

Temperaturmessung: Reproduzierbare Aussage oder nur Interpolation zwischen Fixpunkten ?

ERHARD S. RÖSLER

Seit den ersten Beobachtungen von Stoffeigenschaften und deren Verhalten bei Temperaturänderung, vor dreitausend Jahren, hat es lange gedauert, bis aus dem bloßen Schätzen ein verlässliches Messen wurde. Internationale Vergleichsmessungen in den nationalen Eichinstituten mit festgelegten Methoden reduzierten die systematischen Messfehler in den Fixpunkten und Vergleichstabellen dergestalt, dass die interpolierten Zwischenwerte heute bis auf wenige Millikelvin Messunsicherheit genau sind. Die ITS90¹⁾ ist ein Beispiel dafür, dass die Temperaturmessung immer noch „lebt“ und die systematischen Fehler weiter eingeschränkt werden.

Im industriellen Alltag haben diese Millikelvin weniger Bedeutung – es sei denn im Kalibrierlabor, wo mit hochgenauen Instrumenten Betriebsgeräte auf ihre Abweichung hin ausgemessen (kalibriert) werden. In diesem sogenannten industriellen Alltag werden ständig Kompaktlösungen gefordert, die zu vertretbaren Kosten die „bunte Vielfalt“ der Temperatursensoren abdecken, ohne dass im Bereich der Auswertung die gleiche Vielfalt auftritt. Die analoge Technik in ihrer Produkt-Bandbreite ist bis auf wenige Ausnahmen hier vollständig durch digitalisierte Geräte abgelöst worden.

Der Einsatz digitaler Messumformer ist aber allein auch kein Garant für eine optimale fehlerfreie Messung. Falsch dimensionierte Sensoren oder nicht ausreichende Berücksichtigung der physikalischen Gegebenheiten können auch durch digitalisierte Temperaturmessumformer nicht kompensiert werden.

Messen mit Widerstandsthermometern

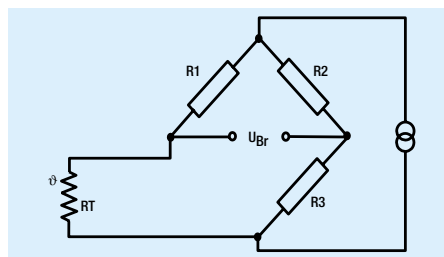
Der Widerstand eines stromdurchflossenen elektrischen Leiters ist temperaturabhängig. Bei vorhersagbarer stabiler, gleichmä-



1: Digitale Temperaturmessumformer haben die Analogtechnik mittlerweile fast komplett abgelöst, da sie in puncto Störunempfindlichkeit, Flexibilität und Universalität entscheidende Vorteile zu bieten haben

ßiger Beziehung lässt sich dieses Phänomen als Basis zur Messung von Temperaturen einsetzen. Es gibt einige Metalle mit dieser Eigenschaft, bei der Auswahl hat sich Platin gegenüber Kupfer und Nickel durchgesetzt. Platin hat einen großen Temperatureinsatzbereich und einen spezifischen Widerstand, der Kupfer um das 6-fache überschreitet. Der Temperaturbeiwert ist mit einem α von $0,00385 \Omega/K$ nahezu linear, und der Werkstoff lässt sich in feinste Leiter ziehen.

Die Genauigkeit dieser Platinfühler ist dergestalt, dass sie (als Pt25 und Pt10)²⁾ für die Physikalisch Technische Bundesanstalt und die Eichämter als Referenz und für die Interpolation zwischen den Fixpunkten eingesetzt werden.



2: 2-Leiterschaltung

Schaltungsvarianten

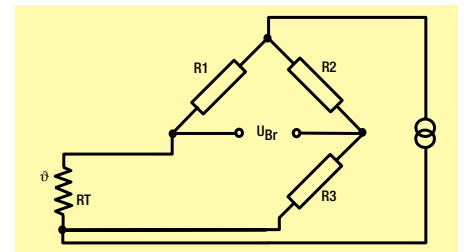
Um das Ausgangssignal zu erfassen, wird der Widerstand mit einem konstanten Messstrom gespeist und der hervorgerufene Spannungsabfall gemessen. Für den industriellen Einsatz sind verschiedenste Bauformen in verschiedenen Nennwiderständen (100Ω , 500Ω , 1000Ω)²⁾ und Genauigkeitsklassen verfügbar.

Zu den gängigen Messmethoden mit Widerstandsthermometern gehören:

♦ **2-Leiterschaltung:** Diese einfache Verbindung des Platinsensors mit der Auswer-

telektronik wird nur dann eingesetzt, wenn Genauigkeit nicht gefragt ist, da die Widerstände der Zuleitungen in die Messung mit eingehen. Zur Zeit analoger Geräte war es üblich, einen Leitungswiderstand von 10Ω beim Abgleich vorzusehen. Demzufolge musste die Leitung bei Inbetriebnahme (Sensor kurzgeschlossen) auf diese 10Ω abgeglichen werden. Moderne Geräte bieten teilweise die Möglichkeit der Programmierung des Leitungswiderstandes. Allerdings bleiben temperaturbedingte Änderungen nach wie vor unberücksichtigt.

♦ **3-Leiterschaltung:** Hier wird im Unterschied zur vorherigen Schaltung eine zusätzliche Leitung zu einem Anschlusspunkt des Messwiderstandes geführt. Es sind somit zwei Messkreise gegeben, wobei einer als Referenz genutzt wird. Mit der 3-Leiterschaltung wird der Leitungswiderstand sowohl in seinem Betrag als auch in seiner

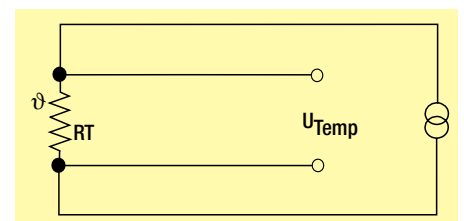


3: 3-Leiterschaltung

Temperaturabhängigkeit in vom Auswertegerät vorgegebenen Grenzen kompensiert. Voraussetzung sind identische Länge, Eigenschaften und Temperaturen bei allen drei Adern.

♦ **4-Leiterschaltung:** Dies ist die beste Methode zur Bestimmung von Widerständen. Bei der 4-Leiterschaltung wird das Messergebnis weder von Leitungswiderständen noch von deren temperaturabhängigen Schwankungen beeinflusst. Eine 4-Leiterschaltung ist die Voraussetzung für den Einsatz der Pt100³⁾ Fühler Klasse A und besser.

Es muss beachtet werden, dass bei der 3- als auch bei der 4-Leiterschaltung diese



4: 4-Leiterschaltung

Erhard S. Rösler ist Mitarbeiter der PMA Prozess- und Maschinen-Automation GmbH in Kassel

nicht immer bis zum Messwiderstand geführt ist. Ist die Verbindung des Sensors zum Anschlusskopf in 2-Leiterschaltung ausgeführt, ergeben sich – wenn auch nur in geringem Ausmaß – die gleichen Probleme, wie bei der 2-Leiterschaltung.

Selbsterwärmung und Toleranz

Will man den elektrischen Widerstand eines Leiters messen, so muss man einen gewissen Strom durch diesen Leiter senden. Konsequenterweise ergibt sich ein Aufheiz-effekt und die Temperatur dieses Leiters steigt auf einen Wert oberhalb der umgebenden Temperatur an. Die erzeugte Wär-

| Klasse | Grenzabweichungen in °C |
|--------|---------------------------------------|
| A | $0,15 + 0,002 \cdot tI$ ¹⁾ |
| B | $0,3 + 0,005 \cdot tI$ |

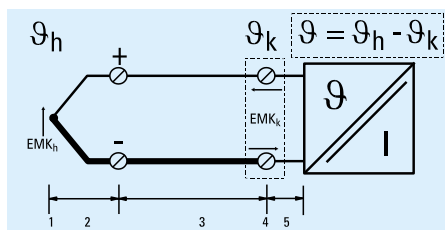
¹⁾ tI ist der Zahlenwert der Temperatur in °C ohne Berücksichtigung des Vorzeichens

me ist direkt proportional zum Widerstand und zum Quadrat des durch den Leiter fließenden Stromes. Die Selbsterwärmung wird außerdem durch die Abmessungen des Sensors und seine wärmeableitende Umgebung beeinflusst. Um den Effekt zu minimieren, werden die Messströme klein gehalten. Werte $\leq 400 \mu A$ sind üblich.

Messwiderstände für den industriellen Einsatz sind nach DIN IEC 751 standardisiert. Dort werden Fühler in ihren Grenzabweichungen klassifiziert. Ausgesuchte Fühler haben auch engere Toleranzen ($1/2$ bzw. $1/3$ DIN).

Messen mit Thermoelementen

Ist in einem elektrischen Leiter ein Temperaturgefälle vorhanden, erzeugt der Wärmefluss einen Elektronenfluss und eine EMK⁴⁾ wird in diesem Bereich generiert. Die Größe und Richtung der EMK wird von Größe und Richtung des Temperaturgefälles und dem Material des elektrischen Leiters bestimmt (Seebeck Effekt). Die Spannung an den Enden des Leiters ist die Sum-

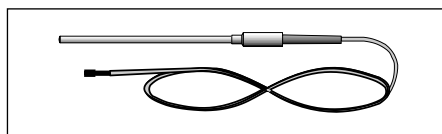


5: Thermoelektrische Temperaturmessung (1: Messstelle, 2: Thermopaar, 3: Ausgleichsleitung, 4: Vergleichsstelle, 5: Kupferleitung)

me der in diesem Leiter erzeugten Einzel-EMK's. Die Ausgangsspannungen eines einzelnen Leiters, normalerweise gemessen als die Summe der elektrothermischen Signale über den Schaltkreis eines uniformen Leiters, sind natürlicherweise bei jeder Temperatur, Null.

In einem Thermoelement der Praxis werden daher zwei Materialien (Thermopaar) mit unterschiedlichen EMK/Temperatur-Charakteristika kombiniert, um eine brauchbare Ausgangsspannung zu erzielen.

Es wird die EMK, erzeugt von der Temperaturdifferenz zwischen der Messtemperatur und der Temperatur der sog. freien Enden der Thermoschenkel, die sich u.U. im Anschlusskopf befinden, gemessen. Da der Anschlusskopf in den meisten Fällen Temperaturschwankungen ausgesetzt



6: Thermoelement in Mantelbauform

ist, müssen diese Temperaturen entweder mit Hilfe des Kopftransmitters erfasst werden (interne Temperaturkompensation) oder die weiterführende elektrische Leitung muss die gleichen thermoelektrischen Eigenschaften aufweisen wie das Thermopaar selbst. Dieses Bindeglied ist die Ausgleichs- bzw. Thermoleitung. Diejenige Stelle, an der das Auswertegerät angeschlossen ist, bzw. die Referenztemperatur erfasst wird, ist die Vergleichsstelle.

Vergleichsstelle

Wie bereits zuvor erläutert, erzeugt das Thermopaar ein Signal, das sich auf die Temperaturen der zwei Verbindungsstellen bezieht. Damit das ganze als Absolutwertmessung funktioniert, muss die Vergleichsstelle entweder gemessen und entsprechend korrigiert werden oder sie muss auf einer bekannten Temperatur konstant gehalten werden. Eine Möglichkeit für die letztere Methode (noch häufig in Laboratorien in Gebrauch) ist das Eintauchen der Vergleichsstelle in ein Gefäß mit schmelzendem Eis. Im industriellen Einsatz hat sich bewährt, die Temperatur der Vergleichsstelle mit einem Fühler zu erfassen, und die Korrekturen mittels der Elektronik des Auswertegerätes durchzuführen.

Thermoelementwerkstoffe

Nahezu alle elektrischen Leiter haben thermoelektrische Eigenschaften, doch bedenkt man den praktischen Einsatz, reduziert sich die Auswahl bereits erheblich. Als Anwender ist es jedoch nicht erforderlich, sich die einzelnen Werkstoffe auszusuchen und zu paaren. Dies wird bereits seit längerer Zeit von den entsprechenden Herstellern praktiziert und hat sich in internationalen Standards niedergeschlagen. In diesen sind Thermopaare (Thermoelemente) für Temperaturbereiche von -270 bis über

| Typ | Material | Temperatur |
|-----|---------------|--------------------|
| R | Pt13Rh-Pt | $-50...1600$ °C |
| S | Pt10Rh-Pt | $-50...1600$ °C |
| B | Pt30Rh -Pt6Rh | $(0)+600..1700$ °C |
| J | Fe-CuNi | $-210...750$ °C |
| T | Cu-CuNi | $-270...350$ °C |
| E | NiCr-CuNi | $-270..1000$ °C |
| K | NiCr-NiAl | $-270...1300$ °C |
| N | NiCrSi-NiSi | $-270...1300$ °C |
| C | W5Re -W26Re | $0...2320$ °C |
| D | W3Re -W25Re | $0...2400$ °C |
| L | Fe-CuNi | $-200...900$ °C |

2300 °C aufgelistet. Sie sind z. T. in der DIN EN 60584 verankert. Der vorgenannte Temperaturbereich kann nicht von einem einzigen Thermopaar abgedeckt werden.

Grenzabweichungen

Die standardisierten Thermoelemente sind in drei unterschiedliche Klassen eingeteilt. Die Grenzabweichungen der Thermospannungen gelten für ein Thermopaar mit Leitern, üblicherweise von 0,25 bis 3 mm Ø, unter der Voraussetzung, dass die Vergleichsstelle 0 °C ist, und die Messstelle der

| Typ | Temperaturbereich, Grenzabweichung, Klasse 2 |
|------|---|
| T | -40...133 °C ± 1 °C 133...350 °C ± 0,0075 • I/I |
| E | -40...333 °C ± 2,5 °C 333...900 °C ± 0,0075 • I/I |
| J | -40...333 °C ± 2,5 °C 333...750 °C ± 0,0075 • I/I |
| K, N | -40...333 °C ± 2,5 °C 333...1200 °C ± 0,0075 • I/I |
| R, S | 0...600 °C ± 1,5 °C 600...1600 °C ± 0,0025 • I/I |
| B | 600...1700 °C ± 0,0025 • I/I |
| L | 0...400 °C ± 3 °C 400...700 °C ± 0,75% |

entsprechenden Temperatur I/I ausgesetzt ist. Üblicherweise wird im industriellen Bereich die Klasse 2 verwendet. Nachfolgend die Auflistung der Grenzabweichungen nach DIN EN 60584 T.2

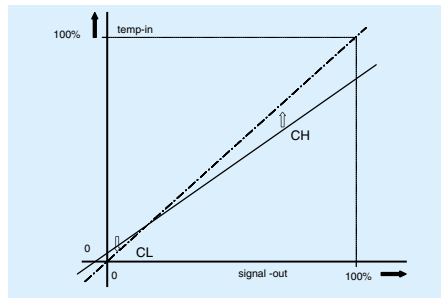
Hochgenaue Messungen

Der Fakt, dass das Ausgangssignal eines Thermoelementes das Ergebnis einer räumlichen Entfernung mit Temperaturgradienten ist, birgt wichtige Implikationen, wenn hohe Genauigkeit gefragt ist. Es ist für hochgenaue Messungen erforderlich, jedes Thermoelement für sich gegen eine – besser mindestens drei – bekannte Bezugs-temperatur zu kalibrieren. Diese Kalibration kann in einem Flüssigkeitsbad oder einem Ofen mit isothermen Konditionen erfolgen. Eine andere Methode, um genaue Ergebnisse zu erzielen, ist der regelmäßige Vergleich mit einem an gleicher Stelle platzierten kalibrierten Temperaturfühler.

Temperaturerfassung und Auswertung

Die Erfassung der momentan in einer bestimmten Situation herrschenden Temperatur ist eine wichtige Maßnahme in der Verfahrenstechnik, wie auch in vielen Bereichen der Industrie und unseres täglichen Lebens. Häufig ist es erforderlich und manchmal lebenswichtig, Überschreitungen oder Unterschreitungen zu erkennen, um gegebenenfalls einzugreifen und den Prozess unter Kontrolle zu halten.

Dass Geräte der Mess- und Regeltechnik auf digitaler Basis arbeiten, ist Stand der Technik. Kernstück ist jeweils ein Mikrocontroller, der in Zusammenhang mit der peripheren Elektronik dem Anwender eine problemlose Anpassung an die jeweilige Messaufgabe ermöglichen soll. Neben bislang üblichen Verfahren zur Anpassung mit



7: Sensoranpassung in Null und Messspanne

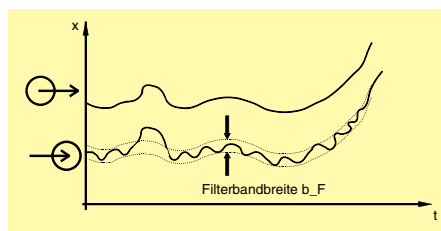
einem Personal Computer bzw. Laptop bieten UNIFLEX C-Messumformer von PMA Kassel insbesondere die Möglichkeit der „Vor-Ort-Bedienung“, wobei Konfiguration und Parametrierung eingeschlossen sind.

Mit nur drei robusten Tasten werden alle Einstellungen vorgenommen. Spürbare Druckpunkte und eine automatische Erhöhung der Verstellgeschwindigkeit bewirken eine schnelle und sichere Einstellung. Die Bedienerfunktionen sind anwenderfreundlich und klar in drei Ebenen gegliedert:

- Die Bedien-Ebene zur Umschaltung der Anzeige von Ein- auf Ausgangssignal,
- die Parameter-Ebene zur Verstellung von Grenzwert, Grenzwertparameter, Messanfang und Messende, Filterparameter, Skalierung von Anzeige und Ausgangssignal,
- die Konfigurationsebene zum Einstellen der Fühlerart, Linearisierung, Netzfrequenz, Signalausgang, Relaisfunktion etc.,
- die Sensoranpassungsfunktion mit der Möglichkeit der Nachstellung von Messanfang und Messspanne zur genaueren Anpassung von Sensor und Messumformer.

Signalverarbeitung und Grenzwertüberwachung

Das Eingangssignal durchläuft zunächst die Schutzbeschaltung gegen elektromagnetische Beeinflussungen, um dann über umschaltbare Vorverstärker zu einem digitalisierbaren Signal aufbereitet zu werden. Mit ein A/D Wandler (< 20000 Schritte) wird das Eingangssignal digitalisiert und dem Mikrocontroller zur Verfügung gestellt. Plausibilitätskontrollen des Signales führen je nach Geber zu den Bruchüberwachungsfunktionen. Im Mikrocontroller werden die entsprechenden Korrekturen wie Linearisierung nach vorgegebenen Polynomen (z. B. Thermoelemente) oder kundenspezifischen Tabellen, durchgeführt. Die Filterung des Signales geschieht über ein Sw-Filter, das sich auf Zeitkonstante sowie auf die Bandbreite der Störung einstellen lässt. Die Bandbreite ist die einstellbare Toleranz um den Istwert, in der das Filter aktiv ist. Signalveränderungen größer als die einstellbare Bandbreite werden als definierte Signalveränderungen ohne Verzögerung direkt an den Ausgang durchgegeben.



8: Filterfunktion

Natürlich wird hier auch ein eingestellter Grenzwert überwacht und die entsprechende Meldung für das leistungsfähige Ausgangsrelais generiert. Mit einem störunabhängigen ED-Verfahren (Einschaltdauer-verhältnis) steuert der Mikrocontroller über die enorm wichtige galvanische Trennung die Ausgangsstufe an. Die Auflösung beträgt hier über 9 000 Schritte. Diese Ausgangsstufe stellt parallel das eingepreßte Strom- wie das Spannungs-Einheitssignal an den Klemmen zur Verfügung.

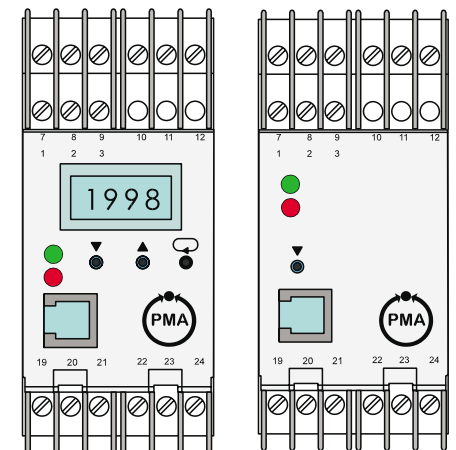
Alle veränderbaren Daten sind in einem EEPROM verlustsicher abgelegt, so dass die Einstellungen nicht verloren gehen können.

Kommunikation

Die Messumformer weisen nicht nur eine übersichtliche Bedien- und Visualisierungsebene auf – wodurch sie unabhängig von zusätzlichen technischen Hilfsmitteln sind – sie bieten auch mit einer ständig verfügbaren seriellen Schnittstelle die Möglichkeit der Programmierung mit Hilfe eines PCs.

Damit können die am Messumformer eingestellten Konfigurationen und Parameter dokumentiert und als Datenfile abgelegt werden. Natürlich kann auch die Einstellung während des Betriebes über die Schnittstelle durchgeführt werden.

In Vorbereitung sind auch Geräte mit Profibus- und mit CAN-Schnittstelle.



9: Messumformer mit und ohne Bedienoberfläche

Nur „digital“ ist nicht genug

Ohne Kenntnis der Abläufe bei den verschiedenen zum Einsatz kommenden Temperatursensoren hilft auch „geballter Einsatz“ von Digitaltechnik wenig. Wenn aber Digitaltechnik zum Einsatz kommt, so sollte sie anwenderfreundlich und betriebssicher konzipiert sein sowie ohne zusätzliche Hilfsmittel zum Einstellen auskommen. Das Ergebnis: erhöhte Verfügbarkeit und reduzierte Variantenvielfalt bei weit reichender anwenderspezifischer Einstellungsmöglichkeit, dafür stehen die Messumformer der Serie UNIFLEX CI/CB zur Verfügung.

PMA

501

¹⁾ Internationale Temperaturskala 1990
²⁾ Widerstand in Ω bei 0 °C
³⁾ Pt100 = 100 Ω bei 0 °C
⁴⁾ Elektromotorische Kraft