliche Irrtümer übernehmen wir keine Gewähr. Maßgebend sind in jedem Fall die Betriebsanleitungen zu den entsprechenden Geräten.

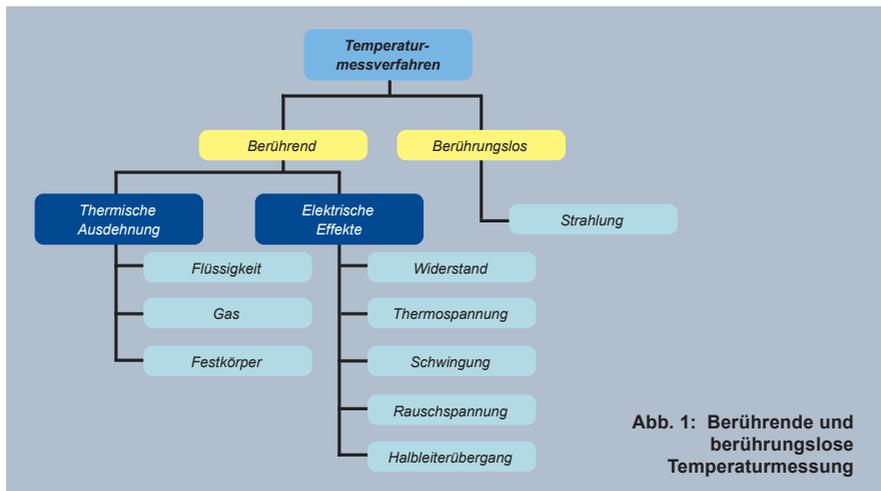
1	Einleitung	7
2	Widerstandssensoren	11
2.1	Beispiele für Widerstandssensoren	11
2.2	Aufbereitung des Temperatursignals	12
2.2.1	Aktivierung der Linearisierung	12
2.2.2	Einstellung der Koeffizienten	13
2.2.3	Verwendung von Stützstellen	13
3	Der Platinsensor und die Widerstandsthermometer	15
3.1	Grundsätzliches zum Platinsensor	15
3.2	Ausführungen von Platinsensoren	17
3.2.1	Die Dünnschichtwiderstände	17
3.2.2	Die drahtgewickelten Sensoren	19
3.3	Genauigkeitsklassen von Widerstandssensoren und konfektionierten Thermometern	19
3.4	Pt100 und Pt1000	20
3.5	Die Anschlussarten	21
3.5.1	Der Zweileiteranschluss	21
3.5.2	Der Dreileiteranschluss	23
3.5.3	Der Vierleiteranschluss	24
3.5.4	Anschluss von Widerstandsthermometern in Zweileitertechnik mit Anschlusssockel bzw. Anschlussstecker	24
3.6	Länge der Anschlussleitung	25
3.7	Temperaturmessumformer und Widerstandsthermometer	27
4	Thermoelemente	31
4.1	Allgemeines zu Thermoelementen	31
4.2	Der thermoelektrische Effekt	31
4.3	Auswertung der Thermospannung	33
4.4	Die Thermoelemente der DIN EN IEC 60584	36
4.5	Thermo- bzw. Ausgleichsleitungen sowie thermospannungsfreie Steckverbinder	38
4.6	Weitere Temperaturkompensationen	40

4.7	Detektion von Fühlerbruch und Kurzschlussbetrachtung	42
4.8	Galvanische Trennung beim Betrieb von Thermoelementen	44
4.9	Toleranz von Thermoelementen und Thermoleitungen bzw. Ausgleichsleitungen.....	46
4.10	Driftverhalten von Thermoelementen	47
4.11	Aufbau von Thermoelementen	48
5	Informationen zu elektrischen Thermometern und zur Temperaturmessung	51
5.1	Vorstellung typischer elektrischer Thermometer und deren Anwendung	51
5.1.1	Elektrische Temperaturfühler mit Anschlussleitung.....	51
5.1.2	Elektrische Temperaturfühler mit Anschlussstecker.....	52
5.1.3	Mehrkanalige Temperaturfühler (Mehrpunkt-Temperaturfühler).....	52
5.1.4	Temperaturfühler mit Anschlusskopf und Kopfmessumformer.....	53
5.1.5	Kopfmessumformer.....	54
5.1.6	Mantelwiderstandsthermometer und Mantelthermoelemente	55
5.2	Thermometer zum Einstecken und Einschrauben	58
5.2.1	Anlegefühler	59
5.2.2	Temperaturfühler aus Kunststoff	59
5.3	Hinweise zur Anwendung elektrischer Thermometer	61
5.3.1	Verwendung von Schutzhülsen.....	61
5.3.2	Der Wärmeableitfehler	62
5.3.3	Die thermische Ansprechzeit	64
5.4	Kalibrierung von Temperaturmessketten.....	66

1 Einleitung

Dieses Buch behandelt die Messung der Temperatur mit Widerstandsthermometern und Thermoelementen. Diese Thermometer nutzen elektrische Effekte und sie messen berührend. Selbstverständlich existieren noch andere Messverfahren – dieses Kapitel gibt einen kleinen Überblick.

Die meisten Temperaturmessverfahren arbeiten berührend (siehe Abb. 1). Das heißt, der Temperatursensor befindet sich direkt auf dem Messobjekt bzw. in unmittelbarer Umgebung und misst hier die Temperatur.



Arbeiten die Thermometer aufgrund elektrischer Effekte, handelt es sich in der Regel um Widerstandsthermometer (temperaturabhängiger Widerstand) bzw. Thermoelemente (temperaturabhängige Spannung). Die anderen in Abb. 1 aufgelisteten elektrischen Effekte werden nur selten in der entsprechenden Sensorik genutzt.

Andere berührende Messverfahren nutzen die thermische Ausdehnung von Flüssigkeiten, Gasen oder Festkörpern. Der Klassiker ist ein Glasthermometer, bei dem über eine Flüssigkeitssäule die Temperatur abgelesen wird.

Auch Zeigerthermometer (Abb. 2) nutzen die temperaturabhängige Ausdehnung von Flüssigkeiten, alternativ finden aber auch Gase als Füllmedium Verwendung. In den Thermometern befindet sich der größte Teil des Messmediums in einem Fühler, welcher der Messtemperatur ausgesetzt wird. Steigt die Temperatur an, dehnt sich das Medium aus und der Druck steigt. Der Fühler ist über eine Kapillarleitung mit einer Bourdonfeder verbunden. Diese lenkt den Zeiger auf einer Skala aus.



Abb. 2: Blick hinter die Skala eines Zeigerthermometers mit Kapillarmesssystem (flüssigkeits- oder gasgefüllt, mit Bourdonfeder)

Einige Zeigerthermometer nutzen auch die thermische Ausdehnung von Festkörpern. Dann sind sie mit einem Bimetall ausgestattet, welches zu einer Spirale geformt ist. Die beiden Metalle verfügen über unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten und verändern den Winkel einer Zeigerwelle temperaturabhängig, siehe Abb. 3.

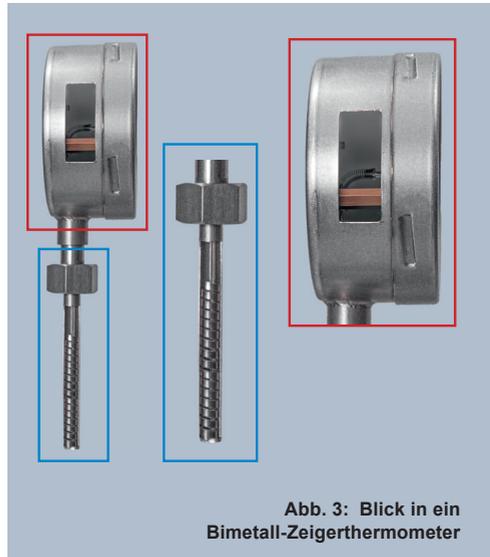


Abb. 3: Blick in ein Bimetall-Zeigerthermometer

Die Messung der Temperatur kann auch berührungslos über die emittierte Strahlung des Messobjektes erfolgen. Grundlage bildet das Stefan-Boltzmann-Gesetz, das besagt, dass die Gesamtstrahlungsleistung eines schwarzen Körpers von seiner absoluten Temperatur (also von der Temperatur in Kelvin) abhängig ist. Die berührungslose Messung ist beispielsweise notwendig, wenn das Messobjekt rotiert, unter hoher elektrischer Spannung steht oder chemisch sehr aggressiv ist. Weiterhin ist diese Art der Temperaturmessung obligatorisch, wenn die berührende Messung das Messobjekt beschädigen würde (wie beispielsweise bei Kunststofffolien). Strahlungspyrometer ermitteln aus der Strahlungsleistung die Objekttemperatur.



Abb. 4: Strahlungspyrometer

2 Widerstandssensoren

In Widerstandsthermometern kommen Sensoren zum Einsatz, die ihren Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur verändern. In der Industrie verwendet man den Begriff „Widerstandsthermometer“ für Thermometer mit Platinsensoren Pt100 bzw. Pt1000, dabei steht die jeweilige Zahl für den Widerstand bei 0 °C. Die Platinsensoren sind in der Industrie quasi der Standard bei der Messung bis maximal 600 °C. In einigen Bereichen kommen aber auch andere Widerstandssensoren zum Einsatz. Dieses Kapitel stellt einige dieser Sensoren vor und zeigt ihre Signalaufbereitung auf.

2.1 Beispiele für Widerstandssensoren

Im Bereich der weißen Ware (Haushaltsartikel wie Kühlschränke, Toaster, Backöfen etc.) kommen sogenannte Thermistoren zum Einsatz. Sie bestehen aus unterschiedlichen Keramikoxiden, die als Pulver in der gewünschten Form angeteigt und gesintert werden. Der Produktionsprozess ermöglicht sehr viele Bauformen. Die Sensoren sind günstig in der Produktion und liefern für einen eingeschränkten Temperaturbereich eine gute Genauigkeit und Stabilität. Für einen großen Temperaturbereich betrachtet, ist die Kennlinie nichtlinear. Für die Sensoren liegt kein Standard vor, jeder Hersteller liefert seine Sensorik mit eigener Kennlinie – das macht die Ersatzteilbeschaffung problematisch.

Es existieren Widerstandssensoren, deren Widerstand mit steigender Temperatur abfällt. Diese sogenannten NTCs verfügen über einen negativen Temperaturkoeffizienten. Demgegenüber ist bei PTCs der Temperaturkoeffizient positiv – der Widerstand steigt bei Temperaturerhöhung. Thermistoren können NTCs oder PTCs sein.



Abb. 9: Thermistor

Häufig finden für die Temperaturmessung Widerstandssensoren auf Basis von Metallen Verwendung. Wie bereits erwähnt, ist im industriellen Bereich das Basismaterial für die Sensorik Platin.

In den Branchen Heizung, Klima und Lüftung kommen auch Nickelsensoren zum Einsatz. Ihr Messbereich von ca. -60 bis +250 °C ist für die Branchen absolut ausreichend. Konkret finden meist die Elemente Ni100 bzw. Ni1000 Verwendung, ihr Widerstand bei 0 °C liegt bei 100 bzw. 1000 Ω. Für Nickelsensoren existierte früher die Norm DIN 42760. Diese ist mittlerweile nicht mehr gültig, wird aber weiterhin zur Beschreibung der Sensoreigenschaften genutzt.

In Sonderfällen finden auch die Metalle Eisen (für sehr tiefe Temperaturen im Laborbereich) und Kupfer (beispielsweise Cu50-Sensoren im russischen Markt) als Widerstandsmaterial Verwendung.

Alle genannten Metallsensoren sind PTCs. Reine Metalle haben bekannte Temperaturkoeffizienten, für die exakte Temperaturmessung muss allerdings das leicht nichtlineare Verhalten Beachtung finden.

2.2 Aufbereitung des Temperatursignals

Aus dem Widerstandssignal muss die Temperatur gebildet werden. Die Temperatur wird dann beispielsweise angezeigt oder über ein Stromsignal (4 bis 20 mA) weitergeführt.

Zur Auswertung führt die Auswerteeinheit (Abb. 5) einen definierten Messstrom durch den Sensor. Die abfallende Spannung wird gemessen und mithilfe der beiden Größen der Widerstand ermittelt.



Abb. 5: Digitaler Anzeiger mit angeschlossenem Widerstandsthermometer

In den nächsten drei Unterkapiteln wird aufgezeigt, wie die Auswerteeinheit aus dem gemessenen Widerstand die Temperatur ermittelt:

2.2.1 Aktivierung der Linearisierung

In JUMO-Feldgeräten sind die Linearisierungen für Widerstandssensoren abgelegt. Zu finden sind immer die für Pt100, Pt1000 und je nach Geräteeart auch noch weitere wie die für Ni 100 und Cu 50. Nach Anwahl der entsprechenden Linearisierung wird aus dem Widerstand automatisch die Temperatur ermittelt. So wird beispielsweise bei Verwendung eines Pt100 die folgende Einstellung für den Eingang vorgenommen (Abb. 6):

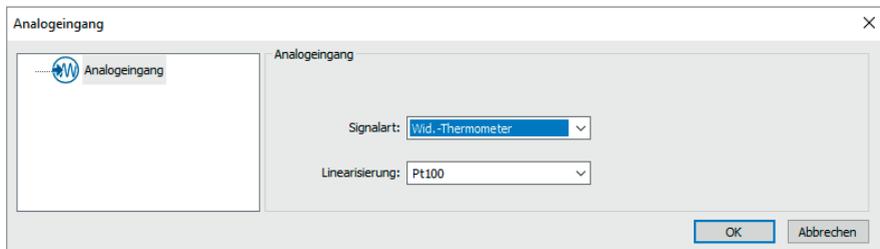


Abb. 6: Eingangskonfiguration – Screenshot aus dem Konfigurationsprogramm des digitalen Anzeigers aus Abb. 5

In der Folge werden noch zwei weitere Möglichkeiten aufgezeigt, wie aus dem gemessenen Widerstand die Temperatur ermittelt wird. Da jedoch meistens Platinsensoren zum Einsatz kommen und deren Linearisierung in den Feldgeräten auswählbar ist, finden die beiden Alternativen nur selten Verwendung:

2.2.2 Einstellung der Koeffizienten

Das Temperaturverhalten von Metallsensoren kann sehr genau mit einem Polynom höherer Ordnung beschrieben werden:

$$R(\vartheta) = R_0 \times (1 + A \times \vartheta + B \times \vartheta^2 \dots)$$

R_0 : Nennwiderstand bei 0 °C

ϑ : Temperatur in °C

A, B: individuelle Koeffizienten des Sensors

Sind für einen Sensor die Koeffizienten bekannt, kann für jede Temperatur der zu erwartende Widerstand ermittelt werden.

So beschreibt beispielsweise ein Hersteller das Temperaturverhalten eines lieferbaren Ni100-Widerstandssensors wie folgt:

$$R(\vartheta) = 100 \, \Omega \times (1 + 5,481 \times 10^{-3} \times \vartheta + 6,650 \times 10^{-6} \times \vartheta^2 + 2,805 \times 10^{-11} \times \vartheta^4 + 2,000 \times 10^{-17} \times \vartheta^6)$$

In einige JUMO-Feldgeräte können die Koeffizienten eingegeben werden. Die Linearisierung erfolgt dann aufgrund der Faktoren.

2.2.3 Verwendung von Stützstellen

Eine dritte Möglichkeit ist, über den Temperaturbereich Stützstellen zu ermitteln. Aufgrund der Wertepaare (Widerstand – Temperatur) kann in den meisten JUMO-Feldgeräten ebenfalls die Linearisierung erfolgen.

Für die Linearisierung wird anstelle eines bestimmten Sensors „kundenspezifisch“ angegeben:

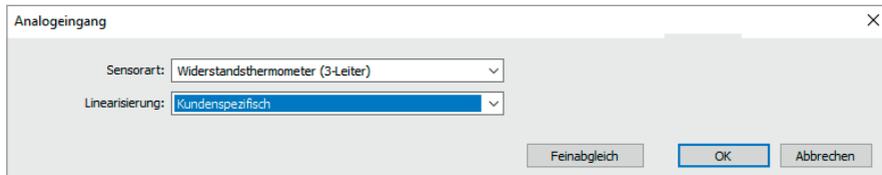


Abb. 7: Screenshot aus dem Konfigurationsprogramm, Auswahl der kundenspezifischen Linearisierung

Um die Linearisierung nach Stützstellen für den unter 2.2.2 erwähnten Ni100-Sensor zu realisieren, sind unter „kundenspezifische Linearisierung“ folgende Einstellungen vorzunehmen:

Kundenspezifische Linearisierung

Tabelle 1

Bezeichnung:

— Stützwerte —

	Messwert (X)	Linearisierter Wert (Y)
1	100	0
2	100.27	0.5
3	100.55	1
4	100.82	1.5
5	101.1	2
6	101.37	2.5
7	101.65	3
8	101.93	3.5
9	102.2	4
10	102.48	4.5
11	102.76	5
12	103.03	5.5
13	103.31	6
14	103.59	6.5

Hinweis:
Temperaturwerte sind in °C einzugeben.

Grafik anzeigen Grafik aktualisieren

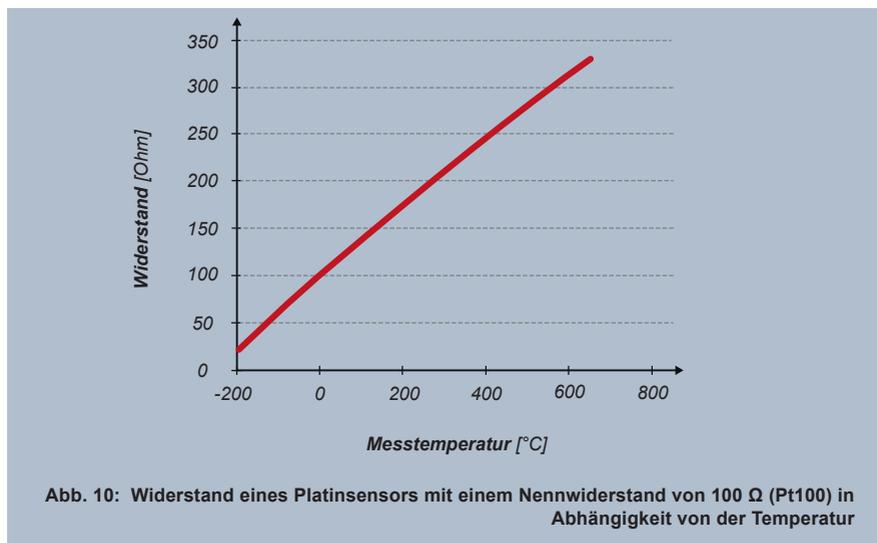
Abb. 8: Screenshot aus dem Konfigurationsprogramm, Eingabe der Stützstellen

3 Der Platinsensor und die Widerstandsthermometer

Dieses Kapitel behandelt zu Beginn die unterschiedlichen Platinsensoren. Es wird aufgezeigt, wie die Toleranz von Platinsensoren und Widerstandsthermometern definiert ist und wie man die Thermometer an Auswerteeinheiten anschließt. Am Ende des Kapitels werden die Möglichkeiten von Temperaturmessumformern – im Zusammenhang mit Widerstandsthermometern – beschrieben.

3.1 Grundsätzliches zum Platinsensor

Platinsensoren sind die erste Wahl für die Messung von Temperaturen bis 600 °C in industriellen Anwendungen. Für die Gewährleistung eines universellen Austausches sind die Sensoreigenschaften in der DIN EN IEC 60751 standardisiert.



Auch das Verhalten von Platinsensoren (Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur) kann über das Polynom höherer Ordnung beschrieben werden:

$$R(\vartheta) = R_0 \times (1 + A \times \vartheta + B \times \vartheta^2 + \dots)$$

R_0 = Nennwert des Widerstandsthermometers

ϑ = Temperatur in °C

Für den Platinsensor sind der DIN EN IEC 60751 die Koeffizienten für positive Temperaturen zu entnehmen:

$$A = 3,908 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$$

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

Für Temperaturen im negativen Bereich kommt noch ein dritter Koeffizient hinzu.

Im industriellen Bereich (Prozesstechnik, Maschinenbau etc.) werden vorrangig Sensoren mit einem Nennwiderstand von 100 Ω (Pt100) eingesetzt. Sensoren mit einem Nennwiderstand von 1000 Ω (Pt1000) kommen häufig zum Einsatz, wenn ein Betrieb über 2 Leiter erfolgen soll. Das ist beispielsweise in der Branche Heizung/Klima/Lüftung der Fall. Durch den hohen Nennwert sinkt der Einfluss des Leitungswiderstands auf ein Zehntel gegenüber dem eines Pt100-Fühlers. Der Sachverhalt wird im weiteren Verlauf dieses Buches thematisiert.

Im Bereich der Temperatursensoren für Wärmemengenzähler finden außerdem Pt500 Einsatz. Prinzipiell sind alle Nennwiderstände möglich.

In der Norm sind zudem die Widerstandswerte für ein Pt100 als Tabelle aufgeführt:

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100,000	100,391	100,781	101,172	101,562	101,953	102,343	102,733	103,123	103,513	103,903
10	103,903	104,292	104,682	105,071	105,460	105,849	106,238	106,627	107,016	107,405	107,794
20	107,794	108,182	108,570	108,959	109,347	109,735	110,123	110,510	110,898	111,286	111,673
30	111,673	112,060	112,447	112,835	113,221	113,608	113,995	114,382	114,768	115,155	115,541
40	115,541	115,927	116,313	116,699	117,085	117,470	117,856	118,241	118,627	119,012	119,397
50	119,397	119,782	120,167	120,552	120,936	121,321	121,705	122,090	122,474	122,858	123,242
60	123,242	123,626	124,009	124,393	124,777	125,160	125,543	125,926	126,309	126,692	127,075
70	127,075	127,458	127,840	128,223	128,605	128,987	129,370	129,752	130,133	130,515	130,897
80	130,897	131,278	131,660	132,041	132,422	132,803	133,184	133,565	133,946	134,326	134,707
90	134,707	135,087	135,468	135,848	136,228	136,608	136,987	137,367	137,747	138,126	138,506
100	138,506	138,885	139,264	139,643	140,022	140,400	140,779	141,158	141,536	141,914	142,293

Tabelle 1: Widerstandswerte für ein Pt100 bei Temperaturen von 0 bis 110 °C (Auszug aus DIN EN IEC 60751)

Der Tabellenauszug listet zeilenweise die Widerstandswerte für ein Pt100 bei Temperaturen von 0 °C (100 Ω , erste Zeile, links) bis 110 °C (142,293 Ω , letzte Zeile, rechts) auf. Die Tabelle kann auch für ein Pt1000 verwendet werden, dann sind die jeweiligen Widerstandswerte mit dem Faktor 10 zu multiplizieren.

Die Festschreibung der Widerstandswerte in der Norm ist sehr wichtig, so wird die Austauschbarkeit der Sensorik gewährleistet. Der Anwender muss das Verhalten des Sensors jedoch nicht nachvollziehen: Nach dessen Anschluss an die Auswerteeinheit wird an dieser bei universellen Analogeingängen die Eingangsart „Widerstandsthermometer“ eingestellt und als Linearisierung beispielsweise „Pt100“ ausgewählt. Die Auswerteeinheit bildet aus dem Widerstandswert automatisch die Temperatur und diese wird angezeigt.

3.2 Ausführungen von Platinsensoren

In der Industrie haben sich seit vielen Jahren Dünnschichtwiderstände durchgesetzt, mit diesen können Temperaturen bis 600 °C gemessen werden. Mit speziellen Ausführungen ist die Messung von noch höheren Temperaturen möglich. Bis zur Mitte der 1980er-Jahre bestanden Platinsensoren aus einem gewickelten Platindraht. Diese Art der Sensorik ermöglicht die Messung bis 800°C, sie kommt aber heute nur noch sehr selten zum Einsatz.

3.2.1 Die Dünnschichtwiderstände

Motivation für die Entwicklung der Dünnschichtwiderstände bzw. der Platin-Chip-Temperatursensoren war der Bedarf an einer kostengünstigen Alternative zu der drahtgewickelten Sensorik. Zum Einsatz kommen meist Ausführungen mit Anschlussdrähten oder die in SMD-Bauform.

Platin-Chip-Temperatursensoren bestehen aus einem Keramikträger, auf den durch Sputtern oder Bedampfen eine dünne Platinschicht aufgebracht wird. Die Stärke der Schicht beträgt 0,5 bis 1 µm.

JUMO liefert die Temperatursensoren mit Anschlussdrähten in verschiedenen Bauformen. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen in folgenden Eigenschaften:

- Material des Anschlussdrahtes (Silber, Platin, Palladium, Nickel, Nickel vergoldet oder Nickel verzinkt)
- Anschlussmethode (Weichlöten, Hartlöten, Crimpen oder Schweißen)
- Einsatztemperatur (von -70 °C bis max. +600 °C)

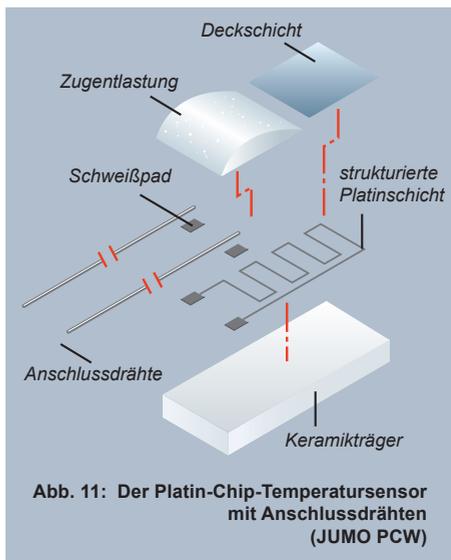


Abb. 11: Der Platin-Chip-Temperatursensor mit Anschlussdrähten (JUMO PCW)

Bei den Platin-Chip-Temperatursensoren in SMD-Bauform gibt es im Vergleich zu den Sensoren mit Anschlussdrähten nicht so viele unterschiedliche Ausführungen. Das Hauptunterscheidungsmerkmal ist hier die Platzierung der Kontaktfläche. Anders als Bauformen mit Anschlussdrähten sind SMD-Temperatursensoren speziell für die automatische Bestückung auf Leiterplatten in Großserienfertigung konzipiert.



In der Regel finden SMD-Sensoren mit Rundumkontakt Verwendung (Abb. 12, links). Die Ausführungen mit einseitigem Kontakt (Abb. 12, rechts) bieten einen hohen Isolationswiderstand durch die Isolierung von der Platine abgewandten Seite. Diese Variante ist prädestiniert für enge Platzverhältnissen.

JUMO-Dünnschichtsensoren weisen eine sehr gute Langzeitstabilität auf. Eine pauschale Aussage hinsichtlich der Drift über die Einsatzzeit kann dennoch nicht gegeben werden, deren Höhe hängt von der maximalen Einsatztemperatur und vor allem von den Temperaturzyklen ab.

3.2.2 Die drahtgewickelten Sensoren

Bis zur Einführung der Platinchipsensoren kamen ausschließlich drahtgewickelte Sensoren zum Einsatz. Bei diesen ist eine Platinwendel beispielsweise in Glas eingeschmolzen oder wie beim Keramiksensor in Pulver eingebettet.

Im Keramikwiderstand (Abb. 13) ist die Messwicklung in Aluminiumoxidpulver eingebettet – so hat sie Bewegungsfreiheit bei thermischer Ausdehnung. Der Aufbau beugt einer Drift aufgrund mechanischer Kräfte vor, schränkt aber die Vibrationsfestigkeit ein. Mit dem Sensor sind Messungen von bis zu 800 °C möglich.

Bei den Sensoren aus Glas (ohne Abb.) befindet sich der Platindraht fest eingeschmolzen in einer Glashülle. Mit einem Temperaturwechsel ist er einer mechanischen Verformung ausgesetzt, was sich negativ auf das Driftverhalten auswirkt.

Drahtgewickelte Temperatursensoren finden in der heutigen Zeit selten Verwendung. Sie kommen beispielsweise noch in ausgewählten Anwendungen in der Prozesstechnik und in der Petrochemie zum Einsatz.

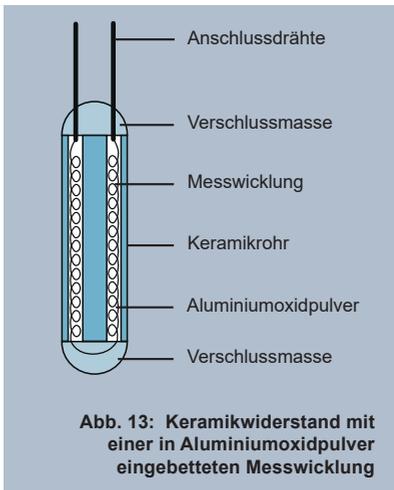


Abb. 13: Keramikwiderstand mit einer in Aluminiumoxidpulver eingebetteten Messwicklung

3.3 Genauigkeitsklassen von Widerstandssensoren und konfektionierten Thermometern

In der DIN EN IEC 60751 sind Genauigkeitsklassen für Dünnschichtsensoren definiert:

Klasse	Gültigkeitsbereich in °C	Grenzabweichung in °C
F 0,1	0 bis 150	$(\pm 0,1 + 0,0017 t)$
F 0,15	-30 bis +300	$(\pm 0,15 + 0,002 t)$
F 0,3	-50 bis +500	$(\pm 0,3 + 0,005 t)$
F 0,6	-50 bis +600	$(\pm 0,6 + 0,01 t)$

Tabelle 2: Grenzabweichung von Platin-Chip-Temperatursensoren entsprechend DIN EN IEC 60751

Die jeweilige Grenzabweichung wird bei der zu messenden Temperatur bestimmt. Beispielhaft findet ein Sensor der Klasse F 0,3 Verwendung und die Messtemperatur ist 300 °C. Für die Bestimmung der Grenzabweichung wird der Betrag der Temperatur in die Formel eingesetzt: $(\pm 0,3 + 0,005 \times |300 \text{ °C}|) = \pm 1,8 \text{ K}$.

Zu beachten ist, dass die Klassen mit den geringeren Toleranzen in einem engeren Temperaturbereich gelten.

Nach ihrer Produktion werden Dünnschichtwiderstände zuerst auf den Nennwiderstand getrimmt (z. B. 100Ω bei 0°C). Hierzu werden Kurzschlusswiderstände geöffnet.

Nach dem Trimmen auf den Nennwiderstand wird jeder Temperatursensor vermessen, seine Genauigkeitsklasse wird bestimmt und er wird nach seiner Klasse selektiert.

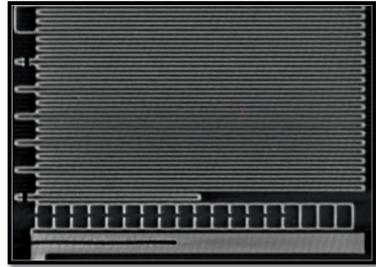


Abb. 14: Das Innere eines Dünnschichtwiderstandes: Mäanderstruktur und Kurzschlussbrücken

Die Norm DIN EN IEC 60751 enthält auch die Klassen für die relativ selten verwendeten drahtgewickelten Sensoren. Diese berechnen sich mit den gleichen Formeln. Hinsichtlich der Benennung wird F durch ein W ersetzt (so wird beispielsweise F 0,3 zu W 0,3). Der jeweilige Temperaturgültigkeitsbereich der Klassen für die drahtgewickelten Sensoren (W 0,...) ist größer als der für die Dünnschichtsensoren (F 0,...).

Auch für konfektionierte Thermometer sind in der DIN EN IEC 60751 Genauigkeitsklassen angegeben. Die Formeln sind identisch mit denen für die Sensoren. Ein Widerstandsthermometer mit einem Dünnschichtwiderstand der Genauigkeitsklasse F 0,1 (bzw. F 0,15/F 0,3/F 0,6) verfügt entsprechend über die Toleranzklasse AA (bzw. A/B/C). Die Toleranzklasse trifft jedoch keine Aussage über den Gesamtfehler des Thermometers.

3.4 Pt100 und Pt1000

In industriellen Anwendungen ist das Pt100 häufiger als das Pt1000 anzutreffen. In der Regel ist es jedoch zweitrangig, welches der beiden Elemente eingesetzt wird, mit Ausnahme des Anschlusses in Zweileitertechnik – mehr dazu in Kapitel 3.5.1.

Die Dominanz des Pt100 kann man historisch begründen. Als die drahtgewickelten Widerstandssensoren eingeführt wurden, musste der Nennwert der Elemente mindestens so hoch gewählt werden, dass die Auswertung des Widerstandes möglich war. Auf der anderen Seite konnte der Widerstand aus Kostengründen nicht beliebig hoch festgelegt werden. Ein höherer Nennwert bedeutete bei den drahtgewickelten Widerständen immer einen höheren Platineinsatz und damit höhere Kosten. Der Kompromiss zwischen guter Auswertbarkeit und nicht ganz so hohen Kosten war ein Nennwert von 100Ω . Die Dominanz des Pt100 hält daher in industriellen Anwendungen bis in die heutige Zeit an.

3.5 Die Anschlussarten

Für Widerstandsthermometer finden drei unterschiedliche Anschlussarten Verwendung:

3.5.1 Der Zweileiteranschluss

Beim **Zweileiteranschluss** wird der Sensor über zwei Leiter angebunden.

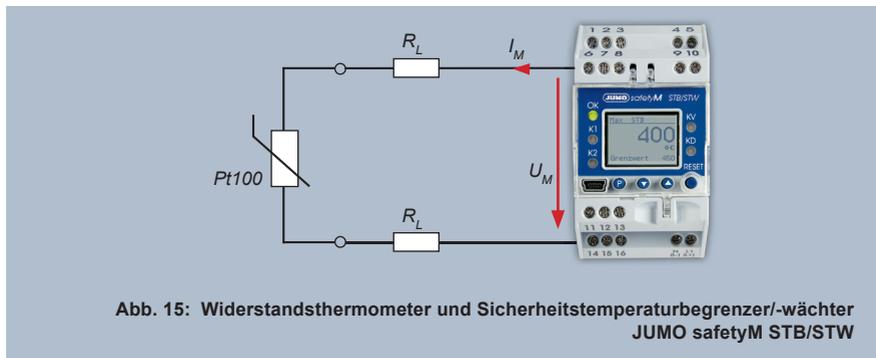


Abb. 15: Widerstandsthermometer und Sicherheitstemperaturbegrenzer/-wächter JUMO safetyM STB/STW

Die Auswerteeinheit prägt einen Messstrom in den Messkreis. Die entstehende Spannung wird gemessen, der ohmsche Widerstand berechnet und aus diesem die Temperatur ermittelt. Im Widerstand sind aber auch die jeweiligen Leitungswiderstände enthalten. Deshalb wird der Widerstand zu hoch bestimmt und entsprechend ist auch die ermittelte Temperatur zu hoch.

Die positive Temperaturverschiebung muss durch das Feldgerät beseitigt werden. Zur Bestimmung des Offsets kann die Temperatur mit einem zweiten Thermometer gemessen und dieser Wert als Referenz genutzt werden. Der Offset am Feldgerät wird in negativer Richtung so verändert, dass dieses ebenfalls die Referenztemperatur anzeigt.

Die meisten JUMO-Feldgeräte ermöglichen auch die Eingabe des Leitungswiderstandes. Der entstehende Temperaturoffset wird dann automatisch für den eingegebenen Widerstand kompensiert. Die Funktionalität kann genutzt werden, wenn die Ermittlung des Leitungswiderstandes möglich ist. So beispielsweise bei einem Thermometer mit Anschlusskopf (Abb. 16, links) – an diesem kann die Verbindungsleitung abgeklemmt und durchgemessen werden. Alternativ kann bei einem Fühler mit Anschlussleitung der Leitungswiderstand aus der Leitungsspezifikation und der Leitungslänge ermittelt werden (Abb. 16, rechts),



Abb. 16: Temperaturfühler mit Anschlusskopf und Anschlussleitung

Die Kennlinie für beispielsweise ein Pt100 gilt nur für den Sensor und nicht für den konfektionierten Fühler in Zweileitertechnik. Die mit zwei Leitern ausgeführten Fühler verfügen immer über einen positiven Temperaturoffset. Bei den Temperaturfühler mit Anschlussleitung kann bei entsprechend langer Leitung die Abweichung einige Kelvin betragen.

Die folgende Tabelle gibt Aufschluss darüber, welcher Temperaturoffset sich bei unterschiedlichen Kupferquerschnitten pro Meter Leitungslänge ergibt:

Querschnitt	Widerstand pro Meter	ΔT -Pt100	ΔT -Pt1000
0,14 mm ²	253 m Ω /m	0,66 K	0,066 K
0,22 mm ²	161 m Ω /m	0,41 K	0,041 K
0,34 mm ²	104 m Ω /m	0,27 K	0,027 K
0,50 mm ²	71 m Ω /m	0,18 K	0,018 K

Tabelle 3: Widerstand von Kupferleitungen und resultierender Offset pro m für ein Pt100 bzw. Pt1000 bei 20 °C

Mit einem Pt100 ergibt sich bei ca. 0,4 Ω Leitungswiderstand ein Offset von 1 K. Bei einem Pt1000 entsteht 1 K Offset erst bei ca. 4 Ω Leitungswiderstand.

Nebenbei sei bemerkt, dass der Widerstand der Anschlussleitung von der Umgebungstemperatur abhängt. Das bedeutet: Auch nach exaktem Abgleich wird sich mit wechselnder Umgebungstemperatur erneut eine Nullpunktverschiebung ergeben. Diese Abweichung ist relativ gering, solange der Leitungswiderstand relativ klein im Vergleich zum Sensorwiderstand ist.

Hier ein Beispiel:

Ein Widerstandsthermometer ist über eine 10 Meter lange Kupferleitung (Querschnitt 0,22 mm²) mit der Auswerteeinheit verbunden. Der Leitungsabgleich wurde bei 10 °C durchgeführt. Be trägt die Umgebungstemperatur 35 °C, entsteht durch den höheren Widerstand der Kupferleitung ein Leitungsoffset und es wird eine um 0,357 K zu hohe Temperatur angezeigt.

Herleitung: Der Leitungswiderstand beträgt bei 10 °C etwa 1,54 Ω . Der Temperaturkoeffizient von Kupfer liegt bei 0,0039 x K⁻¹, und so steigt der Widerstand bei einer Umgebungstemperatur von 35 °C um 0,15 Ω (Rechnung: (35 °C - 10 °C) x 0,0039 x K⁻¹ x 1,54 Ω). Dieser zusätzliche Leitungsoffset wird nicht kompensiert. Der Temperaturoffset durch 0,4 Ω Leitungswiderstand beträgt 1 K, und so wird sich durch die Erhöhung um 0,15 Ω ein Offset von 0,375 Kelvin ergeben.

Der Zweileiteranschluss ist nicht für Präzisionsmessungen geeignet.

Bei Widerstandsthermometern in **Drei- oder Vierleitertechnik** entsteht kein Leitungsoffset. Die DIN EN IEC 60751 gibt deshalb klar vor, dass die Widerstandsthermometer besser als Klasse B entsprechend mit drei oder vier Leitern ausgeführt sein müssen. Dies gilt für die Widerstandsthermometer mit Anschlussleitung (hier fällt der Leitungswiderstand relativ groß aus), aber auch für die Thermometer mit Anschlusskopf oder Anschlussstecker (diese verfügen über einen relativ geringen Leitungswiderstand).

3.5.2 Der Dreileiteranschluss

Auch beim **Dreileiteranschluss** wird der Messstrom in den Messkreis eingepreßt und die abfallende Spannung gemessen (Abb. 17). Wie bereits beim Zweileiteranschluss thematisiert, ist dies die Spannung, die am Widerstandssensor und an den Zuleitungen abfällt.

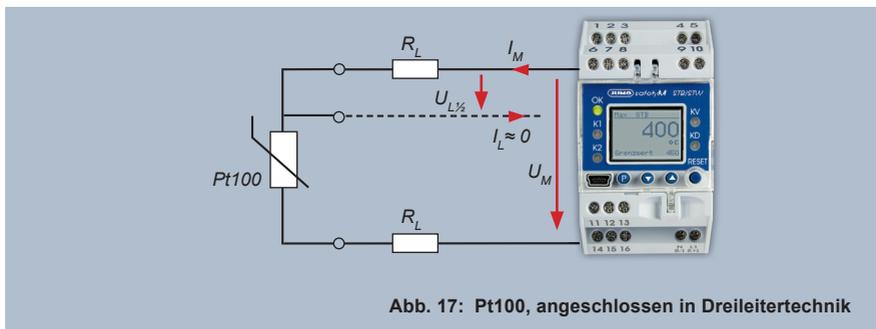


Abb. 17: Pt100, angeschlossen in Dreileitertechnik

Mithilfe eines dritten Leiters wird der Spannungsabfall an einer Zuleitung gemessen ($U_{L/2}$). Ausgehend davon, dass der Spannungsabfall an der zweiten Zuleitung den gleichen Betrag aufweist, wird von der Messspannung U_M der doppelte Wert von $U_{L/2}$ abgezogen, und so wird praktisch der Spannungsabfall am Widerstandssensor bestimmt. Mit dieser Spannung und dem Messstrom wird exakt der Widerstand des Widerstandssensors ermittelt. Wenn beide Zuleitungswiderstände gleich groß sind, entsteht bei der Dreileitertechnik kein Fehler durch die Verdrahtung.

Eine Restunsicherheit bleibt beim Anschluss über drei Leiter: Sollte der Widerstand der Adern im gemeinsamen Leitungsmantel streuen, ergibt sich eine Abweichung in der Temperaturanzeige.

Weichen beispielsweise die Widerstandswerte der Litzen (Annahme: 30 m Kupferleitung mit $0,22 \text{ mm}^2$) um 3 % voneinander ab, beträgt der Anzeigefehler etwa 0,2 K.

In der Regel differieren die Widerstandswerte der einzelnen Adern nur vernachlässigbar voneinander und der Messfehler fällt sehr gering aus. Sonst wäre der Dreileiteranschluss nicht der Standard in der industriellen Messtechnik.

3.5.3 Der Vierleiteranschluss

Der Vierleiteranschluss toleriert selbst unterschiedliche Leitungswiderstände:

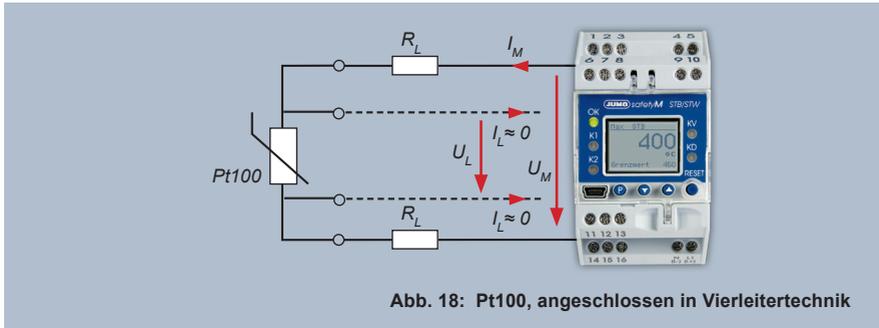


Abb. 18: Pt100, angeschlossen in Vierleitertechnik

Das Feldgerät prägt den Messstrom ein und mithilfe des dritten und vierten Leiters wird der Spannungsabfall am Sensor gemessen. Durch den Messstrom und die Spannung am Sensor wird exakt der Widerstandswert des Widerstandssensors bestimmt. Bei diesem Anschluss führen selbst asymmetrische Leitungswiderstände nicht zu Messabweichungen. Der Vierleiteranschluss findet Anwendung, wenn sich eine eventuelle Asymmetrie in der Anschlussleitung nicht negativ auf das Messergebnis auswirken darf. Beispiele sind Laboranwendungen und die Verwendung von Prüfmitteln für die vergleichende Temperaturmessung.

3.5.4 Anschluss von Widerstandsthermometern in Zweileitertechnik mit Anschlusssockel bzw. Anschlussstecker

Unter Umständen müssen in Zweileitertechnik ausgeführte Widerstandsthermometer über eine lange Anschlussleitung angeschlossen werden. Handelt es sich beispielsweise um Thermometer mit Anschlusskopf, kann die Anschlussart gewechselt werden (Abb. 19, links).



Abb. 19: Anschluss eines Widerstandsthermometers, ausgeführt in Zwei- und Vierleitertechnik

Die interne Verbindungsleitung des Widerstandsthermometers in Zweileitertechnik (Abb. 19, links) verfügt bis zur Klemmstelle über einen relativ geringen Widerstand bzw. Temperaturoffset. Ab dieser Stelle kann der Anschluss in Drei- oder Vierleitertechnik fortgesetzt werden, und so ergibt sich durch die externe Anschlussleitung kein zusätzlicher Temperaturoffset. Ideal ist es aber, wenn bereits der Fühler mit 3 oder 4 Leitern ausgestattet ist und diese durch die Anschlussleitung fortgesetzt werden – dann ergibt sich auch durch die internen Anschlussleitungen kein Temperaturoffset (Abb. 19, rechts).

Die Anschlussleitungen in den Thermometern sind üblicherweise aus Silber. Ab Temperaturen von ca. 400 °C kommen jedoch Anschlussleitungen aus Nickel bzw. Nickel-Chrom zum Einsatz. Der spezifische Widerstand von Nickel ist viermal höher als der von Silber, und so fällt auch der Leitungsoffset viermal höher aus. So begründet, sollten die Thermometer für Anwendungen über 400 °C immer mindestens in Dreileitertechnik ausgeführt sein.

3.6 Länge der Anschlussleitung

Um auf die maximale Leitungslänge zwischen Thermometer und Auswerteeinheit zu schließen, sind in der Dokumentation für die Auswerteeinheiten maximal zulässige Leitungswiderstände angegeben. Für einen Messumformer ist beispielsweise folgende Information zu entnehmen: „Maximaler Leitungswiderstand: 50 Ω je Leitungssader“

Leitungswiderstände in dieser Größenordnung sind für den **Zweileiterbetrieb** möglich, aber nicht sinnvoll. Die sich mit 100 Ω Leitungswiderstand ($2 \times 50 \Omega$) ergebende Temperaturverschiebung wird nach Eingabe des entsprechenden Offsets am Feldgerät kompensiert. Mit der Veränderung der Umgebungstemperatur wird sich der Leitungswiderstand jedoch ändern und es entsteht erneut eine Temperaturverschiebung. Mit dem genannten maximal möglichen Leitungswiderstand ergibt sich bei einem Pt100 mit 10 K höherer Umgebungstemperatur ein Messfehler von ebenfalls 10 K.

Herleitung: Die häufig verwendeten Kupferleitungen verfügen über einen Temperaturkoeffizienten von 0,39 %/K. So steigt beispielsweise der Widerstand der Anschlussleitung mit 10 K höherer Umgebungstemperatur um $3,9 \Omega$ ($10 \text{ K} \times 0,39 \text{ \%}/\text{K} \times 2 \times 50 \Omega$). Der Widerstand am Eingang des Feldgerätes steigt somit allein durch die um 10 K höhere Umgebungstemperatur um fast 4 Ω. Hierdurch erhöht sich bei Verwendung eines Pt100 die Temperaturanzeige um ca. 10 K.

Nebenbei bemerkt: 50 Ω entstehen bei Verwendung einer Kupferleitung mit 0,22 mm² erst ab einer Länge von ca. 300(!) m.

Die Messumformer werden über ein Konfigurationsprogramm an die Anwendung angepasst. Abb. 20 zeigt den Screenshot aus dem Programm für einen beispielhaften Messumformer. Mit der Einstellung „Widerstandsthermometer (2-Leiter)“ und „Pt100“ wurde der Messumformer an ein Pt100 angepasst. Als Leitungswiderstand wurde der maximal mögliche Wert ($100 \Omega = 2 \times 50 \Omega$) eingestellt.

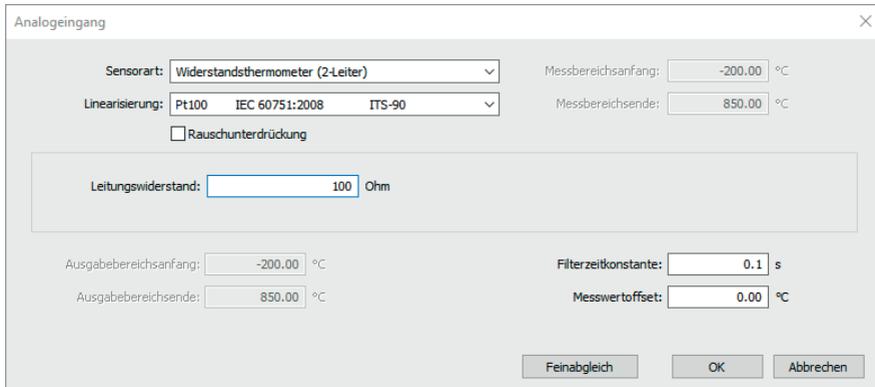


Abb. 20: Einstellung des Leitungswiderstandes von 100 Ω bei Betrieb eines Pt100 in Zweileitertechnik

Große Leitungslängen und damit hohe Leitungswiderstände bleiben im **Dreileiterbetrieb** in der Regel ohne Nachteil. Eine Ausnahme bilden Leitungen, deren Adern über unterschiedliche Widerstände verfügen – hier steigt der Messfehler durch die Asymmetrie mit dem Leitungswiderstand.

Hier ein extremes Beispiel: Die in Kapitel 3.5.2 erwähnte Leitung (0,2 mm², 3 % Asymmetrie) verfügt über eine Länge von 620(!) m. Die Litzenwiderstände dieser Leitung entsprechen etwa den genannten 50 Ω . Dadurch, dass die Widerstände um 3 % voneinander abweichen, ergibt sich im Dreileiterbetrieb ein Messfehler von fast 4 K. Die Abweichung kann durch Einstellung eines Offsets am Gerät beseitigt werden.

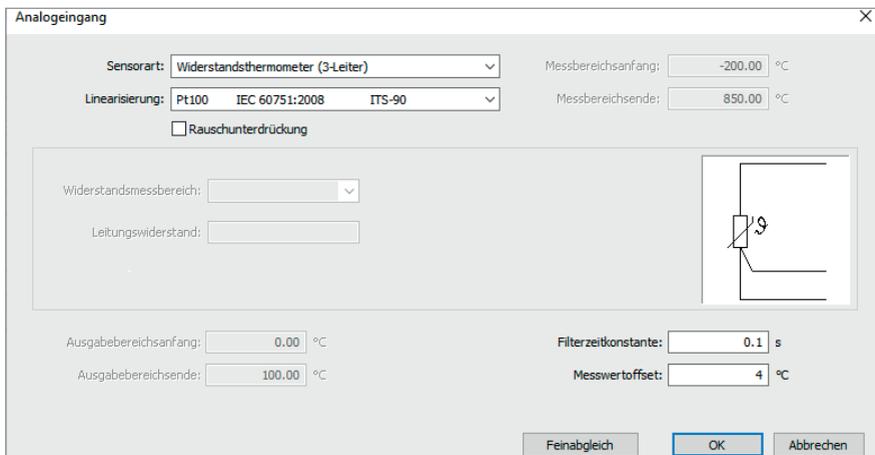


Abb. 21: Einstellung eines Messwertoffsets bei Betrieb eines Pt100 in Dreileitertechnik

Lediglich im Vierleiterbetrieb verursachen die hohen Leitungswiderstände in keinem Fall Messfehler und es ist auch kein Abgleich am Feldgerät erforderlich.

Das Leitungsmaterial:

Aufgrund der kleinen Messströme müssen bei Widerstandsthermometern Spannungen von < 100 mV ausgewertet werden. Die relativ kleinen Signale machen in einer EMV-belasteten Umgebung abgeschirmte Signalleitungen erforderlich.

3.7 Temperaturmessumformer und Widerstandsthermometer

Temperaturmessumformer bereiten das Signal von Widerstandsthermometern auf und geben die Temperatur als linearisiertes Stromsignal (4 bis 20 mA) aus. Es besteht somit ein linearer Zusammenhang zwischen dem Ausgangssignal (4 bis 20 mA) und der Temperatur (zum Beispiel 0 bis 400 °C). Die Messumformer für den Einbau in einen Anschlusskopf sind in der Regel Zweidrahtmessumformer – sie verhalten sich als Stromsenke:

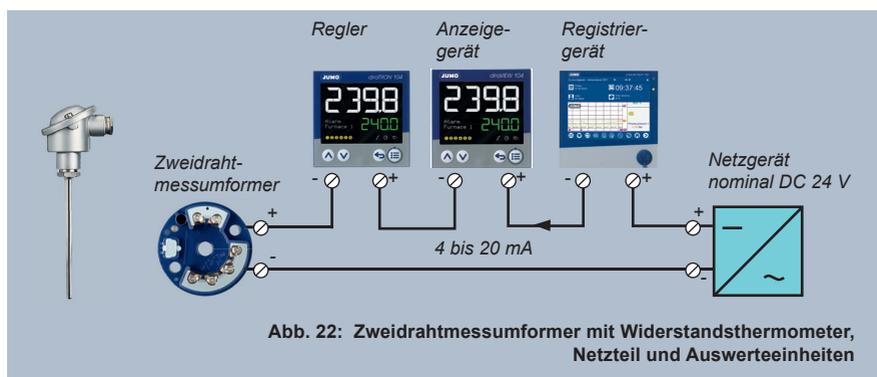


Abb. 22: Zweidrahtmessumformer mit Widerstandsthermometer, Netzteil und Auswerteeinheiten

Abb. 22 zeigt den Messumformer, der in das daneben abgebildete Widerstandsthermometer mit Anschlusskopf eingebaut ist. Der Messkreis wird über das Netzgerät gespeist und der Zweidrahtmessumformer „steuert“ den Strom in Abhängigkeit der Temperatur. Das Stromsignal wird nie kleiner als 4 mA und selbst mit diesem Minimalstrom reicht die zugeführte Energie zum Betrieb des Messumformers. Das Stromsignal wird über die drei Auswerteeinheiten geführt, und so steht diesen die Temperatur zur Verfügung.

Die Anschlussköpfe von Widerstandsthermometern sind standardisiert (siehe DIN EN 50446). Für den sogenannten B-Kopf (wie in Abb. 22) existieren Kopfmessumformer, die in diese Köpfe passen. Das Thermometer mit Messumformer liefert dann bereits ein linearisiertes Ausgangssignal zum Anschluss an beispielsweise eine SPS. Für die Messumformer existieren weiterhin Versionen zur Montage auf Hutschiene (Abb. 23).



Abb. 23: Messumformer JUMO dTRANS T06 Ex zur Montage auf Hutschiene

Die Messumformer kommen zum Einsatz ...

- wenn die Folgeelektronik keinen direkten Anschluss eines Widerstandsthermometers erlaubt, sondern nur ein Einheitssignal aufnehmen kann
- wenn nur zwei Signalleitungen für jede Messstelle existieren
- wenn Zusatzfunktionen benötigt werden, wie die Überwachung auf Grenzwerte, oder wenn die Platzierung der Sensorik im Ex-Bereich erforderlich ist

Die Messumformer sind in der Regel frei programmierbar und zur Inbetriebsetzung sind nur wenige Schritte notwendig. Die grundsätzlich erforderlichen Einstellungen sind in Abb. 24 und Abb. 25 gezeigt.

The screenshot shows the 'Analogeingang' configuration window. The settings are as follows:

- Sensorart: Widerstandsthermometer (3-Leiter)
- Linearisierung: Pt100 IEC 60751:2008 ITS-90
- Messbereichsanfang: -200.00 °C
- Messbereichsende: 850.00 °C
- Rauschunterdrückung
- Widerstandsmessbereich: (dropdown menu)
- Sensorfaktor: 1.00
- Leitungswiderstand: (input field)
- Ausgabebereichsanfang: 0.00 °C
- Filterzeitkonstante: 0.1 s
- Ausgabebereichsende: 100.00 °C
- Messwertoffset: 0.00 °C

Buttons at the bottom: Feinabgleich, OK, Abbrechen.

Abb. 24: Konfiguration des Analogeingangs für den Messumformer JUMO dTRANS T06

Die Sensorart wird eingestellt und die jeweilige Linearisierung ausgewählt (Abb. 24). Unter „Signalart“ wird sehr häufig das 4-bis-20-mA-Signal ausgewählt (Abb. 25). Unter „Ausgabebereich“ werden die Temperaturen eingestellt, bei denen der Messumformer 4 mA und 20 mA ausgeben soll.

Entsprechend der Konfiguration wie in Abb. 25 gibt der Messumformer ein Signal 4 bis 20 mA aus, was einer Temperatur von 0 bis 100 °C entspricht.

Bei Verwendung von Widerstandsthermometern werden diese auf Kurzschluss (Widerstand ca. 0 Ω) und Bruch (Widerstand unendlich) überwacht. Das Ausgangssignal kann für diesen Fehlerfall eingestellt werden, siehe „Fehlersignal“ (Abb. 25)

Abb. 25: Einstellungen für den Analogausgang eines JUMO dTRANS T06

Im Zusammenhang mit dem Einsatz von Widerstandsthermometern ist abschließend die Einstellung „Sensorfaktor“ erwähnenswert (siehe Abb. 24). Der gemessene Widerstand wird mit diesem Faktor multipliziert, bevor er linearisiert wird. Kommt beispielsweise ein Pt2000 zum Einsatz (für das keine Linearisierung im Feldgerät existiert), wird ein Sensorfaktor von 0,5 eingestellt und so der gemessene Widerstand auf die Hälfte reduziert. Der ermittelte Widerstand entspricht dem eines Sensors mit einem Nennwiderstand von 1000 Ω , und so kann die Linearisierung „Pt1000“ eingestellt werden.

4 Thermoelemente

Thermoelemente generieren eine Spannung, die ein Maß für die gemessene Temperatur ist. Dieses Kapitel beschreibt die Entstehung der Thermospannung und welche Anforderungen Thermoelemente an die Auswerteeinheiten stellen. In der Folge werden die standardisierten Elemente vorgestellt. Es wird erläutert, warum für Thermoelemente keine Kurzschlussdetektion möglich ist und welches Verbindungsmaterial verwendet werden muss. Am Ende des Kapitels wird der Aufbau der Elemente erläutert.

4.1 Allgemeines zu Thermoelementen

Thermoelemente kommen bei Temperaturmessungen von über 600 °C zum Einsatz, ab dieser Temperatur scheiden die Widerstandssensoren in Dünnschichttechnik aus. Thermoelemente bestehen aus der Kombination von zwei Metallen und sie sind im Grundsatz einfach aufzubauen. Die Elemente stellen jedoch erhöhte Anforderungen an die Auswerteelektronik und zeigen im Vergleich zu den Dünnschichtsensoren ein verstärktes Driftverhalten - deshalb sind für Temperaturen unterhalb von 600 °C Widerstandsthermometer die erste Wahl. Aus einer Vielzahl von möglichen Metallkombinationen sind in der DIN EN IEC 60584 einige Thermoelemente standardisiert, und so ist ein problemloser Austausch sichergestellt.

4.2 Der thermoelektrische Effekt

Thermoelemente generieren eine Spannung, die ein Maß für die Temperatur an der Messstelle ist. Verantwortlich dafür ist der thermoelektrische Effekt, dieser wurde erstmals von Thomas Wolfgang Seebeck 1821 beschrieben und wird in der Folge kurz erläutert:

In einem elektrischen Leiter befinden sich Elektronen als Ladungsträger zwischen den Atomgittern (Abb. 26, links). Die Elektronen sind in Bewegung, ihre Geschwindigkeit steigt mit der Temperatur. Herrscht entlang des Leiters eine konstante Temperatur, verfügen alle Elektronen über die gleiche Geschwindigkeit und sie sind überall mit der gleichen Dichte vorhanden.

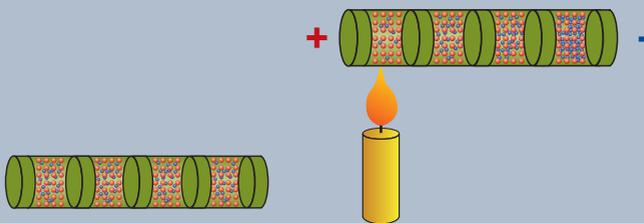
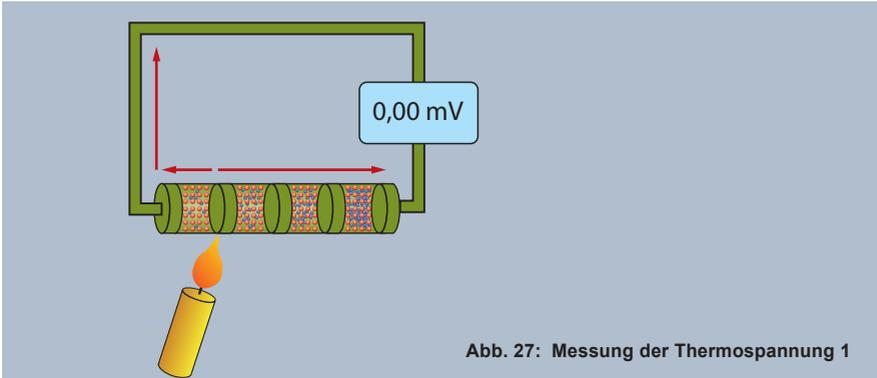


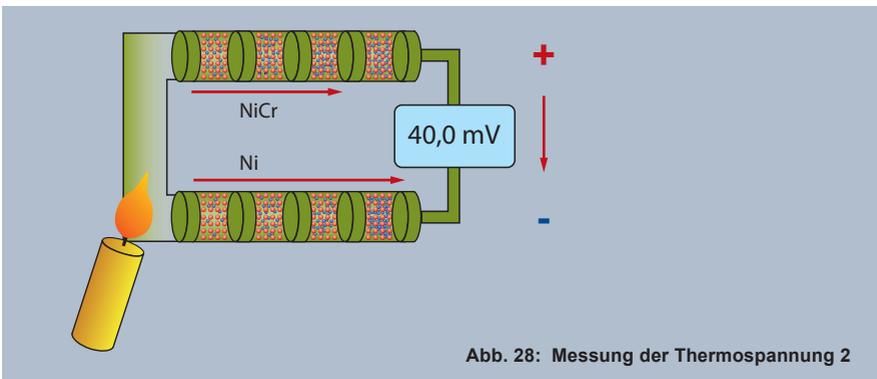
Abb. 26: Ladungsdichte bei gleicher und unterschiedlicher Temperaturverteilung

Wird eine Seite des Leiters erwärmt (Abb. 26, rechts), werden in diesem Bereich die freien Elektronen beschleunigt. Die Elektronen bewegen sich zum kälteren Drahtende hin und an dieser Seite entsteht eine höhere Elektronendichte. Durch die Ladungsverschiebung entsteht eine Thermospannung vom heißen zum kalten Ende. Die Thermospannung ist ein Maß für die Differenztemperatur zwischen den beiden Enden.

Unter Einsatz nur eines Materials kann die Thermospannung nicht ermittelt werden:



In Abb. 27 sind die beiden Enden unter Verwendung des gleichen Drahtes mit einem Spannungsmessgerät verbunden, die gemessene Spannung ist 0 mV. Der Grund hierfür ist, dass in dem Verbindungsdraht die gleiche Thermospannung, aber in umgekehrter Richtung, entsteht. Nutzbar wird die Thermospannung erst mit Verwendung von zwei unterschiedlichen Metallen bzw. Metalllegierungen. Im Standard DIN EN IEC 60584 ist beispielsweise ein Thermoelement definiert, dessen positiver Schenkel aus Nickel und dessen negativer Schenkel aus Nickel-Chrom besteht. Für dieses sehr verbreitete Element findet in der Norm der Kennbuchstabe „K“ Verwendung. Wird die geschweißte Übergangsstelle erwärmt, entstehen in den beiden Schenkeln Thermospannungen unterschiedlicher Höhe. Erklären lässt sich die Differenz durch die unterschiedliche Leitfähigkeit in den Materialien.



Die gemessene Thermospannungsdifferenz ist ein Maß für die Differenztemperatur zwischen der Messstellentemperatur (Temperatur an der Übergangsstelle) und der Temperatur an den Anschlüssen des Voltmeters. Die Thermospannungen in den Schenkeln bleiben unbekannt.

4.3 Auswertung der Thermospannung

In der Norm sind die Thermospannungen der Thermoelemente für ihren Anwendungsbereich in Tabellenform angegeben (siehe den Auszug in Tabelle 4). Die Spannungen gelten, wenn am elektrischen Anschluss des Elementes eine Temperatur von 0 °C herrscht. An dieser Stelle befindet sich die sogenannte Vergleichsstelle und die dort herrschende Temperatur ist die Vergleichsstellentemperatur.

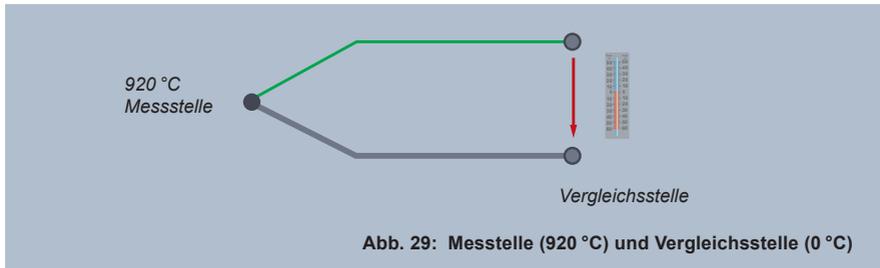


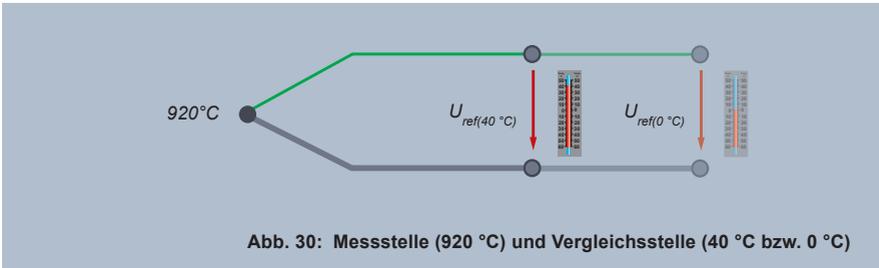
Abb. 29: Messstelle (920 °C) und Vergleichsstelle (0 °C)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357	0,397
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758	0,798
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,163	1,203
30	1,203	1,244	1,285	1,326	1,366	1,407	1,448	1,489	1,530	1,571	1,612
40	1,612	1,653	1,694	1,735	1,776	1,817	1,858	1,899	1,941	1,982	2,023
50	2,023	2,064	2,106	2,147	2,188	2,230	2,271	2,312	2,354	2,395	2,436
60	2,436	2,478	2,519	2,561	2,602	2,644	2,685	2,727	2,768	2,810	2,851
70	2,851	2,893	2,934	2,976	3,017	3,059	3,100	3,142	3,184	3,225	3,267
80	3,267	3,308	3,350	3,391	3,433	3,474	3,516	3,557	3,599	3,640	3,682
90	3,682	3,723	3,765	3,806	3,848	3,889	3,931	3,972	4,013	4,055	4,069
100	4,096	4,138	4,179	4,220	4,262	4,303	4,344	4,385	4,427	4,468	4,509
900	37,326	37,366	37,406	37,446	37,486	37,566	37,566	37,606	37,646	37,686	37,725
910	37,725	37,765	37,805	37,885	37,885	37,965	37,965	38,005	38,044	38,084	38,124
920	38,124	38,164	38,204	38,243	38,283	38,323	38,363	38,402	38,442	38,482	38,522
930	38,522	38,561	38,601	38,641	38,680	38,720	38,760	38,799	38,839	38,878	38,918
940	38,918	38,958	39,037	39,037	39,076	39,116	39,155	39,195	39,235	39,274	39,314
950	39,314	39,353	39,432	39,432	39,471	39,511	39,550	39,590	39,629	39,669	39,708

Tabelle 4: Thermospannungen für ein Thermoelement vom Typ K für unterschiedliche Messtemperaturen und für eine Vergleichsstellentemperatur von 0 °C (Auszug aus DIN EN IEC 60584)

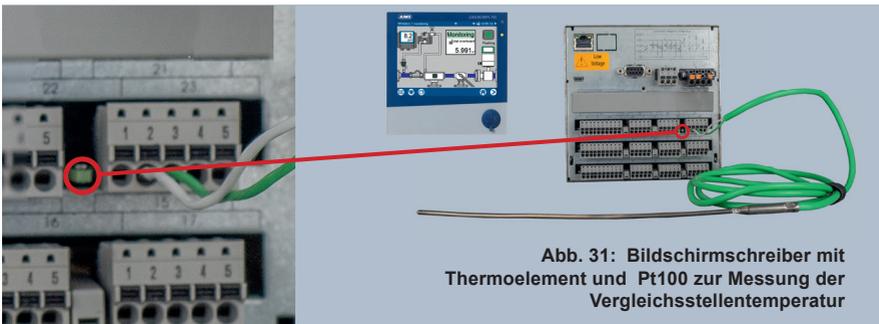
Herrschen an einem Element vom Typ K beispielsweise $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Abb. 29) und an der Vergleichsstelle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, werden $38,124\text{ mV}$ gemessen (siehe Tabellenwert).

Üblicherweise ist die Vergleichsstellentemperatur nicht $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und sie ist auch nicht konstant. Bei einer Vergleichsstellentemperatur von mehr als $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ entsteht eine geringere Thermospannung:



Bei einer Vergleichsstellentemperatur von $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist die gemessene Thermospannung um $1,612\text{ mV}$ geringer (siehe Wert aus Tabelle 4 für $40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Gemessen werden $38,124\text{ mV}$ (Tabellenwert für $920\text{ }^{\circ}\text{C}$), reduziert um $1,612\text{ mV}$ (Tabellenwert für $40\text{ }^{\circ}\text{C}$), dies entspricht einer Spannung von $36,512\text{ mV}$.

Die mit Thermoelementen gemessene Spannung ist immer ein Maß für die Differenz zwischen Mess- und Vergleichsstellentemperatur. Abb. 31 zeigt die Rückseite eines Bildschirmschreibers mit einem angeschlossenen Thermoelement vom Typ K. Der Schreiber misst die Spannung an der Anschlussklemme, an diesem Ort ist die Vergleichsstelle. Aufgrund der gemessenen Spannung kann nicht direkt die Temperatur aus Tabelle 4 entnommen werden, da die Vergleichsstellentemperatur von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ abweicht. Links vom Anschluss ist ein Pt100 markiert (roter Kreis), mit diesem wird die Vergleichsstellentemperatur gemessen. Zu der gemessenen Spannung muss die Thermospannung addiert werden, die durch die Temperaturdifferenz zwischen der Vergleichsstellentemperatur und $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ entstehen würde. Aufgrund der ermittelten Thermospannung kann aus der Tabelle die Temperatur an der Messstelle entnommen werden.



Auf Abb. 30 bezogen, muss das Feldgerät Folgendes leisten:

- Messung der Thermospannung von 36,512 mV
- Messung der Vergleichsstellentemperatur von 40 °C und Bestimmung der zugehörigen Thermospannung (aus Tabelle 1,612 mV)
- Bestimmung der Thermospannung für eine Vergleichsstellentemperatur von 0 °C ($36,512 \text{ mV} + 1,612 \text{ mV} = 38,124 \text{ mV}$)
- Bestimmung der Messstellentemperatur für die Thermospannung von 38,124 mV (aus Tabelle 920 °C)

Die beschriebene Vorgehensweise wird als **interne Temperaturkompensation** bezeichnet.

Auch wenn die Auswertung recht kompliziert wirkt, kann sie doch durch den Anwender mit JUMO-Gerätetechnik recht einfach eingeleitet werden. Nach dem Anschluss des Thermoelementes – unter Berücksichtigung der richtigen Polarität – erfolgen die Einstellungen für den entsprechenden Analogeingang:

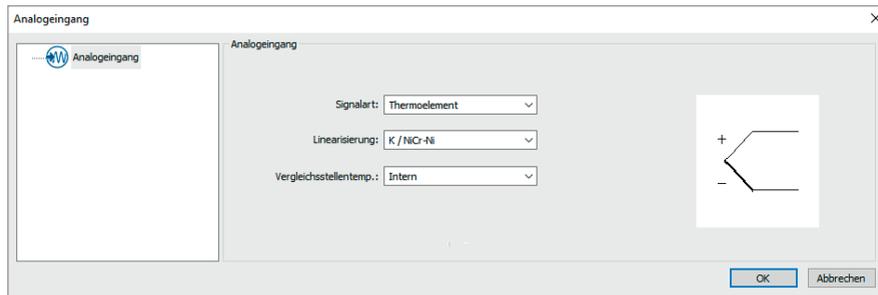


Abb. 32: Einstellungen für den Universaleingang eines JUMO-Feldgerätes bei Verwendung eines Thermoelementes vom Typ K

Nach der Einstellung „Thermoelement“ (unter „Signalart“) wird am Eingang die Spannung gemessen. Durch Auswahl von „K/NiCr-Ni“ unter „Linearisierung“ findet das entsprechende Verhalten des Thermoelementes Berücksichtigung. Nach der Angabe von Vergleichsstellentemperatur „Intern“ wird auf die gemessene Spannung die Thermospannung aufaddiert, die der Vergleichsstellentemperatur entspricht. Aus der ermittelten Spannung wird die Temperatur an der Messstelle bestimmt. Die Messkette ist betriebsbereit und am Feldgerät wird die Temperatur der Messstelle angezeigt.

4.4 Die Thermoelemente der DIN EN IEC 60584

Neben dem erwähnten Thermoelement vom Typ K sind in der Norm DIN EN IEC 60584 weitere Elemente standardisiert. Tabelle 5 listet alle Elemente der Norm mit ihren jeweils empfohlenen Maximaltemperaturen auf:

Element	Empfohlene Maximaltemperatur
Fe-CuNi (J)	350 °C
Cu-CuNi (T)	750 °C
NiCr-CuNi (E)	900 °C
NiCr-Ni (K)	1200 °C
NiCrSi-NiSi (N)	1250 °C
Pt10Rh-Pt (S)	1600 °C
Pt13Rh-Pt (R)	1600 °C
Pt30Rh-Pt6Rh B	1700 °C

Tabelle 5: Thermoelemente der DIN EN IEC 60584 mit den empfohlenen Maximaltemperaturen

Die Auswahl der Thermoelemente erfolgt üblicherweise aufgrund der Einsatztemperaturen. Die Elemente S, R und B sind die Elemente aus Edelmetall. Sie sind für die höchsten Temperaturen geeignet und weiterhin sehr langzeitstabil. Aufgrund der Materialien haben sie aber einen sehr hohen Preis.

Thermoelemente verfügen über eine Polarität, die beim Anschluss zu berücksichtigen ist. In der Symbolik ist die Polarität durch das Vorzeichen angegeben oder alternativ ist der negative Schenkel stärker gezeichnet.

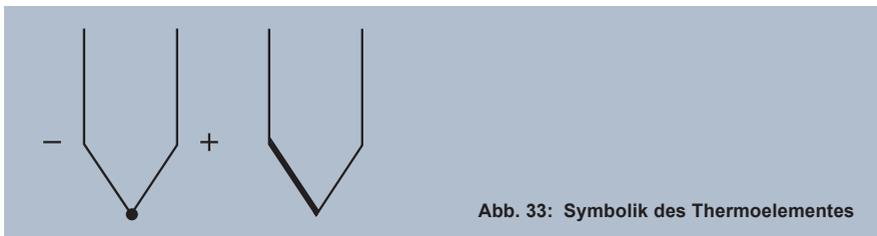
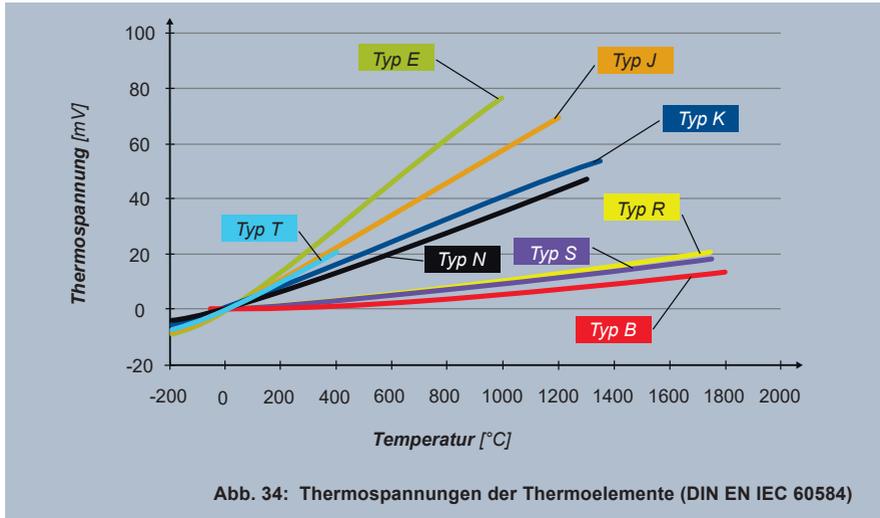


Abb. 33: Symbolik des Thermoelementes

Die Grafik zeigt die Ausgangsspannungen der in der Norm festgeschriebenen Elemente bei einer Vergleichsstellentemperatur von 0 °C:



Die Grafik macht deutlich, dass die Edelmetallelemente (R, S und B) vergleichsweise geringe Thermospannungen ausgeben.

Thermoelemente finden ab maximalen Einsatztemperaturen von 600 °C Verwendung und werden für Temperaturen von bis zu 1700 °C eingesetzt. Aufgrund der hohen Temperaturen sind die Elemente in der Regel nicht mit einer Anschlussleitung ausgestattet, sondern es kommen Elemente mit Anschlusskopf zum Einsatz.



Abb. 35:
Thermoelement
mit Anschlusskopf

4.5 Thermo- bzw. Ausgleichsleitungen sowie thermospannungsfreie Steckverbinder

Die zuvor beschriebene interne Temperaturkompensation funktioniert nur, wenn das Thermoelement an der Auswerteeinheit endet und nicht mit anderen Materialien durchverbunden wird. Das Thermoelement muss bei Bedarf bis zum Anschluss des Feldgerätes verlängert werden. Hierfür kommen Anschlussleitungen zum Einsatz, die aus dem gleichen Material wie das Thermoelement bestehen (Thermoleitungen) oder aus einem Material mit gleichen thermoelektrischen Eigenschaften gefertigt sind (Ausgleichsleitungen). Gleiche thermoelektrische Eigenschaften liegen vor, wenn über die Ausgleichsleitung die gleiche Thermospannung entsteht wie über das Thermoelement (bei jeweils gleicher Temperaturdifferenz). Thermo- und Ausgleichsleitungen sind in Teil 3 der DIN EN IEC 60584 standardisiert. Die Thermoleitungen sind mit dem Kennbuchstaben des Elementes gekennzeichnet, gefolgt von dem Schriftzeichen „X“ (beispielsweise „KX“). Bei Ausgleichsleitungen steht hinter dem Buchstaben des Thermoelementes das Schriftzeichen „C“ (beispielsweise „NC“). Im Detail gelten für die Ausgleichsleitungen unterschiedliche Grenzabweichungen in definierten Temperaturbereichen, dies wird durch einen weiteren Kennbuchstaben gekennzeichnet. So existiert beispielsweise für das Element K eine Ausgleichsleitung „KCA“ mit spezifizierten Grenzabweichungen – gültig für einen Anwendungsbereich von 0 bis 150 °C. Eine weitere Ausführung „KCB“ verfügt über die gleichen Grenzabweichungen, diese sind jedoch nur gültig in einem Anwendungsbereich von 0 bis 100 °C.

Für das jeweilige Thermoelement muss immer die entsprechende Thermo- bzw. Ausgleichsleitung Verwendung finden und der Anschluss mit der entsprechenden Polarität erfolgen. Eine Ausnahme bildet das Thermoelement vom Typ B (siehe auch dessen Charakteristik in Abb. 34). Das Element gibt bei Temperaturen < 200 °C kaum Thermospannung aus. Anstelle einer Ausgleichsleitung darf eine Kupferleitung Verwendung finden. Durch die fehlende Ausgleichsleitung wird die entstehende Thermospannung nur in sehr geringem Umfang reduziert. Teil 3 der DIN EN IEC 60584 zeigt ein Beispiel auf:

Für Thermopaare vom Typ B darf eine Leitung verwendet werden, die aus zwei Kupferleitern besteht. Die erwartete maximale zusätzliche Abweichung innerhalb des Leitungstemperaturbereichs von 0 bis 100 °C beträgt 40 µV. Die entsprechende Temperatur beträgt 3,5 °C, wenn die Messstelle des Thermopaars 1400 °C aufweist.

Erklärung zum Beispiel:

Das Thermoelement vom Typ B endet am Anschlusssockel im Thermometerkopf. Die hier messbare Thermospannung entsteht durch die Differenz zwischen der Messstellentemperatur (beispielhaft 1400 °C) und der Temperatur am Anschlusssockel (Annahme 100 °C). Diese Spannung wird über eine Kupferleitung zum Feldgerät geführt – am Anschluss liegen beispielhaft 20 °C vor. Durch Verwendung einer Ausgleichsleitung würde durch die Temperaturdifferenz (100 bis 20 °C) sehr wenig Thermospannung hinzukommen und die Temperaturanzeige nur sehr wenig variieren (wie in der Norm beschrieben: 3,5 K).

Die Norm empfiehlt für die Thermo- und Ausgleichsleitungen abgeschirmtes Leitungsmaterial. In der Praxis wird die Schirmung jedoch meist nur bei schlechten EMV-Bedingungen realisiert, die Abschirmung wird dann einseitig auf den Potenzialausgleich aufgelegt.

Die Aderenden des Leitungsmaterials werden üblicherweise mit Aderendhülsen versehen. Beim Typ J (Fe-CuNi) ist alternativ die Verzinnung der Aderenden empfohlen, so wird der Eisenschenkel vor Korrosion geschützt.

DIN EN IEC 60584 legt die farbliche Kennzeichnung der Thermo- und Ausgleichsleitungen fest. Der negative Leiter ist weiß und die Farbe für den Pluspol und den Mantel ist für die gängigen Elemente der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Typ des Thermopaars	Farbkennzeichnung des positiven Leiters und des Mantels
J	Schwarz
K	Grün
N	Rosa
B	Grau
S	Orange

Tabelle 6: Farbkennzeichnungen für Thermo- und Ausgleichsleitungen gemäß Teil 3 der DIN EN IEC 60584 (Auszug)

Gestückelte Thermo- und Ausgleichsleitungen können im Prinzip durch Lüsterklemmen verbunden werden. Die Verbindung sollte so geschehen, dass die Teilstücke aufeinanderliegen und durch die Klemmen aufeinanderge-drückt werden (siehe Abb. 36).

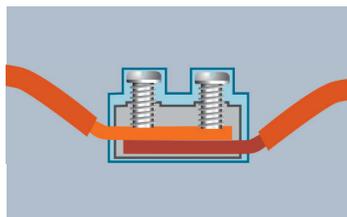


Abb. 36: Verbindung von Teilstücken (Thermo- oder Ausgleichsleitung) über Lüsterklemme

Thermoelemente sind Verbrauchsartikel, und so muss von Zeit zu Zeit ihr Austausch erfolgen. Für eine einfachere Austauschbarkeit werden die Elemente auch über Steckkontakte angeschlossen. Hierzu werden beispielsweise Buchsen in einen Schaltschrank eingelassen und die Thermoelemente sind mit den entsprechenden Steckkontakten ausgestattet. Hier liegt der Sachverhalt so, dass am Anschluss der Buchse (im Schaltschrank) eine andere Temperatur herrscht als auf der Steckerseite (außerhalb vom Schaltschrank). Aufgrund des Temperaturunterschieds muss das Thermoelement im Bereich des Steckkontaktes fortgesetzt werden (ansonsten würde die entstehende Thermospannung geringer ausfallen). Es kommen sogenannte thermospannungsfreie Steckverbinder zum Einsatz, die aus dem gleichen Material wie das Thermoelement gefertigt sind. Und so finden für die unterschiedlichen Thermoelemente (J, K, N ...) die entsprechenden Stecker Verwendung.



Abb. 37: Thermospannungsfreier Steckverbinder mit Klammer zur Befestigung in Fronttafel

Für das jeweils verwendete Thermoelement ist der entsprechende Steckverbinder vorzusehen und dieser unter Berücksichtigung der Polarität anzuschließen.

4.6 Weitere Temperaturkompensationen

Die zuvor beschriebene interne Temperaturkompensation ist das am häufigsten verwendete Verfahren. Hierbei muss die Vergleichsstellentemperatur an den Anschlussklemmen möglichst genau bestimmt werden. Die Messung wird aber immer mit Toleranzen behaftet sein, da sich der Temperaturfühler immer etwas entfernt vom Anschlussstecker befindet. Entsprechende Messabweichungen schlagen sich direkt im Messergebnis nieder. Wird beispielsweise die Vergleichsstellentemperatur mit einer Toleranz von ± 1 K bestimmt, ergibt sich für das Messergebnis eine zusätzliche Toleranz von ebenfalls ± 1 K.

Es existieren noch 2 weitere Kompensationsmöglichkeiten mit dem Ziel, die Vergleichsstellentemperatur genauer zu ermitteln und damit zu einer genaueren Temperaturmessung beizutragen.

Kompensation auf eine konstante Vergleichsstellentemperatur

Für Vergleichsmessungen, beispielsweise während einer Kalibrierung von Temperaturmessketten, kann die Vergleichsstelle nach außen geführt und auf eine bestimmte Temperatur gebracht werden. Diese **Temperatur** wird dann für die Temperaturkompensation **fest eingestellt**.

Die Vergleichsstelle wird örtlich verlegt, indem man am Thermoelementeingang des Feldgerätes zwei Kupferleitungen anschließt und diese auf der jeweils zweiten Seite mit den Ausgleichsleitungen des Thermoelementes fortsetzt. Aus Richtung des Feldgerätes entsteht bis zum Übergang keine Thermospannung. Der Übergang zwischen Kupfer- und Ausgleichsleitung bildet die Vergleichsstelle und die hier vorhandene Temperatur muss für die Temperaturkompensation verwendet werden.

Mithilfe eines Dewargefäßes (Abb. 38) kann die Vergleichsstelle auf exakt $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperiert werden. In das Thermogefäß werden Wasser und Eis eingebracht. Solange noch Eis vorhanden ist, herrschen im Wasser $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tripelpunkt). Die Übergänge Kupferleitung – Ausgleichsleitung werden in einer wasserdichten Hülse in dem Behälter platziert.

Am Feldgerät wird die interne Temperaturkompensation abgeschaltet und es wird die konstante Vergleichsstellentemperatur von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingestellt.



Abb. 38: Einsatz eines Dewargefäßes für Vergleichsstellentemperatur von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

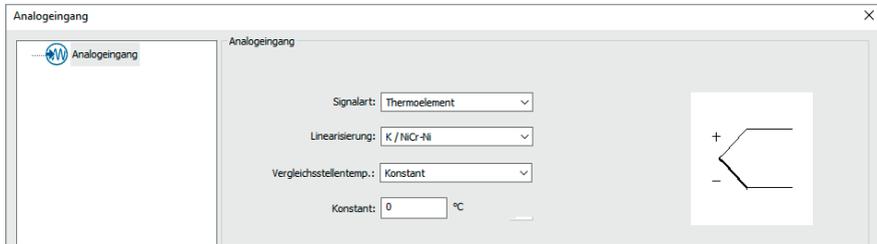


Abb. 39: Einstellungen am Feldgerät für eine konstante Vergleichsstellentemperatur von 0 °C

Im Regelbetrieb ist die Umsetzung mit dem Dewargefäß nicht praktikabel. Das Gefäß findet meist in Prüf- oder Kalibrierlaboren Verwendung und hilft, kleinste Messunsicherheiten zu realisieren.

Kompensation auf eine externe Vergleichsstellentemperatur

Im Vergleich zur internen Temperaturkompensation wird die Vergleichsstellentemperatur genauer ermittelt, indem die Vergleichsstelle in einem Metallblock geschaffen und dessen Temperatur gemessen wird. Die Blocktemperatur wird dann für die Temperaturkompensation herangezogen.

Denkbar ist ein System, in dem 3 Temperaturen mit Thermoelementen vom Typ K gemessen werden. Der Anschluss der Thermoelemente beginnt an einer Automatisierungskomponente mit 3 Kupferleitungen. Der Wechsel auf die jeweiligen Ausgleichsleitungen erfolgt in Buchsen in einem Metallblock, und so befindet sich hier die Vergleichsstelle. Thermisch gesehen, ist der Metallblock relativ träge, und so wird dieser auch bei Schwankungen der Umgebungstemperatur gleichmäßig temperiert sein. Ein Widerstandsthermometer im Metallblock misst dessen Temperatur und so auch recht genau die Temperatur der Übergangshülsen. Das Widerstandsthermometer ist an den Analogeingang 1 der Automatisierungskomponente angeschlossen. Analogeingang 1 wird wie folgt eingestellt:

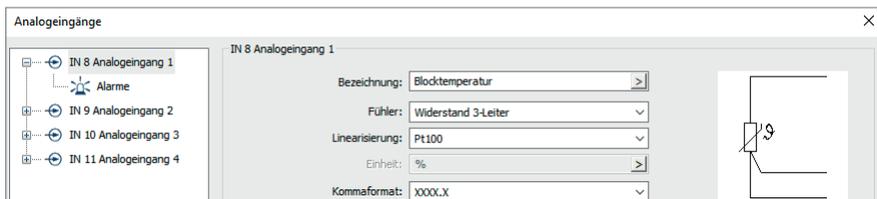


Abb. 40: Eingangskonfiguration für das Widerstandsthermometer (Vergleichsstellentemperatur)

An 3 weitere Eingänge sind die Thermoelemente vom Typ K angeschlossen (Abb. 41), diese werden an die Thermoelemente angepasst. Als Quelle für die externe Vergleichsstellenkompensation wird der Temperatureingang 1 mit dem Widerstandsthermometer angegeben:

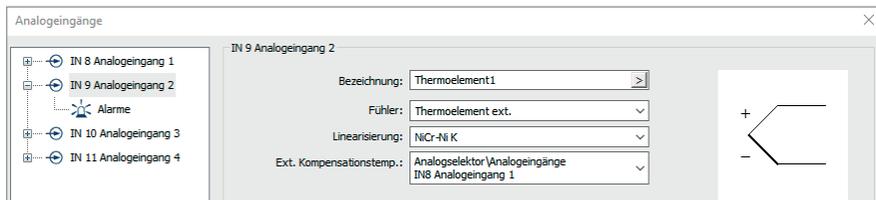


Abb. 41: Eingangskonfiguration für eines der Thermoelemente

Durch die Angabe von Analogeingang 1 für die externe Kompensation findet diese Temperatur für die Temperaturkompensation Verwendung (anstelle des geräteinternen Widerstandssensors).

4.7 Detektion von Fühlerbruch und Kurzschlussbetrachtung

Thermoelemente werden über die Einsatzzeit brüchig – in diesem Fall ist der Thermoelementeingang des Feldgerätes offen. Die Spannung am Eingang ist dann 0 mV, und so geht das Feldgerät von 0 K Temperaturdifferenz zwischen Mess- und Vergleichstellentemperatur aus. Als Ergebnis zeigt das Feldgerät die Vergleichstellentemperatur an.



Abb. 42: Betrachtung des Fühlerbruches

JUMO-Instrumentierung arbeitet mit Pull-up-Widerständen an den Analogeingängen. Mit einem offenen Eingang wird die Messspannung so verändert, dass sich ein ungültiger Wert ergibt und entsprechend zur Anzeige gebracht wird (beispielsweise durch die Anzeige 9999).

Ein Kurzschluss im Thermoelement kann nicht detektiert werden:

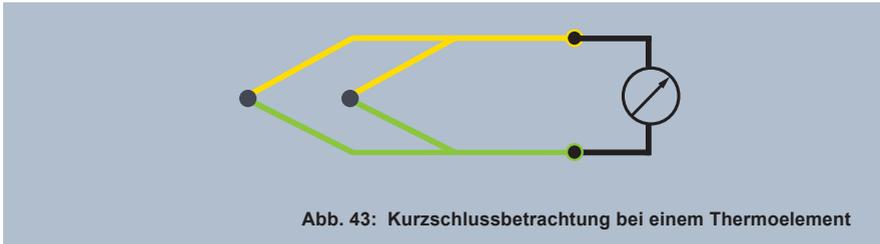


Abb. 43: Kurzschlussbetrachtung bei einem Thermoelement

Der Kurzschluss entsteht in der Ausgleichsleitung, an dieser Stelle ist dann ein weiteres Thermoelement vorhanden. In der Folge wird das Feldgerät eine Temperatur anzeigen, die zwischen der am Thermoelement und der an der Kurzschlussstelle liegt. So wird beispielsweise der Istwert für einen Regler bedeutend geringer ausfallen und der Regler wird weiter die Leistung erhöhen, um die gemessene Temperatur auf den Sollwert zu regeln.

Bei Sicherheitsgeräten – wie Sicherheitstemperaturbegrenzern (STBs) – muss man der fehlenden Kurzschlussdetektion entgegenwirken. STBs haben die wichtige Aufgabe, bei einer zu hohen Prozesstemperatur die Anlage abzuschalten. Finden Thermoelemente Verwendung, müssen zwei dieser Elemente verbaut werden:

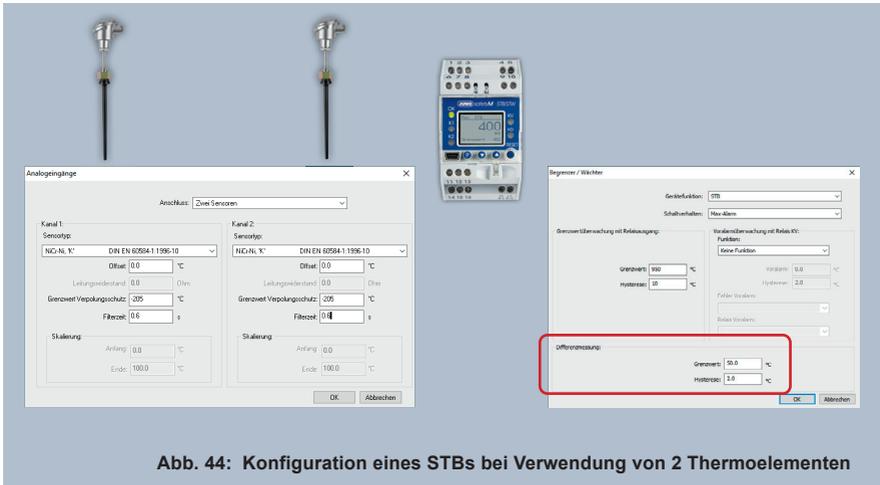


Abb. 44: Konfiguration eines STBs bei Verwendung von 2 Thermoelementen

Im Beispiel schaltet der STB die Anlage bei Überschreiten von 950 °C ab (Abb. 44, rechts). Gemessen wird die Temperatur mit zwei Thermoelementen vom Typ K (Abb. 44, links). Die beiden Temperaturen werden auf eine Differenz von 50 K (bzw. 50 °C) überwacht (Abb. 44, rechts). Sollte bei einem Element ein Kurzschluss vorliegen, wird seine ermittelte Temperatur geringer, der Grenzwert für die Differenztemperatur (50 °C) wird überschritten und der Sicherheitstemperaturbegrenzer schaltet auch in diesem Fall die Anlage ab. Die beiden Thermoele-

mente werden oft in einem Schutzrohr untergebracht, dieses Thermometer ist dann entsprechend zweikanalig. Die Ausgleichsleitungen sollten jedoch nicht im gleichen Mantel platziert werden – so wird der unwahrscheinliche Fall vermieden, dass bei beiden Ausgleichsleitungen an der gleichen Stelle ein Kurzschluss entsteht und so die Kurzschlussüberwachung außer Funktion gesetzt wird.

4.8 Galvanische Trennung beim Betrieb von Thermoelementen

Die Thermoschenkel eines Thermoelementes können mit der Anlagenmasse verbunden sein. Ist dies der Fall bei gleichzeitigem Potenzialunterschied zwischen der Anlagenmasse und dem Potenzialausgleich für das Feldgerät, fließen Ausgleichsströme über das Thermomaterial. Das macht die Messung unmöglich. Der genannte Potenzialunterschied ist im Fall von elektrischen Beheizungen sehr wahrscheinlich. Die Ausgleichsströme werden unterbunden durch die galvanische Trennung im Feldgerät:

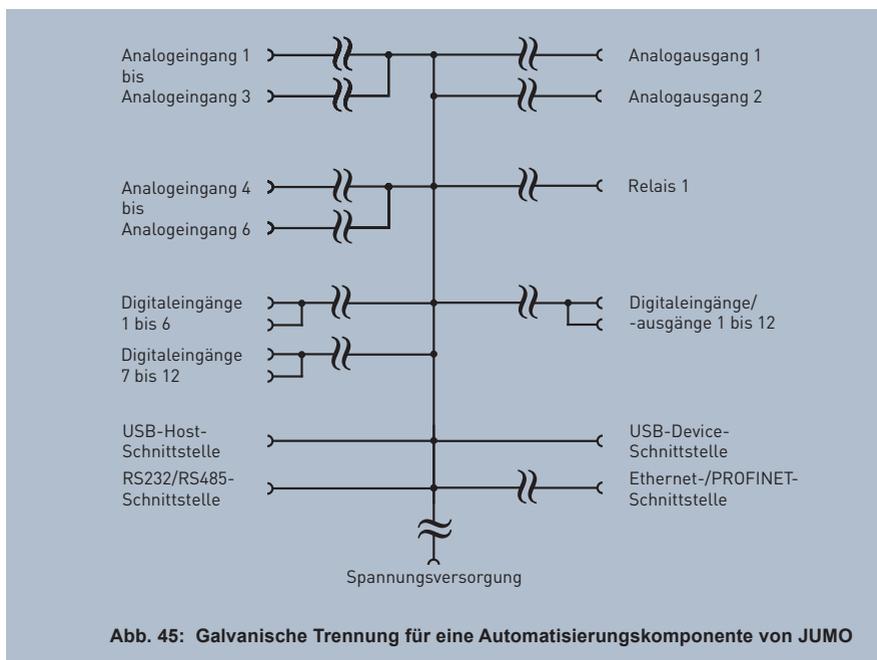
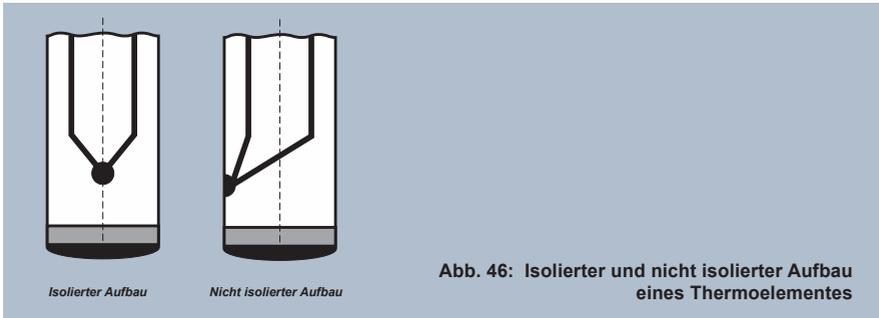


Abb. 45: Galvanische Trennung für eine Automatisierungskomponente von JUMO

Gemäß Abb. 45 verfügen die Analogeingänge über eine galvanische Trennung: Angeschlossene Thermoelemente sind vom Geräteinneren entkoppelt und über ihre Thermodrähte können keine Ausgleichsströme fließen.

Die beschriebene Verbindung zwischen Thermoelement und Anlagenmasse liegt vor, wenn die Elemente nicht isoliert aufgebaut sind. Damit ist gemeint, dass die Übergangsstelle der Thermodrähte mit dem Schutzrohr verbunden ist. Durch diesen Aufbau erhält man sehr schnell ansprechende Thermoelemente:



Weiterhin besteht eine relativ hochohmige Verbindung zur Anlagenmasse, wenn keramische Schutzrohre bei Temperaturen über 1200 °C eingesetzt werden (solch hohe Temperaturen sind für Anwendungen mit keramischen Schutzrohren üblich). Hier verlieren die Schutzrohre merklich an Isolationswiderstand.

Bei Verwendung von Thermoelementen ist man mit Feldgeräten mit galvanischer Trennung (wie in Abb. 47, rechts) auf der sicheren Seite. Nur wenn mit Sicherheit davon ausgegangen werden kann, dass die Thermoschenkel in jedem Betriebsfall elektrisch von der Anlage isoliert sind, kann ggf. auf die Trennung verzichtet werden.

Die galvanische Trennung kann auch durch einen Messumformer für den Einbau in einen Anschlusskopf bzw. für die DIN-Schienenmontage (Abb. 47, links) oder durch einen Speisetrenner (Abb. 47, Mitte) erfolgen.



Abb. 47: Messumformer, Speisetrenner und Feldgerät mit galvanischer Trennung

Speisetrenner werden im Zusammenhang mit Zweidrahtmessumformern verwendet. Die Komponenten werden üblicherweise mit einer Spannung von DC 24 V versorgt. An ihrem Eingang versorgen sie wiederum einen Zweidrahtmessumformer mit DC 24 V. Der Messumformer steuert in Abhängigkeit von der Temperatur das Signal im Eingangskreis im Bereich von 4 bis 20 mA. Dieses Signal „wiederholt“ der Speisetrenner an seinem Ausgang. Das Signal ist jedoch galvanisch getrennt und es wird beispielsweise einer SPS aufgeschaltet.

4.9 Toleranz von Thermoelementen und Thermoleitungen bzw. Ausgleichsleitungen

DIN EN IEC 60584 definiert drei Toleranzklassen für Thermoelemente. Alle Thermoelemente verfügen über eine Grundtoleranz (siehe Werte in Spalte „Grundtoleranz“ in Tabelle 7). Sollten die vorangestellten Formeln nach Einsetzen der Messtemperatur eine höhere Toleranz ergeben, gilt der mit der Formel ermittelte Wert.

Thermoelementtyp	Klasse	Gültigkeitsbereich	zulässige Grenzabweichung bei Messtemperatur t	Grundtoleranz
Fe-CuNi (J)	Klasse 1	-40 bis +750 °C	$\pm 0,004 \times t$	$\pm 1,5 \text{ K}$
	Klasse 2	-40 bis +750 °C	$\pm 0,0075 \times t$	$\pm 2,5 \text{ K}$
NiCr-Ni (K) und NiCrSi-NiSi (N)	Klasse 1	-40 bis +1000 °C	$\pm 0,004 \times t$	$\pm 1,5 \text{ K}$
	Klasse 2	-40 bis +1200 °C	$\pm 0,0075 \times t$	$\pm 2,5 \text{ K}$
	Klasse 3	-200 bis +40 °C	$\pm 0,015 \times t$	$\pm 2,5 \text{ K}$
Pt10Rh-Pt (S)	Klasse 1	0 bis 1600 °C	$\pm [1 + 0,003 \times (t - 1100 \text{ °C})]$	$\pm 1,0 \text{ K}$
	Klasse 2	0 bis 1600 °C	$\pm 0,0025 \times t$	$\pm 1,5 \text{ K}$
Pt30Rh-Pt6Rh (B)	Klasse 1	600 bis 1700 °C	$\pm 0,0025 \times t$	$\pm 1,5 \text{ K}$
	Klasse 2	600 bis 1700 °C	$\pm 0,005 \times t$	$\pm 4,0 \text{ K}$

Tabelle 7: Toleranzklassen von Thermoelementen gemäß DIN EN IEC 60584 (Auszug für die gängigen Elemente)

Beispiele für die Bestimmung der Toleranz

(Thermoelement Typ K, Klasse 2, Einsatztemperaturen 150 °C und 900 °C):

Bei einer ungewöhnlich niedrigen Einsatztemperatur von 150 °C beträgt die Grenzabweichung $\pm 2,5 \text{ K}$ [da die Formel einen kleineren Wert ergibt ($\pm 1,125 \text{ K} = \pm 0,0075 \times 150 \text{ °C}$)].

Für eine Einsatztemperatur von 900 °C gilt die mit der Formel ermittelte höhere Toleranz. Die Grenzabweichung beträgt $\pm 6,75 \text{ K}$ ($\pm 0,0075 \times 900 \text{ °C}$).

Thermoelemente der Klasse 1 bieten die höchste Genauigkeit, gefolgt von den Elementen der Klasse 2. Die für einige Elemente definierte Klasse 3 bietet die geringste Genauigkeit. Der Gültigkeitsbereich dieser Klasse liegt überwiegend im negativen Temperaturbereich.

Beispielhaft gilt Klasse 3 für die Elemente K und N für negative Temperaturen von bis zu -200 °C. Aus dieser Angabe wird deutlich, dass mit Thermoelementen viel geringere Temperaturen als mit Platin-Chip-Widerstandssensoren (bis -70 °C) gemessen werden können.

Thermoelemente zeigen ein verstärktes Driftverhalten. Deshalb gelten gemäß DIN EN IEC 60584 die Grenzabweichungen ausschließlich für neuen Draht. Weiterhin ist im Fall einer Genauigkeitsprüfung bis zur Vergleichsstelle das gleiche Material zu verwenden.

Zwischen dem Anschluss des Thermoelementes (beispielsweise am Anschlusssockel) und der Vergleichsstelle entsteht bei einem Temperaturunterschied ebenfalls ein Teil der Thermospannung. Diese Spannung fällt beim Einsatz von Thermo- bzw. Ausgleichsleitungen etwas anders aus, als wenn das Thermoelement direkt bis zur Vergleichsstelle geführt ist. Teil 3 der DIN EN IEC 60584 definiert für Thermo- bzw. Ausgleichsleitungen die Genauigkeitsklassen 1 und 2. Die jeweiligen Grenzabweichungen gelten für eine beispielhafte Temperatur an der Messstelle und in dem angegebenen Temperaturbereich, dem die Leitung ausgesetzt ist.

Typ	Genauigkeitsklasse 1	Genauigkeitsklasse 2	Anwendungstemperaturbereich	Temperatur der Messstelle
KX	$\pm 1,5 \text{ K}$	$\pm 2,5 \text{ K}$	-25 bis 200 °C	900 °C
KCA	-	$\pm 2,5 \text{ K}$	0 bis 150 °C	900 °C
SCA	-	$\pm 2,5 \text{ K}$	0 bis 100 °C	1000 °C

Tabelle 8: Grenzabweichungen für Thermoleitungen und Ausgleichsleitungen (Auszug aus DIN EN IEC 60584, Teil 3)

Die Tabelle zeigt exemplarisch die Werte für eine Thermoleitung (Typ K) und zwei Ausgleichsleitungen (Typ K und Typ S).

Wird beispielsweise ein Thermoelement vom Typ K mit einer Ausgleichsleitung vom Typ KCA (Klasse 2) mit dem Feldgerät verbunden, entsteht eine zusätzliche Abweichung von maximal $\pm 2,5 \text{ K}$. Der Wert gilt für eine Messstellentemperatur von 900 °C und Voraussetzung ist, dass die Leitung innerhalb der angegebenen Temperaturgrenzen (0 bis 150 °C) eingesetzt wird.

4.10 Driftverhalten von Thermoelementen

Thermoelemente verändern bei gleicher Temperatur ihr Ausgangssignal über die Betriebszeit. Dieses sogenannte Driftverhalten ist bei ihnen bedeutend stärker ausgeprägt als bei den Widerstandsthermometern. Deshalb müssen Thermoelemente häufiger durch Vergleichsmessungen überprüft werden. Die Nullpunktverschiebung muss durch die Auswerteeinheit korrigiert werden. Bei einer zu großen Abweichung werden die Elemente ausgetauscht.

Die Drift resultiert beispielsweise aus Fremdatomen, die ins Thermomaterial eindiffundieren und damit dessen thermoelektrisches Verhalten verändern. Das ist u. a. ein Grund dafür, warum Thermoelemente in aller Regel nur in einem Schutzrohr zum Einsatz kommen. Im ungünstigen Fall können die Fremdatome aber auch aus dem Schutzrohr stammen oder durch das Schutzrohr diffundieren.

Die Drift geschieht schneller bei höheren Einsatztemperaturen, dies geht auch aus den Angaben in der DIN EN IEC 60584 hervor. In der Norm werden für die Elemente 2 Maximaltemperaturen empfohlen für die nach einer bestimmten Zeit mit einer bestimmten Drift zu rechnen ist. Beispielhaft sind in der Folge die Werte für ein Element vom Typ K angegeben:

Für das Element vom Typ K mit einem Drahtdurchmesser von 3,2 mm ist bei einer Einsatztemperatur von 1100 °C nach 10000 h Betriebszeit mit einer Drift von ca. 8 K zu rechnen. Wird das Element bei 1200 °C betrieben, ist bereits nach 250 h mit der gleichen Drift zu rechnen.

Die Werte wurden für die Anwendung in sauberer Luft festgelegt.

Bedenkenswert ist, dass die Thermoelemente im Lauf ihrer Einsatzzeit weniger Thermospannung ausgeben. Das bedeutet, dass die Auswerteeinheiten ohne regelmäßige Kalibrierung und ohne Abgleich immer geringere Temperaturen ermitteln. Dies hat zur Konsequenz, dass die Prozesse auf immer höhere Temperaturen geregelt bzw. erst bei höheren Temperaturen abgeschaltet werden.

Thermoelemente müssen regelmäßig überprüft, kalibriert und letztlich auch ausgetauscht werden. Die jeweiligen Intervalle müssen anlagenspezifisch festgelegt werden.

– Bei Thermoelementen handelt es sich um Verbrauchsmaterial. –

Thermoelemente verändern ihr Verhalten noch aus einem anderen Grund: Bei neuen Elementen wird die Temperatur gemessen, die punktuell an der Übergangsstelle der beiden Thermomaterialien herrscht. Über die Einsatzzeit wandern jedoch Atome aus dem legierten in den nicht legierten Schenkel. Das Thermoelement wird erst dann die korrekte Thermospannung ausgeben, wenn es sich mindestens bis zu der Stelle im Messmedium befindet, an der unverändertes Thermomaterial vorhanden ist. Bei älteren Elementen ist beispielsweise folgende Situation nicht unüblich: Befindet sich nur die Spitze des Thermoelementes in einem heißen Medium (750 °C) werden 700 °C gemessen. Die tatsächliche Mediumtemperatur lässt sich erst ermitteln, wenn sich das Thermoelement mindestens 5 cm tief im Messmedium befindet.

4.11 Aufbau von Thermoelementen

Thermoelemente kommen üblicherweise erst ab einer Temperatur von 600 °C zum Einsatz. Abgesehen von den Mantelelementen, machen deshalb in der Regel nur die Ausführungen mit Anschlusskopf Sinn.

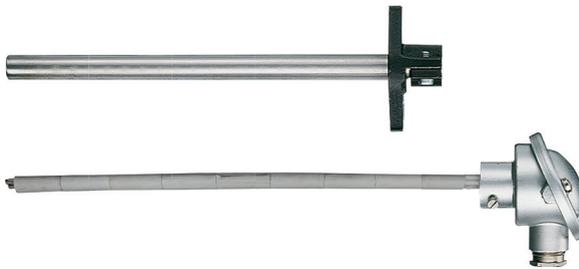


Abb. 48: Aufbau eines Thermoelementes mit Anschlusskopf und keramischen Distanzhaltern

Abb. 48 zeigt ein demontiertes Thermoelement. Oben ist das metallische Schutzrohr abgebildet, unten der Messeinsatz mit den keramischen Abstandhaltern. Es handelt sich um ein Doppелеlement, links neben den Abstandhaltern sind die Spitzen der beiden Elemente zu sehen.

Metallische Schutzrohre (wie in Abb. 48) aus niedriglegiertem Stahl können für Anwendungen mit Temperaturen von bis zu 800 °C zum Einsatz kommen. Mit hitzebeständigen Stählen sind Messungen bis 1200 °C möglich.

Bei noch höheren Temperaturen müssen keramische Schutzrohre verwendet werden (Abb. 49).

Für diese Schutzrohre finden unterschiedliche Keramikmaterialien Verwendung. Im Folgenden werden zwei Keramiken vorgestellt, für deren Anwendungen Beispiele in der mittlerweile zurückgezogenen Norm DIN 43724 aufgeführt sind. Es handelt sich dabei um gasdichte Keramiken.

KER 710 (Alsint® 99,7) ist eine reine Oxidkeramik aus mehr als 99,7 % Al_2O_3 sowie Spuren von MgO , Si_2O und Na_2O mit einer Feuerstandfestigkeit bis $1900\text{ }^\circ\text{C}$ und einem Schmelzpunkt von $2050\text{ }^\circ\text{C}$. Es ist der beste keramische Werkstoff mit hohem Isolationswiderstand. Aufgrund ihrer guten Wärmeleiteigenschaften und der relativ geringen Wärmeausdehnung ist die Keramik gut temperaturwechselbeständig. Das Wärmeleitvermögen entspricht dem von rostfreiem Stahl. Das Material verfügt über große mechanische Festigkeit.

KER 610 (Thermometerporzellan, Pythagoras®) besitzt einen höheren Alkaligehalt (60 % Al_2O_3 , 37 % SiO_2 , 3 % Alkali) und verfügt dadurch über einen geringen Isolationswiderstand. Wegen des hohen Siliziumdioxidanteils darf es nicht in reduzierenden Atmosphären eingesetzt werden. Allgemein diffundieren die Fremdstoffe – verstärkt über $1300\text{ }^\circ\text{C}$ – aus der Keramik in das Thermomaterial und verändern dessen thermoelektrische Eigenschaften (man bezeichnet dies auch als Vergiftung). Gegenüber KER 710 hat die KER 610 eine um das Neunfache geringere Wärmeleitfähigkeit. Seine mechanische Stabilität ist gut und das Material ist bis ca. $1500\text{ }^\circ\text{C}$ einsetzbar. Der Vorteil gegenüber KER 710 liegt im Preis, der rund fünf Mal niedriger ist.

Keramische Schutzrohre neigen aufgrund ihrer Sprödigkeit zum Brechen, deshalb sind sie vorzugsweise senkrecht einzubauen. Mit höheren Temperaturen verlieren die Schutzrohre immer mehr von ihrer Festigkeit, deshalb sollten sie ab ca. $1200\text{ }^\circ\text{C}$ nur noch vertikal eingebaut werden. Weiterhin sind die Armaturen empfindlich gegenüber Thermoschock, und so müssen sie langsam erwärmt bzw. abgekühlt werden. Ansonsten führt die inhomogene Temperatur entlang des Schutzrohres zu Spannungen, wodurch letztlich Mikrorisse entstehen können. Die Risse sind möglicherweise nicht sichtbar, das Schutzrohr ist dann aber nicht mehr gasdicht. Fremdatome können in das Thermoelement gelangen und eine Drift herbeiführen (Veränderung des Ausgangssignals). Das Keramikmaterial ist hygroskopisch, es speichert Feuchtigkeit im kalten Zustand. Auch deshalb muss ein schnelles Aufheizen aus dem kalten Zustand heraus vermieden werden. Die Thermometer sind trocken zu lagern. Thermoelemente mit keramischem Schutzrohr dürfen keiner Vibration ausgesetzt werden.



Abb. 49: Thermoelement mit keramischem Schutzrohr

Aufgrund ihrer schlechten mechanischen Eigenschaften sollten die keramischen Schutzrohre unterhalb von 1200 °C nur zum Einsatz kommen, wenn die Verwendung von metallischen Armaturen ausgeschlossen ist. Neben der hohen Temperatur können Gründe für den Einsatz einer Keramik sein, dass eine aggressive Ofenatmosphäre vorliegt (die Keramik ist chemisch sehr resistent) oder eine sehr reine Ofenatmosphäre benötigt wird (die Keramik bildet keine Reaktionsprodukte mit dem Messmedium).

5 Informationen zu elektrischen Thermometern und zur Temperaturmessung

In diesem Kapitel werden typische Thermometerausführungen vorgestellt und es wird Wissen zu deren Anwendung vermittelt. Losgelöst von den Ausführungen, werden danach allgemeine Sachverhalte zur Temperaturmessung aufgezeigt. Das Kapitel schließt mit dem Thema Kalibrierung ab.

5.1 Vorstellung typischer elektrischer Thermometer und deren Anwendung

Elektrische Thermometer existieren in sehr unterschiedlichen Ausführungen. Die größte Varianz ergibt sich im konstruktiven Aufbau. Einige sehr verbreitete Arten werden in diesem Kapitel vorgestellt. Alle gezeigten Fühler können mit einem Platin-Chip-Widerstandssensor ausgestattet werden. Thermodrähte sind in der Regel nur in den Ausführungen mit Anschlusskopf und in den Mantelelementen enthalten – nur bei diesen Versionen liegt die mögliche maximale Einsatztemperatur bei über 600 °C.

5.1.1 Elektrische Temperaturfühler mit Anschlussleitung

Die Thermometer sind häufig mit einer Anschlussleitung versehen, diese ist in der Regel direkt mit dem internen Temperatursensor verbunden. Zur Zugentlastung ist beispielsweise das Schutzrohr am Ende mehrfach gerollt oder gedrückt. Der Innenraum zwischen Schutzrohr und Temperatursensor wird üblicherweise mit einem wärmeleitenden Material gefüllt, so wird der thermische Kontakt zum Messmedium verbessert. Die maximale Messtemperatur ergibt sich in erster Linie durch die Temperaturbeständigkeit der Anschlussleitung. Abb. 50 zeigt Beispiele mit dem Einsatztemperaturbereich der jeweiligen Anschlussleitung:



Abb. 50: Beispiele für Temperaturfühler mit Anschlussleitung

Bei der mit Edelstahl umflochtenen Leitung aus Glasseide (Einsatz bis 400 °C) ist darauf zu achten, dass sie nur für den Einsatz in trockener Umgebung geeignet ist.

Bei Ausführungen von Widerstandsthermometern in **Zweileitertechnik** ergibt sich bereits bei geringen Leitungslängen ein Offset im Temperatursignal (beispielsweise 1 K bei Pt100 und ca. $0,4 \Omega$ Leitungswiderstand). Für die Korrektur des Offsets muss der Widerstandswert der Anschlussleitung ermittelt werden – ein Durchmessen der Leitung ist jedoch nicht möglich, da diese fest angeschlossen ist. So muss der Widerstand aus der Leitungsspezifikation und der Leitungslänge ermittelt werden. Alternativ kann der Offset über eine vergleichende Temperaturmessung ermittelt werden, was in der Praxis jedoch immer mit Aufwand einhergeht. Widerstandsthermometer mit Anschlussleitung sollten deshalb immer in Drei- oder Vierleitertechnik ausgestattet sein.

5.1.2 Elektrische Temperaturfühler mit Anschlussstecker

Die Temperaturfühler können auch mit einem Anschlussstecker ausgeführt sein, dieser ermöglicht die einfachere Entnahme aus dem Prozess (besonders bei den Einschraubthermometern) für beispielsweise Kalibrierung oder Austausch. Durch den Anschlussstecker ergibt sich eine reduzierte Maximaltemperatur im Vergleich zu den Temperaturfühlern mit fester Anschlussleitung. Abb. 51 zeigt Widerstandsthermometer mit gängigen Anschlusssystemen:



Abb. 51: Widerstandsthermometer mit Anschlussstecker nach DIN EN 175301-803, Rundstecker M12, 1 × 5-polig, nach IEC 60947-5 und Lemo®stecker

5.1.3 Mehrkanalige Temperaturfühler (Mehrpunkt-Temperaturfühler)

Eine Vielzahl von Temperaturfühlern kann mehrkanalig aufgebaut werden. Erforderlich wird diese Redundanz beispielsweise, um ein höheres Sicherheitsniveau zu erreichen, einen Kurzschluss bei Thermoelementen zu erkennen oder um über eine Strecke in bestimmten Abständen die Temperatur zu messen.



Abb. 52: Fühler zur Messung der Getreidetemperatur in unterschiedlichen Höhen von Silos (verkürzte Darstellung)

5.1.4 Temperaturfühler mit Anschlusskopf und Kopfmessumformer

Abgesehen von den Mantelelementen, sind ab Temperaturen von ca. 400 °C die Ausführungen mit Anschlusskopf obligatorisch. Im Kopf befindet sich ein Anschlusssockel, an den die externe Anschlussleitung angeschlossen wird. Sollen Fühler mit Einschraubgewinde entnommen werden, kann dies nach Abklemmen der Anschlussleitung erfolgen. Die Anschlussköpfe sind standardisiert (DIN EN 50446), in der Norm sind zwei Kopfformen aufgeführt. Der kleinere B-Kopf ist für die meisten Schutzrohre ausreichend dimensioniert (Abb. 53, links). Bei Thermoelementen fallen die Schutzrohre mitunter recht stark im Durchmesser aus, in diesen Fällen kommt der größere A-Kopf zum Einsatz (Abb. 53, Mitte).

Für die B-Köpfe sind Messumformer lieferbar, die im Kopf alternativ zum Sockel eingebaut werden. Der Standard (DIN EN 50446) stellt unter anderem sicher, dass beispielsweise Anschlusssockel und Messumformer für einen B-Kopf entsprechend in jedem B-Kopf platziert werden können.

Es existieren viele A- und B-Köpfe, die angelehnt an die DIN EN 50446 ausgeführt sind (bspw. Rundköpfe mit aufklappbarem Deckel, solche aus Kunststoff und Ausführungen für zwei Messumformer). Die Köpfe haben nicht exakt das Design, wie in Abb. 53 dargestellt, halten aber die Grundmaße ein, und so ist auch in diesen die Montage von Anschlusssockel und Messumformer möglich.

Für die – im Durchmesser sehr kleinen – Schutzrohre kommt der sogenannte J-Kopf zum Einsatz (Abb. 53, rechts). Dieser Kopf entspricht keinem Standard – es handelt sich um ein eigenes JUMO-Design.

Recht verbreitet sind im Ofenbau Ausführungen zum Einstecken (Abb. 53, Mitte). Diese verfügen oft über einen Flansch, der beispielsweise über einer Bohrung an einem Ofen platziert wird. Das Schutzrohr wird dann durch den Flansch in den Ofen geschoben. Eine Arretierung am Flansch fixiert abschließend das Thermometer in der gewünschten Position.

Einschraubthermometer sind auch mit Halsrohr lieferbar (Abb. 53, links). Damit ist die verlängerte Strecke zwischen dem Prozessanschluss und dem Anschlusskopf gemeint. Der Grund für das Halsrohr kann sein, dass ein Messumformer vor einer zu hohen Temperatur geschützt werden muss. Außerdem kommt diese Version zum Einsatz, wenn sich um eine thermische Anlage eine Isolierung mit großer Stärke befindet – der Anschlusskopfdeckel ragt dann aus der Isolierung heraus.

In den Thermometern mit Anschlusskopf ist die Sensorik meist fest verbaut, es sind aber auch Versionen mit austauschbarem Messeinsatz lieferbar. Diese kommen beispielsweise als Einschraubthermometer zum Einsatz, der Messeinsatz kann bei diesen Versionen entnommen werden und der Prozess bleibt trotzdem druckdicht.



Abb. 53: Einschraubwiderstandsthermometer mit B-Kopf und Halsrohr; Thermoelement mit A-Kopf und keramischem Schutzrohr; Einschraubwiderstandsthermometer mit J-Kopf

Durch die Federn in den Befestigungsschrauben wird die Unterseite des Messeinsatzes permanent auf den Boden des Schutzrohres gedrückt: So wird ein Luftspalt vermieden und es entsteht ein guter thermischer Kontakt. Die Federn gleichen auch unterschiedliches Ausdehnungsverhalten von Messeinsatz und Schutzrohr aus.

Zur Überprüfung der Messkette kann anstelle des kompletten Thermometers der ausgebaute Messeinsatz mit einer Referenztemperatur beaufschlagt werden. Beispiele sind neben den genannten Prozessen, die nicht druckfrei geschaltet werden können, Thermometer mit durchmesserstarken Schutzrohren (wenn das Thermometerschutzrohr nicht in dem Kalibrator platziert werden kann, das Loch des Kalibrators aber groß genug für den Messeinsatz ist). Bei der beschriebenen Prüfung ist immer zu beachten, dass sich nach der Platzierung des Messeinsatzes im Schutzrohr etwas andere Verhältnisse ergeben als im Blockkalibrator.



Abb. 54: Austauschbarer Messeinsatz mit Anschlusssockel für ein B-Kopf-Thermometer im Detail

5.1.5 Kopfmessumformer

Die Temperaturmessumformer im Allgemeinen und die Kopfmessumformer im Besonderen wurden bereits in Kapitel 3.7 thematisiert. Die Kopfmessumformer werden in den Anschlusskopf des Thermometers eingebaut und an sie wird das Widerstandsthermometer bzw. das Thermoelement angeschlossen. Die Kopfmessumformer sind in der Regel Zweidrahtmessumformer, das heißt, ausgangsseitig sind sie über zwei Drähte angebunden und geben die Temperatur als lineares 4-bis-20-mA-Signal aus.

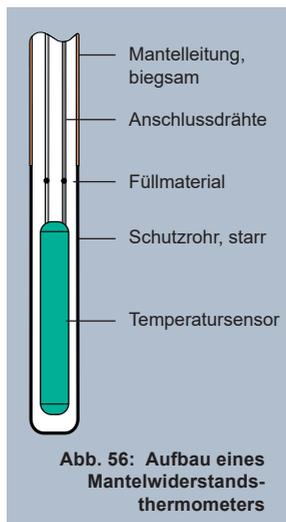
Bei Einsatz eines Kopfmessumformers richtet sich die maximal zulässige Umgebungstemperatur für den Anschlusskopf nach dem Umformer. So beträgt die maximale Einsatztemperatur für den in Abb. 55 gezeigten JUMO dTRANS T05 85 °C. Durch den Einbau in den B-Kopf findet noch Eigenerwärmung statt, die zulässige Umgebungstemperatur für den Thermometerkopf wird etwas niedriger ausfallen als 85 °C.



Abb. 55: Messumformer in Zweidrahttechnik, JUMO dTRANS T05 B

5.1.6 Mantelwiderstandsthermometer und Mantelthermoelemente

Mantelemente bestehen aus einer dünnwandigen Leitung aus Edelstahl oder hitzebeständigem Stahl. In der Leitung befindet sich feuerfestes Magnesiumoxid, in dem wiederum der Temperatursensor und die Anschlussleitung eingebettet sind. Das Oxidpulver ist gepresst – so erreichen die Elemente eine hohe Erschütterungsfestigkeit.



Bei den Mantelwiderstandsthermometern (Abb. 56) wird im Bereich des Temperatursensors die Mantelleitung durch ein aufgeschweißtes, starres Edelstahlschutzrohr weitergeführt.

In den Mantelthermoelementen (Abb. 57) sind Thermomaterial und Mantelleitung ohne Unterbrechung bis zum jeweiligen Ende ausgeführt, deshalb sind sie noch vibrationsbeständiger als die Mantelwiderstandsthermometer.

Die Elemente beginnen bereits mit einem sehr geringen Durchmesser (Widerstandsthermometer ab ca. 1,9 mm und Thermoelemente ab ca. 0,5 mm). Der kleine Durchmesser und der sehr gute Wärmeübergang zwischen Sensor und Mantel ermöglichen extrem kurze Ansprechzeiten. Ein großer Vorteil der Elemente ist ihre Biegsamkeit – so wird die Messung an schwer zugänglichen Stellen möglich. Der kleinste zulässige Biegeradius beträgt $5 \times$ dem äußeren Durchmesser bei Durchmessern bis 6 mm (ab 6 mm sind die Elemente praktisch nicht mehr biegsam). Bei den Mantelwiderstandsthermometern (Abb. 56) darf beim Biegen keine Belastung auf die Verbindungsstelle zum Edelstahlschutzrohr einwirken. Deshalb ist für die Krümmung ein Mindestabstand zur Übergangsstelle von 15 mm einzuhalten.

Bei einigen Elementen ist die Mantelleitung bis zum elektrischen Anschluss realisiert:

Diese Ausführungen verfügen über blanke Anschlussdrähte und die Elemente können über ihre gesamte Länge mit der maximalen Mess-temperatur belastet werden. Die flexiblen Elemente können also von der Auswerteeinheit bis zur Messtelle – beispielsweise in einen Ofen – gelegt werden und es ist nebensächlich, an welcher Stelle die hohe thermische Belastung beginnt. Die Elemente werden im Bereich der Messtelle beispielsweise mit einem Clip befestigt oder einfach in den Prozess gehängt.

Die Übergangsstelle zwischen der Mantelleitung und den Anschlussdrähten ist abgedichtet (Abb. 57) und für das verwendete Harz gilt bei den Elementen von JUMO eine Maximaltemperatur von 200 °C. Sollte an der Übergangsstelle eine höhere Temperatur vorliegen und das Signal mit einer Leitung weitergeführt werden, kann das Mantelthermometer mit einem Hochtemperaturverschluss ausgestattet werden. Die spezielle Ausführung erlaubt eine Maximaltemperatur von 300 °C im Bereich der Übergangsstelle. Mantelelemente mit blanken Anschlussdrähten dürfen nicht gekürzt werden, da so die Abdichtung entfernt wird und Feuchte eintritt – in der Folge werden die Elemente unbrauchbar. Sollten die Elemente zu lang sein, wird die Mantelleitung im Bereich der Auswerteeinheit aufgerollt.

Übrigens finden Mantelelemente auch häufig als Messeinsatz Verwendung. So werden sie beispielsweise häufig in Thermoelemente mit Anschlusskopf eingebaut.

Weiterhin sind Versionen mit Anschlussleitung bzw. Ausgleichsleitung lieferbar (Abb. 58). So wird der Teil mit der Mantelleitung in den thermischen Prozess gelegt. Außerhalb des Prozesses wird das Signal über die Leitung weitergeführt. Selbstverständlich darf die Anschlussleitung gekürzt werden.



Abb. 57: Mantelthermoelement mit blanken Anschlussdrähten



Abb. 58: Mantelthermoelement mit Ausgleichsleitung

Die Anschlussleitung kann auch mit einem Anschlussstecker konfektioniert sein, recht verbreitet ist der Einsatz von Lemo®-Kupplungen (Abb. 59).



Abb. 59: Mantelwiderstandsthermometer mit LEMO®-Kupplung

Die Mantelelemente sind zudem mit Anschlusskopf lieferbar (Abb. 60). Die typischen Schutzrohrdurchmesser sind mit 3 mm etwas stärker, dennoch bieten auch sie eine gewisse Biegsamkeit und die Thermometer sind immer noch sehr schnellansprechend. Die Thermometer zum Einschrauben (Abb. 60, links) werden verwendet, wenn der Prozess druckdicht abgeschlossen werden muss. Die Einsteckthermometer werden mit einem Flansch fixiert. Bei Erforderlichkeit eines druckdichten Abschlusses kommen Klemmverschraubungen zum Einsatz (Abb. 60, rechts).



Abb. 60: Mantelthermoelemente mit J-Anschlusskopf zum Einschrauben und zum Einstecken (mit Klemmverschraubung)

5.2 Thermometer zum Einstecken und Einschrauben

Elektrische Thermometer kann man auch hinsichtlich der Art und Weise unterscheiden, wie man sie in dem Prozess appliziert. Für Prozesse, die nicht druckdicht abgeschlossen werden müssen, kommen Einsteckthermometer zum Einsatz (Abb. 53, Mitte). Bei diesen Thermometern kann die Einbaulänge variiert werden. Die in der technischen Beschreibung angegebene Mindesteintauchtiefe muss immer erreicht werden, da ansonsten der Wärmeableitfehler und damit der Messfehler zu groß wird. Der Wärmeableitfehler wird in Kapitel 5.2.2 thematisiert.

Ist für ein vorhandenes Thermometer keine Mindesteinbautiefe bekannt und kann diese auch nicht anderweitig abgeleitet werden, ist ihre Abschätzung mit folgenden Faustformeln möglich:

Messung in flüssigen Medien: Eintauchtiefe ≥ 5 bis $10 \times$ Schutzrohrdurchmesser

Messung in gasförmigen Medien: Eintauchtiefe ≥ 15 bis $20 \times$ Schutzrohrdurchmesser

Bei den Thermoelementen zum Einschrauben wird die Einbaulänge durch die Position des Prozessanschlusses bestimmt. Diese Thermometer kommen zum Einsatz, wenn der Prozess druckdicht zur Umgebung abgeschlossen sein muss. Kommen die Thermometer im Leitungsbau zur Verwendung, sollten sie mit einem Winkel von 45° gegen die Strömungsrichtung platziert werden (Abb. 61, links). Eine Montage vertikal zur Strömungsrichtung ist aufgrund der mechanischen Belastung nicht empfohlen. Ist das Schutzrohr länger als der Durchmesser der Leitungsröhre, erfolgt ein Einbau in den Rohrbogen (Abb. 61, rechts).



Abb. 61: Elektrisches Thermometer im Rohrleitungsbau: Einbau im Winkel mit 45° und Einbau im Rohrbogen

Naturgemäß müssen Einschraubthermometer zur Entnahme gedreht werden. Muss die Entnahme – für beispielsweise eine Überprüfung – regelmäßig geschehen, kann ein Fühler mit Anschlussstecker die bessere Wahl sein.

Sind die Anlagen nicht frei von Vibrationen und Schwingungen, sollten die Thermometer idealerweise vertikal, wenigstens innerhalb von $\pm 70^\circ$ zur Senkrechten, eingebaut werden. Die Einbaulage mildert den negativen Einfluss durch Schwingungen bzw. Vibration. Des Weiteren wird durch die tendenziell senkrechte Positionierung bei Temperaturfühlern mit einer Aluminiumoxidfüllung sichergestellt, dass sich durch die Vibrationen das Pulver weiter in Richtung

Temperatursensor verdichtet. Bei Über-Kopf-Einbau kann die Vibration dazu führen, dass der Sensor nicht mehr vollständig vom Pulver umgeben ist und infolge der Vibrationen zerstört wird. Kurze Fühler sind unter dem Aspekt der Vibration zu bevorzugen, sie verfügen über eine höhere Eigenfrequenz und werden somit in der Regel nicht so stark zum Schwingen angeregt.

In vibrations- und schwingungsfreien Anlagen, wie in den meisten Temperieröfen, ist auch ein horizontaler Einbau der Fühler möglich (dies gilt nur bedingt für Ausführungen mit keramischem Schutzrohr). Werden jedoch lange Schutzrohre nicht gestützt, sind sie durch das Biegemoment mechanisch belastet. Ohne Abstützung darf in diesen Anwendungen eine maximale Einbaulänge nicht überschritten werden. Die maximal mögliche Schutzrohrlänge ist abhängig von der Konstruktion und dem Werkstoff des Schutzrohres.

Einbauten, bei denen der Anschlusskopf bzw. der Leitungsausgang unterhalb der Messspitze liegt, sind immer zu vermeiden.

5.2.1 Anlegefühler

Mit Anlegefühlern wird die Oberflächentemperatur von beispielsweise Rohrsystemen oder Behälterwänden bestimmt. Letztlich soll jedoch die Temperatur des Messmediums ermittelt werden, welches sich in dem System befindet. Anlegefühler ermöglichen keine Präzisionsmessung, da die Temperatur der Rohrwand meist geringer als die Mediumtemperatur ist. Der Vorteil der Fühler liegt jedoch darin, dass für sie kein Prozessanschluss realisiert werden muss: Die Fühler werden beispielsweise auf der Rohroberfläche mit einem Spannband befestigt (Abb. 62).



Abb. 62: Anlegefühler zur Oberflächenmessung

Die Messung gelingt umso genauer, je höher die thermische Leitfähigkeit der zu messenden Oberfläche ist und umso besser der Prozess (mit dem aufgespannten Temperaturfühler) gedämmt ist. Die Kontaktflächen zwischen dem Messobjekt und dem Fühler müssen plan aufeinanderliegen, frei von Korrosion sein und sind vor der Montage zu reinigen. Wärmeleitpaste im Bereich der Kontaktstelle verbessert das Messergebnis.

5.2.2 Temperaturfühler aus Kunststoff

Temperaturfühler aus Kunststoff werden aus Thermoplasten* im Spritzgussverfahren hergestellt. In den Fühlern sind Platin-Chip-Temperatursensoren mit Anschlussdrähten oder solche in SMD-Technik eingebettet. Die Kunststoffe sind durch Modifikation so verändert, dass sie wärmeleitend sind. Durch das Spritzgussverfahren ist die Sensorgestaltung nicht an die sonst üblichen Designs von metallischen Sensoren gebunden. Die verwendeten Kunststoffe wirken elektrisch hervorragend isolierend. So wird bereits bei dünnen Wandstärken eine Stehspannungsfestigkeit von mehreren Kilovolt (kV) erreicht. Die Fühler verfügen über eine geringe Masse und eine sehr hohe Steifigkeit – somit ist die Eigenfrequenz sehr hoch und sie sind extrem erschütterungsfest.

*Thermoplaste: Kunststoffe, die sich in einem bestimmten Temperaturbereich verformen lassen.



Abb. 63: Kunststofffühler: spannungsfest (links), vibrationsfest (Mitte) und dampfdicht (rechts)

Abbildung 63 zeigt Beispiele für Temperaturfühler aus Kunststoff.

Der spannungsfeste Kunststofftemperaturfühler (Abb. 63, links) ist isolationsfest bis AC 3500 V und kann beispielsweise in Transformatoren, Elektromotoren und anderen Hochspannungsumgebungen eingesetzt werden – für einen Temperaturfühler aus Metall undenkbar.

Der vibrationsfeste Temperaturfühler (Abb. 63, Mitte) wird in beweglichen Bauteilen von z. B. Motoren, Fahrzeugen und Maschinen eingesetzt. Im Fühler ist der Sensor komplett mit Kunststoff umschlossen und bietet somit eine extrem hohe Vibrationsbeständigkeit. Ein hoch wärmeleitender Kunststoff am Temperatursensor sorgt für die Realisierung einer kurzen Ansprechzeit, ein Kunststoff mit niedriger Wärmeleitfähigkeit am Kabelaustritt sichert einen geringen Wärmeableitfehler.

In Sterilisationsanwendungen sorgt die Kombination aus Feuchtigkeit, Druck und hohen Temperaturen für Sensorstress. Bei dieser speziellen Anwendung bietet der dampfdichte Temperaturfühler (Abb. 63, rechts) die Lösung: Beim Spritzgussverfahren gehen die verwendeten Spezialkunststoffe eine stoffschlüssige Verbindung ein. So erfolgt auch am Kabelaustritt des Fühlers eine sichere Verbindung mit einer Dichtigkeit gemäß Schutzklasse IP69K. Dies ist besonders wichtig, da sich der Fühler während des Sterilisationsprozesses komplett in der Sterilisationskammer befindet.

5.3 Hinweise zur Anwendung elektrischer Thermometer

Losgelöst von bestimmten Thermometerausführungen, gibt dieses Unterkapitel weitere Anwendungsinformationen.

5.3.1 Verwendung von Schutzhülsen

Messstellen werden gelegentlich mit Hülsen zum Einschrauben oder Einschweißen ausgestattet, der Temperaturfühler wird dann in die Hülse gesteckt oder geschraubt. Hauptgrund für den Einsatz ist, dass der Fühler beispielsweise zur Überprüfung entnommen werden muss, das System aber permanent unter Druck steht. Die Hülsen finden aber auch Verwendung, wenn das Thermometer dem extrem hohen Druck eines Prozesses nicht ungeschützt standhalten kann.

Die Hülsen machen das Reaktionsverhalten der Messkette träger, denn nach einer Temperaturänderung des Mediums muss erst die Hülse temperiert werden, bis die Änderung zum Fühler gelangt – die Trägheit steigt mit der Masse der Tauchhülsen. Weiterhin wird das System träger, wenn sich zwischen der Innenwand der Hülse und der Außenwand des Fühlers ein Luftspalt befindet. Um den Spalt zu überbrücken, kann ein temperaturbeständiges Öl zum Einsatz kommen.

Durch den Einsatz der Hülsen vergrößert sich auch der Wärmeableitfehler, dieser wird im nächsten Kapitel thematisiert.



Abb. 64: Einschraub- und Einschweißhülse

5.3.2 Der Wärmeableitfehler

Wie zuvor beschrieben, wird die Genauigkeitsklasse von konfektionierten Fühlern über die Klasse der Sensoren angegeben (siehe beispielsweise Kapitel 3.3). So sagt beispielsweise die Klasse B eines Widerstandsthermometers lediglich aus, dass ein Platin-Chip-Tempersensor der Genauigkeitsklasse F 0,3 zum Einsatz kommt. Die Formel für die Grenzabweichung ergibt aber nicht die Gesamtgenauigkeit des Temperaturfühlers, es kommen noch weitere Fehler hinzu.

Einer der größten zusätzlichen Fehler ist der Wärmeableitfehler:

Die Prozesstemperatur ist meist bedeutend höher als die Umgebungstemperatur. So entsteht ein Wärmefluss in Richtung des elektrischen Anschlusses. Das Schutzrohr wird leicht abgekühlt und der sich im Fühler befindende Sensor ist einer etwas geringeren Temperatur ausgesetzt. Der Sensor misst also eine etwas niedrigere Temperatur als die des Messmediums.

In vielen Fällen ergibt sich der Wärmeableitfehler maßgeblich aus der Konstruktion des Fühlers, dies kann der Anwender nach Beschaffung des Thermometers nicht mehr beeinflussen. Gleich aussehende Fühler können sich in ihren metrologischen Eigenschaften erheblich unterscheiden. Der Wärmeableitfehler ist ein Qualitätsmerkmal und kleine Ableitfehler zeichnen hochwertige Fühler und Lieferanten aus. Es sollten nur optimierte Fühler verwendet werden.

Der Fehler ist umso größer, je besser die Wärme transportiert wird (über das Schutzrohr, das Isolationsmaterial und die Anschlussdrähte des Temperaturfühlers). Die Abweichung erhöht sich generell bei – im Durchmesser – größeren Fühlern. Weiterhin ergibt eine höhere Temperaturdifferenz (Prozesstemperatur – Umgebungstemperatur) einen höheren Ableitfehler, die Differenz muss selbstverständlich so hingenommen werden.

Die thermische Energie fließt vom Messmedium über den Temperaturfühler in Richtung des elektrischen Anschlusses. Deshalb wird der Fehler auch größer, wenn die Wärmeenergie nur langsam über das Messmedium ins Schutzrohr nachfließen kann. So fällt der Fehler bei der Messung in Luft höher als in einer Flüssigkeit aus. Besonders ungünstig ist es, wenn der Fühler von Luft oder Gas mit sehr geringer Geschwindigkeit angeströmt wird.

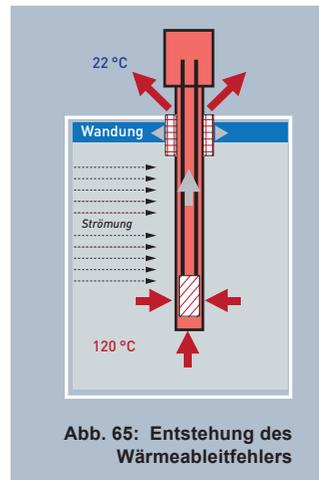


Abb. 65: Entstehung des Wärmeableitfehlers

Um den Wärmeableitfehler zu reduzieren, sollten Einsteckfühler möglichst tief im Prozess platziert werden. Die Eintauchtiefe bzw. Einbaulänge kann durch die Fixierung am Flansch variiert werden (Abb. 66).



Abb. 66: Einsteckthermometer mit variablem Flansch

Auf keinen Fall sollte sich die Fühlerspitze in einem Totraum befinden. Dies ist besonders ungünstig, wenn sich in diesem Bereich Luftblasen ansammeln können (Abb. 67). Bei sehr ungünstigen Verhältnissen verschlechtert nicht nur der Ableitfehler das Messergebnis – der Temperaturfühler ist schlicht der falschen Temperatur ausgesetzt.

Wie bereits erwähnt, ergibt sich mit Einsatz von Schutzhülsen ebenfalls ein größerer Wärmeableitfehler. Der Wärmestrom bewegt sich dann größtenteils über die Tauchhülse. Im Schutzrohr des Temperaturfühlers herrscht eine etwas geringere Temperatur und im Temperatursensor liegt sie noch etwas darunter. Der Fehler steigt mit dem Durchmesser der Hülsen an.

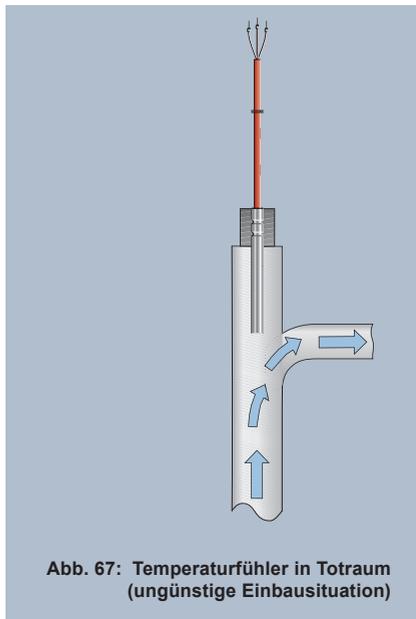
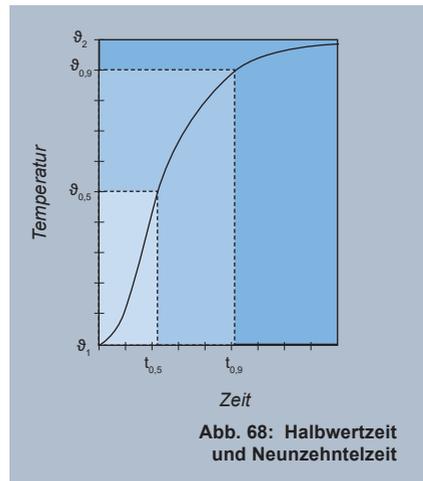


Abb. 67: Temperaturfühler in Totraum (ungünstige Einbausituation)

5.3.3 Die thermische Ansprechzeit

Die elektrische Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern und Thermoelementen erfolgt immer zeitverzögert. Die Thermometer haben eine Masse und können thermische Energie speichern. So wird es bei Ansteigen der Prozesstemperatur einige Zeit in Anspruch nehmen, bis der Temperaturfühler die Temperatur annimmt und der Sensor dieser ausgesetzt ist. Ein schnelleres Ansprechverhalten ergibt sich bei kleinen, massearmen Fühlern, deren Material über eine hohe thermische Leitfähigkeit verfügt.

Um das Ansprechverhalten von Temperaturfühlern vergleichbar zu machen, wird betrachtet, wie sich das Temperatursignal eines Temperaturfühlers nach Vorgabe eines Temperatursprungs verhält. Nach dem Temperatursprung vergeht die Halbwertzeit $t_{0,5}$, bis das Thermometer die Hälfte des Sprungs misst. Nach der Neunzehntelzeit $t_{0,9}$ können 90 % der Temperaturänderung gemessen werden. DIN EN IEC 60751 gibt die Bedingungen zur Messung des Ansprechverhaltens in Wasser und Luft vor.



Die Tabelle zeigt zwei Beispiele für häufig verwendete Thermometer (die Werte wurden im JUMO-Prüflabor ermittelt):

Thermometerart	Anströmung mit Luft (1 m pro s)		Anströmung mit Wasser (0,4 m pro s)	
	$t_{0,5}$ (s)	$t_{0,9}$ (s)	$t_{0,5}$ (s)	$t_{0,9}$ (s)
Mantelthermoelement (ø 3 mm)	20 bis 25	70 bis 90	0,4 bis 0,6	1,0 bis 1,2
Fühler mit Metallschutzrohr (11 mm)	100 bis 120	320 bis 400	7 bis 9	30 bis 50

Tabelle: 5: Ansprechverhalten für zwei Temperaturfühler

Die großen Fühler mit ihren langen Ansprechzeiten werden üblicherweise in ausgesprochen großen und damit trägen Anlagen eingesetzt. Die langen Ansprechzeiten sind deshalb in der Regel akzeptabel.

Das Ansprechverhalten muss insbesondere Beachtung finden, wenn die Anlage im Fall eines Fehlers in Form einer unzulässig hohen Temperatur abgeschaltet werden muss. Mit ansteigender Temperatur muss eine kritische Temperatur rechtzeitig gemessen werden, bevor Gefahr droht. Aufgrund der mechanischen Belastung werden Schutzrohre mit einem Mindestdurchmesser benötigt. Wenn dann aber ein zu träges Ansprechverhalten entsteht, kann dieses durch den Einsatz eines abgesetzten Schutzrohres verbessert werden (Abb. 69).

Bei diesen Ausführungen ist im Bereich des Sensors der Schutzrohrdurchmesser kleiner und hier verfügt das Schutzrohr über eine geringere Wärmekapazität. Bei einer veränderten Prozesstemperatur ist dieser Teil des Schutzrohres schneller temperiert und der Temperatursensor ist zügiger der Prozesstemperatur ausgesetzt.



Abb. 69: Temperaturfühler mit abgesetztem Schutzrohr

5.4 Kalibrierung von Temperaturmessketten

Temperaturmessketten müssen von Zeit zu Zeit überprüft werden, diese Thematik wird in diesem Unterkapitel behandelt:

Jeder Prozess benötigt Messketten, die die Temperatur mit einer bestimmten Genauigkeit messen. Je nach Anforderung kann die zulässige Toleranz im Bereich von einigen Kelvin oder wenigen Millikelvin liegen. Sind die Messabweichungen zu hoch, werden Prozesse beispielsweise auf eine zu hohe Temperatur ausgeregelt. Im günstigsten Fall wird dadurch „nur“ mehr Energie verbraucht, im schlechtesten Fall leidet die Produktqualität oder der Produktionsprozess gelingt nicht. Es gilt, eine zu große Abweichung zu erkennen, die Messkette bei Bedarf zu justieren und, wenn notwendig, Komponenten auszutauschen.

Temperaturmessketten werden so konzipiert, dass sie die Temperatur mit der erforderlichen Genauigkeit messen. Man darf aber nicht davon ausgehen, dass das Messmittel die benötigte Messgenauigkeit während der ganzen Einsatzdauer einhält. Äußere Einflüsse, die Einsatzbedingungen selbst oder auch unsachgemäßer Gebrauch können zu einer systematischen Veränderung der Messwerte führen. Um festgelegte Toleranzen während der Betriebsphase zu gewährleisten, muss die Messkette mit einer Referenzmesskette verglichen werden. Der Vergleich, wie weit der angezeigte Wert mit dem Wert der Vergleichsmesskette übereinstimmt, wird Kalibrierung genannt.

Eine regelmäßige Kalibrierung lohnt sich in vielen Fällen und beugt Schwierigkeiten vor. Arbeitet der Anlagenbetreiber nach Richtlinien und Normen, wie ISO 9001:2008 oder ISO 14001:2004/Cor1:2009, ist er sogar zur Kalibrierung der Messketten verpflichtet.

Für die Kalibrierung wird beispielsweise der Temperaturfühler aus der Anlage ausgebaut und zusammen mit einem Referenzthermometer in einem sogenannten Blockkalibrator platziert. Das Referenzinstrument wiederum wird in einem definierten Zeitintervall in einem akkreditierten Prüflabor kalibriert und stellt so eine zuverlässige Referenz dar. Im Inneren des Blockkalibrators werden unterschiedliche Temperaturen angefahren und die durch die Messkette ermittelte Temperatur mit der des Prüfthermometers verglichen.

Die Abweichungen bzw. Ergebnisse der Kalibrierung werden im Kalibrierzertifikat festgehalten, ebenso die angewandte Kalibriermethode, die verwendeten Referenzen und die Randbedingungen bei der Kalibrierung. Durch das Einbeziehen der kompletten Messkette werden alle Komponenten mit überprüft (Thermometer -> Messumformer -> Anschlussleitung -> Auswerteeinheit). Bei vertretbaren Abweichungen kann an der Auswerteeinheit die angezeigte Temperatur an die des Prüfmittels angepasst werden. Bei zu großen Abweichungen werden Komponenten (meist das Thermometer) ausgetauscht.



Abb. 70: Referenzthermometer in Ausführung mit Thermoelement

Bei der Festlegung des Kalibrierintervalls müssen die Prüfmittelverantwortlichen stets die Risiken und Kosten abwägen, um ein Optimum zwischen Sicherheit und Kosten zu erhalten. Ein großer zeitlicher Abstand zwischen den Kalibrierungen bedeutet zwar geringere Kalibrierkosten, birgt aber das Risiko, dass die Toleranz der Messkette in der Zwischenzeit zu groß wird und dies zu Lasten der Prozessqualität geht. Die Bestimmung des Intervalls ergibt sich oft aufgrund angewandter Normen und durch einen Konsens zwischen beispielsweise Anlagenbetreiber, Endkunden und Auditoren. Da Thermoelemente einer größeren Drift unterliegen als Widerstandsthermometer, müssen bei ihrem Einsatz die Messketten häufiger kalibriert werden.

Kalibrierungen können auch von externen Dienstleistern übernommen werden. So wird das Kalibrierintervall überwacht, das eigene Servicepersonal entlastet und es entstehen keine Kosten für qualifizierte Prüfgeräte sowie Zubehör. Durch JUMO durchgeführte Vorortkalibrierungen laufen beispielsweise wie folgt ab:

- Prüfung der Messkette auf Beschädigungen (Gehäuse, Kabel, Steckverbindungen)
- Prüfung der Auswerteeinheit (Kontrast und Stabilität der Anzeige, einwandfreie Funktion der Bedienelemente)
- Begutachtung aller Beschriftungen auf Vollständigkeit und Lesbarkeit, bei Erstkalibrierung erhalten die Temperaturfühler eine eindeutige Prüfnummer
- Nacharbeit leichter Beschädigung und evtl. nötige Reinigungen
- Aussortieren nicht instandsetzungsfähiger oder reparaturbedürftiger Messmittel
- Vollständigkeitsprüfung aller technischen Unterlagen (Betriebsanleitung, Dokumentation, Serviceunterlagen usw.)
- Vorgabe der Grenzabweichung (zulässiger Wert für die Temperaturmesskette) durch den Anwender
- Vergleich der Prüflingstemperatur mit der des Referenzthermometers; Prüfung, ob die Werte des Prüflings im Bereich der Grenzabweichung liegen

Bei Bedarf wird der Prüfling ausgebaut und – wie zuvor beschrieben – zusammen mit dem Referenzthermometer in einem Blockkalibrator platziert (z. B. bei Ofenanwendungen). Dies ist in vielen Anlagen sinnvoll, da Temperaturen im Kalibrator bedeutend schneller angefahren werden können als in der Anlage und die Messunsicherheitsanteile des Kalibrators bekannt sind. JUMO ist hinsichtlich der Temperaturkalibrierung DAkkS-zertifiziert (DAkkS = Deutsche Akkreditierungsstelle). Kalibrierungen nach DAkkS müssen aufgrund der besseren homogenen Temperaturverteilung im Blockkalibrator durchgeführt werden. DAkkS-Kalibrierungen ermöglichen die Rückführung auf nationale Normale. Sie sind allgemein anerkannt und rechtsicher.

Weiterhin existieren Werkskalibrierungen, diese treffen eine Aussage darüber ob die vorgegebenen Toleranzen eingehalten werden. Während dieser Kalibrierung darf der Prüfling auch im Prozess verbleiben, dann wird das Referenzthermometer neben dem Prüfling platziert (beispielsweise in einem Kühlraum). Am Ende dieser Kalibrierung wird ein Prüfzertifikat erstellt mit den Prüfpunkten, dem jeweiligen Ausgangsfehler und dem Kalibrierergebnis (bestanden bzw. nicht bestanden).

Innerhalb von Betrieben ist die Erstellung eines Werkskalibrierscheins gängige Praxis. Extern wird diese Art der Kalibrierung jedoch häufig nicht anerkannt (von Auditoren oder im Fall eines Rechtsstreits).

Weitere Fachliteratur von JUMO

Nicht nur bei der Herstellung von JUMO-Produkten, auch beim späteren Einsatz ist Know-how gefragt. Deshalb bieten wir unseren Anwendern eigene Publikationen zu Themen der Mess- und Regelungstechnik an. Die Publikationen sollen Einsteigern und Praktikern die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete schrittweise näherbringen. Hierbei werden überwiegend allgemeine Themenbereiche, zum Teil auch JUMO-spezifische Anwendungen, erläutert. Zusätzlich zur Fachliteratur-, bieten wir Ihnen neben unseren Software-Down-loads die Möglichkeit der direkten Onlinebestellung von Prospekten.



Elektronische Druckmesstechnik
Technisches Knowhow
für den Anwender
Marcell Bräutigam

FAS 606
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00690171
ISBN: 978-3-935742-19-1
kostenfrei



Messunsicherheit einer Temperaturmesskette
mit Beispielrechnungen
Gerd Scheller, Stefan Krummeck

FAS 625
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00413510
ISBN: 978-3-935742-12-2
kostenfrei



**Elektrische Temperaturmessung mit Thermo-
elementen und Widerstandsthermometern**
Manfred Schleicher

FAS 146
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00074750
ISBN: 978-3-935742-06-01
kostenfrei



Aktoren für die elektrische Beheizung
Thyristorleistungssteller,
Thyristorleistungssteller
und elektronischer Transformator
Manfred Schleicher

FAS 620
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00398728
ISBN: 978-3-935742-04-7
kostenfrei



Regelungstechnik
Grundlagen und Tipps
für den Praktiker
Manfred Schleicher

FAS 525
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00314836
ISBN: 978-3-935742-00-9
kostenfrei



**Funktionale Sicherheit
Safety Integrity Level**
*Dr. Thomas Reus
Matthias Garbsch*

FAS 630
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00463374
kostenfrei



Explosionsschutz in Europa
Elektrische Betriebsmittel
Grundlagen, Richtlinien, Normen
Dieter Herrmann

FAS 547
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00324966
ISBN: 978-3-935742-08-5
kostenfrei



**Amperometrische Messung
von freiem Chlor, Chlordioxid
und Ozon**
Dr. Jürgen Schleicher

FAS 619
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00394969
kostenfrei



**Informationen zur
Reinstwassermessung**
*Reinhard Manns,
Dr. Jürgen Schleicher*

FAS 614
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00369643
kostenfrei



Informationen zur pH-Messung
Dr. Jürgen Schleicher

FAS 622
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00403231
kostenfrei



**Leitfähigkeitsmessung,
Konzentration, TDS**
Reinhard Manns

FAS 624
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00411335
kostenfrei



**Messung der
Redoxspannungsmessung**
Ulrich Braun

FAS 615
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00373848
kostenfrei



**Messung
von Wasserstoffperoxid/
Peressigsäure**
Dr. Jürgen Schleicher

FAS 628
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00420695
kostenfrei



Messung von Ammoniak
Dr. Jürgen Schleicher

FAS 631
Verkaufs-Artikel-Nr.: 00481786
kostenfrei

Unter www.jumo.de kann ein Download der Fachliteratur erfolgen bzw. eine Bestellung der Lektüre als Printmedium.



ISBN: 978-3-935742-06-1



www.jumo.net