

# Temperaturmessung mit Widerstandsthermometern (z.B. Pt100) und Thermoelementen

Whitepaper

Im Bereich der physikalischen Messtechnik sind Temperaturen die am häufigsten zu messenden Größen. Insbesondere in der Prozess- und Verfahrenstechnik stellt die Temperaturmessung das „messtechnische Rückrad“ dar. Bei den imc Messgeräten gibt es im Bereich der sogenannten „Mixed Signal Applications“ kaum ein Messgerät, das ohne eine Temperatur-Messmöglichkeit geliefert wird. In diesem White-Paper soll die Temperaturmesstechnik mit den beiden wichtigsten Temperatursensoren Widerstandsthermometer (Pt 100) und Thermoelement erläutert werden.

## Widerstandsthermometer

Beim Widerstandsthermometer wird der physikalische Effekt ausgenutzt, dass der elektrische Widerstand mit der Temperatur variiert. Der Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Widerstand kann durch die Gleichung

$$R(T_M) = R_0 [1 + a(T_M - T_0) + b(T_M - T_0)^2 + c(T_M - T_0)^3 + \dots]$$

beschrieben werden.  $R_0$  ist der Nennwiderstand, der für eine bestimmte Temperatur  $T_0$  gültig ist.  $T_M$  ist die Temperatur des Widerstandes und  $a, b, c, \dots$  sind material abhängige Konstanten. Beispielsweise beträgt  $R_0$  beim Pt100 gerade  $100 \Omega$  bei  $0^\circ\text{C}$  und der Messbereich erstreckt sich von  $-200$  bis  $850^\circ\text{C}$ . Für die Bestimmung des Widerstandswertes wird ein konstant Strom  $I_k$  (üblicherweise  $\leq 1 \text{ mA}$ ) vorgegeben und der Spannungsabfall am Widerstand ausgewertet. Folgende Schaltungen sind gebräuchlich:

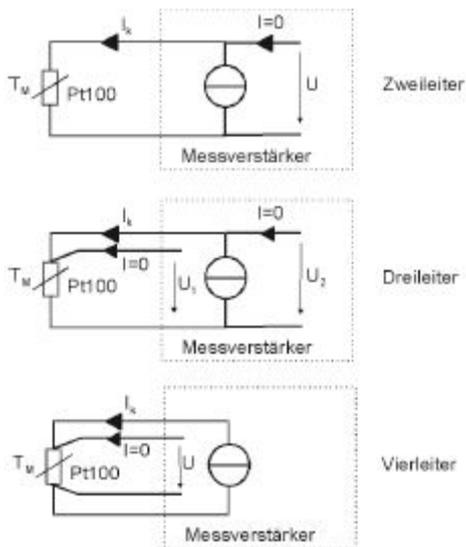


Abb. 1: Anschluss von Widerstandsmomenten

Bei der **Zweileiter-Technik** speist die Stromquelle den temperaturabhängigen Widerstand und die gemessene Spannung  $U$  setzt sich aus dem Spannungsabfall am Widerstand und den Spannungsabfällen an den Zuleitungswiderständen der Anschlusskabel zusammen. Dies bedeutet, dass ein systematischer Messfehler durch den Spannungsabfall auf den Zuleitungen entsteht. Anders ausgedrückt heißt das, dass zwar der Strom der Stromquelle  $I_k$  genau bekannt ist, die Spannung  $U$  jedoch um die Spannungsabfälle auf oberer und unterer Zuleitung zu groß gemessen wird.

Eine bessere Methode stellt die **Dreileiter-Technik** dar. Durch Messung von  $U_1$  und  $U_2$  lässt sich der Einfluss durch die Zuleitungswiderstände eliminieren. Voraussetzung hierfür ist, dass sowohl Hin- als auch Rückleiter gleich lang und von gleichem Material sind und dass sie denselben Temperaturen ausgesetzt sind. Hier ist wieder der Strom  $I_k$  bekannt, die Spannung  $U_1$  ist jedoch um den Spannungsabfall an der unteren Zuleitung zu hoch gemessen. Aus Kenntnis von  $U_1$  und  $U_2$  lässt sich bei gleichartigen Zuleitungen der Widerstand des Pt100 ermitteln.

Die optimale Messmethode ist die **Vierleiter-Technik**. Unter der Voraussetzung dass die Spannung  $U$  stromlos gemessen werden kann, ist sowohl die Spannung am Messwiderstand als auch der Strom  $I_k$  durch den Messwiderstand bekannt und damit der Widerstand des Pt100 bestimmbar.

Ein für den praktischen Einsatzfall wichtige Kenngröße ist die Widerstandsänderung bei Temperaturänderung auch als Empfindlichkeit bekannt. Beim Pt100 beträgt diese ca.  $0,4 \Omega/\text{Kelvin}$ , wodurch bei einem konstanten Strom von  $1 \text{ mA}$  eine Spannungsänderung von etwa  $400 \mu\text{V}/\text{Kelvin}$  entsteht.

In der DIN IEC 751 sind die Grenzabweichungen für Widerstandsthermometer angegeben. Es werden zwei Toleranzklassen A und B unterschieden und die Fehler in Kelvin ergeben sich durch Einsetzen des Zahlenwertes der Widerstandstemperatur  $T_M$ :

Klasse A:  $\pm(0,15 + 0,002 T_M)$

Klasse B:  $\pm(0,30 + 0,005 T_M)$

Die Klasse A gilt im Temperaturbereich -200...650°C bei Anwendung der Drei- und Vierleitertechnik. Die Klasse B gilt im gesamten Bereich von -200...850°C.

### Beispiel

Mit einem Pt100 Widerstandsthermometer der Klasse A wurde eine Temperatur von 80°C gemessen. Damit ergibt sich die maximale Messunsicherheit (ohne Fehler des Messgerätes) zu  $\pm(0,15 + 0,002 \cdot 80)K = \pm 0,31 K$ , so dass das Messergebnis aufgrund der Sensorunsicherheit  $T_M = (80 \pm 0,31)^\circ C$  lautet. Die Messunsicherheit der bei imc typischen Messverstärker zur Temperaturmessung (z.B. C8 oder OSC16/32) beträgt  $\pm 0,1K$ .

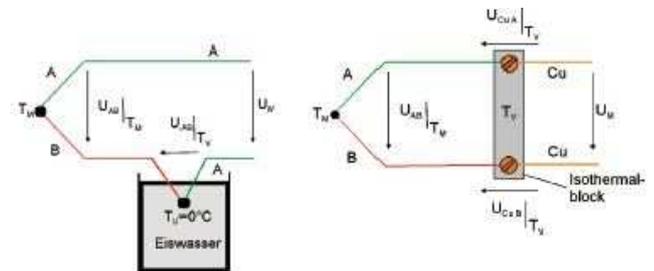
Bei den Messverstärkern der imc-Messgeräte sind die Stromquellen in den Verstärkermodulen bereits vorhanden. Um die Nichtlinearitäten der Widerstandsthermometer muss sich der Anwender ebenfalls nicht kümmern, da diese vom Messsystem mittels Online-Verrechnung automatisch korrigiert werden.

### Thermoelemente

Bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen nutzt man einen anderen physikalischen Effekt. Verbindet man zwei unterschiedliche elektrische Leiter aus den Materialien A und B, so entsteht am Materialübergang eine

Thermospannung  $U_{AB}$ . Dieser elektrische Effekt wird Seebeck-Effekt genannt.

Die Funktionsweise einer Temperaturmessung mit Thermoelement erläutert nachfolgendes Bild.



Fügt man zwei Thermoelemente mit den Materialien A und B in der links gezeichneten Weise zusammen, so befindet sich ein Materialübergang von A nach B bei der Messtemperatur  $T_M$  und der zweite Materialübergang eines weiteren Thermoelements von A nach B wird in ein Eiswasserbad mit der Vergleichstemperatur  $T_V = 0^\circ C$  getaucht. Damit ergibt sich die Messspannung  $U_M$  zu

$$U_M = U_{AB|T_M} - U_{AB|T_V}$$

$U_M$  ist also die Thermospannung des Thermoelements mit den Materialien AB bei der Messtemperatur  $T_M$  abzüglich der Thermospannung derselben Materialpaarung bei Eiswasser. Die Thermospannung des Thermoelements bei  $0^\circ C$  ist bekannt, so dass aus der Messspannung  $U_M$  die Temperatur an der Messstelle  $T_M$  bestimmt werden kann.

Bei der Messung der Spannung  $U_M$  wird durch die Verbindung mit Kupferkabel wiederum ein Materialübergang vom Material A (grün) zum Messgerät (üblicherweise Kupfer) erfolgen. Dieser Übergang ist allerdings nicht störend, solange sich beide Anschlusskabel auf derselben Temperatur befinden. Die hierbei entstehenden Thermospannungen heben sich auf.

Ein Hantieren mit Eiswasser wäre sehr umständlich und wird daher in der Praxis nicht angewendet, zumal es, wie im obigen Bild rechts gezeigt, eine wesentlich elegantere Methode gibt. Im rechten Bild ist zu sehen, dass die beiden Anschlüsse des Thermoelements mit Schraubklemmen auf einem sogenannten Isothermalblock befestigt sind. Ein Isothermalblock ist ein Gebilde, bei dem darauf geachtet wurde, dass sich an beiden Schraubklemmen dieselbe Temperatur  $T_V$  einstellt. Ein Isothermalblock sollte die Wärme sehr gut leiten und andererseits ein guter elektrischer Isolator sein. In diesem Fall ergibt sich die Messspannung  $U_M$  zu

$$\begin{aligned} U_M &= U_{AB|T_M} + U_{CuA|T_V} - U_{CuB|T_V} \\ &= U_{AB|T_M} + (U_{CuA} - U_{CuB})|T_V \\ &= U_{AB|T_M} + U_{AB|T_V} \end{aligned}$$

Da die Materialübergänge von Material A nach Kupfer und

B nach Kupfer auf demselben Temperaturniveau  $T_V$  sind,

verhalten sie sich wie eine Materialkombination von A und B bei der Temperatur  $T_V$ . Die praktische Konsequenz aus dieser Gleichung besteht darin, dass die Temperatur der Vergleich Stelle  $T_V$  bekannt sein muss. Üblicherweise wird diese Temperatur mit einem Widerstandsthermometer gemessen. Man ermittelt also durch Messung der Spannung  $U_M$  bei Kenntnis des Thermoelementtyps nicht die Temperatur  $T_M$  der Messstelle, sondern die Temperaturdifferenz zwischen  $T_M$  und der Vergleichsstelle  $T_V$ . Da aber  $T_V$  durch die gleichzeitige Messung mit dem Widerstandsthermometer (z.B. Pt100) bekannt ist, kann die Messstellentemperatur  $T_M$  berechnet werden. Obige Gleichung kann man einfach nachprüfen, in dem man an Stelle eines Ther-

moelementes einen Kurzschlussdraht an den Klemmstellen des Thermoelements anschließt. Das Ergebnis der Messung wird in diesem Fall die Vergleichstemperatur  $T_V$  des Isothermalblocks sein.

Bei dieser Methode kann mit Thermoelementen verschiedensten Typs gemessen werden. Der Anwender muss in der Bediensoftware imcDEVICES lediglich angeben, welcher Thermoelementtyp an welchem Messeingang angeschlossen ist.



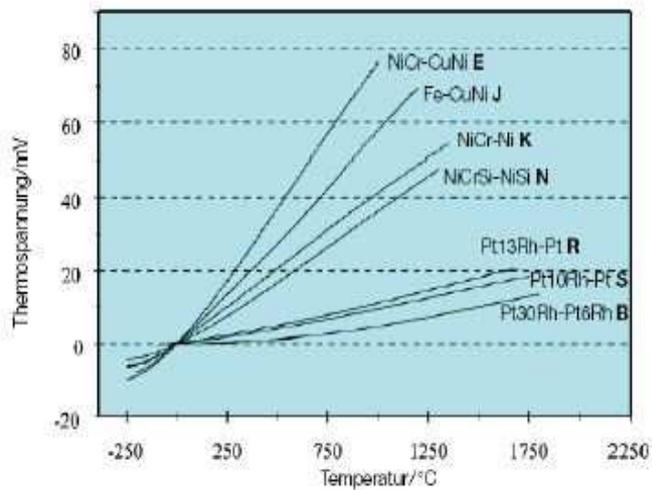
*Geöffneter imc Anschlussstecker mit Thermoelement*



*Rückseite der Anschlussplatine mit Isothermalblock*

Sowohl bei Widerstandsthermometern als auch bei Thermoelementen besteht ein nicht-linearer Zusammenhang zwischen der Messgröße Temperatur und der messbaren Spannung. Diese Nichtlinearität wird bei den imc-Messgeräten mit in den Geräten vorhandener Rechnerunterstützung korrigiert und eine Umrechnung in die Zielgröße Temperatur wird vorgenommen.

Nachfolgend ist eine Tabelle für einige gängige Thermoelemente mit Messbereichen und Fehlerklassen angegeben. Es handelt sich um solche Elemente, die hinsichtlich Thermospannung und Toleranz festgelegt sind.



Kennlinien von Thermoelementen nach DIN EN 60 584

Abschließend werden noch einige wichtige technische Daten für die verschiedenen Thermoelementtypen in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt.

Element	Maximal-Temperatur	Definiert bis	Plus-Schenkel	Minus-Schenkel
Fe-CuNi „J“	750°C	1200°C	Schwarz	Weiß
Cu-CuNi „T“	350°C	400°C	Braun	Weiß
NiCr-Ni „K“	1200°C	1370°C	Grün	Weiß
NiCr-CuNi „E“	900°C	1000°C	Violett	Weiß
NiCrSi-NiSi „N“	1200°C	1300°C	Lila	Weiß
Pt10Rh-Pt „S“	1600°C	1540°C	Orange	Weiß
Pt13Rh-Pt „R“	1600°C	1760°C	orange	Weiß
Pt30Rh-Pt6Rh „B“	1700°C	1820°C	Keine Angabe	Weiß

Definition der Anschlussleitungen mit farblicher Kennzeichnung

## Grenزابweichung verschiedener Thermoelemente

Element	Typ	Maximal-Temp. °C	definiert bis °C	Grenزابweichungen
Fe-CuNi	J	750	1200	Klasse 1 -40...750°C: $\pm 0,004 T$ oder $\pm 1,5^\circ\text{C}$ Klasse 2 -40...750°C: $\pm 0,0075 T$ oder $\pm 2,5^\circ\text{C}$ Klasse 3 - - -
Cu-CuNi	T	350	400	Klasse 1 -40...350°C: $\pm 0,004 T$ oder $\pm 0,5^\circ\text{C}$ Klasse 2 -40...350°C: $\pm 0,0075 T$ oder $\pm 1,0^\circ\text{C}$ Klasse 3 -200...40°C: $\pm 0,015 T$ oder $\pm 1,0^\circ\text{C}$
Ni-CrNi	K	1200	1370	Klasse 1 -40...1000°C: $\pm 0,004 T$ oder $\pm 1,5^\circ\text{C}$ Klasse 2 -40...1200°C: $\pm 0,0075 T$ oder $\pm 2,5^\circ\text{C}$ Klasse 3 -200...40°C: $\pm 0,015 T$ oder $\pm 2,5^\circ\text{C}$
NiCrSi-NiSi	N	1200	1300	wie bei Typ K
NiCr-CuNi	E	900	1000	Klasse 1 -40...800°C: $\pm 0,004 T$ oder $\pm 1,5^\circ\text{C}$ Klasse 2 -40...900°C: $\pm 0,0075 T$ oder $\pm 2,5^\circ\text{C}$ Klasse 3 -200...40°C: $\pm 0,015 T$ oder $\pm 2,5^\circ\text{C}$
Pt10Rh-Pt	S	1600	1540	Klasse 1 0...1600°C: $\pm [1+(T-1100)0,003]$ oder $\pm 1,0^\circ\text{C}$ Klasse 2 -40...1600°C: $\pm 0,0025 T$ oder $\pm 1,5^\circ\text{C}$ Klasse 3 - - -
Pt13Rh-Pt	R	1600	1760	wie bei Typ S
Pt30Rh-Pt6Rh	B	1700	1820	Klasse 1 - - - Klasse 2 600...1700°C: $\pm 0,0025 T$ oder $\pm 1,5^\circ\text{C}$ Klasse 3 600...1700°C: $\pm 0,005 T$ oder $\pm 4,0^\circ\text{C}$
Fe-CuNi	L	600	900	100...400°C: $\pm 3,0^\circ\text{C}$ 400...900°C $\pm 0,75^\circ\text{C}$
Cu-CuNi	U	900	600	100...400°C: $\pm 3,0^\circ\text{C}$ 400...600°C $\pm 0,75^\circ\text{C}$

### Thermoelement mit Temperaturbereich und Grenزابweichungen

Die Thermoelementkenngrößen sind in der DIN 43710 für die Typen „L“ und „U“ und in der DIN IEC 584-1 für die übrigen Typen festgelegt. Die Maximaltemperatur ist diejenige Temperatur, bis zu der eine Grenزابweichung festgelegt ist. Mit „definiert bis“ ist die Temperatur gemeint, bis zu der eine Thermospannung angegeben wird.

Die Empfindlichkeit von Thermoelementen ist üblicherweise geringer als die von Widerstandsthermometern. Beispielsweise beträgt die Empfindlichkeit eines Thermoelements vom Typ K etwa  $40 \mu\text{V}/\text{Kelvin}$  und ist damit nur 10% der Empfindlichkeit des Pt100 Wertes. Bei Thermoelementen, die für hohe Tem-

peraturen geeignet sind (z. B. Typ S oder B), ist die Empfindlichkeit noch wesentlich geringer. Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass Thermoelemente für wesentlich höhere Temperaturen eingesetzt werden können verglichen mit Widerstandsthermometern. Zudem sind Thermoelemente wesentlich kostengünstiger als Widerstandsthermometer. Nachteilig bei Thermoelementen ist deren geringe Empfindlichkeit und die relativ großen Grenزابweichungen.

Autor: Prof. Dr.-Ing. Klaus Metzger

## Weitere Informationen erhalten Sie unter:

### imc Test & Measurement GmbH

Voltastr. 5  
D-13355 Berlin

Telefon: +49 (0)30-46 7090-0  
Fax: +49 (0)30-46 31 576  
E-Mail: [hotline@imc-tm.de](mailto:hotline@imc-tm.de)  
Internet: <http://www.imc-tm.de>

Die imc Test & Measurement GmbH ist Hersteller und Lösungsanbieter von produktiven Mess- und Prüfsystemen für Forschung, Entwicklung, Service und Fertigung. Darüber hinaus konzipiert und produziert imc schlüsselfertige Elektromotorenprüfstände. Passgenaue Sensor- und Telemetriesysteme ergänzen unser Produktportfolio.

Unsere Anwender kommen aus den Bereichen Fahrzeugtechnik, Maschinenbau, Bahn, Luftfahrt und Energie. Sie nutzen die imc-Messgeräte, Softwarelösungen und Prüfstände, um Prototypen zu validieren, Produkte zu optimieren, Prozesse zu überwachen und Erkenntnisse aus Messdaten zu gewinnen. Rund um die imc Geräte steht dafür ein umfassendes Dienstleistungsspektrum zur Verfü-

gung, das von der Beratung bis zur kompletten Prüfstandsautomatisierung reicht. Auf diese Weise verfolgen wir konsequent das imc Leistungsversprechen „produktiv messen“.

National wie international unterstützen wir unsere Kunden und Anwender mit einem starken Kompetenz- und Vertriebsnetzwerk.

Wenn Sie mehr über die imc Produkte und Dienstleistungen in Ihrem Land erfahren wollen oder selbst Distributor werden möchten, finden Sie auf unserer Webseite alle Informationen zum imc Partnernetzwerk:

<http://www.imc-tm.de/partner/>



### Nutzungshinweis:

Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Dieser Bericht darf ohne Genehmigung weder bearbeitet, abgewandelt noch in anderer Weise verändert werden. Ausdrücklich gestattet ist das Veröffentlichung und Vervielfältigen des Dokuments. Bei Veröffentlichung bitten wir darum, dass der Name des Autors, des Unternehmens und eine Verlinkung zur Homepage [www.imc-tm.de](http://www.imc-tm.de) genannt werden. Trotz inhaltlicher sorgfältiger Ausarbeitung, kann dieser Bericht Fehler enthalten. Sollten Ihnen unzutreffende Informationen auffallen, bitten wir um einen entsprechenden Hinweis an: [marketing@imc-tm.de](mailto:marketing@imc-tm.de). Eine Haftung für die Richtigkeit der Informationen wird grundsätzlich ausgeschlossen.