

# Kalibrierung eines Thermoelements

## Anwendungsbericht

### Anwendungsberichte zum Thema Thermoelemente

Dies ist der Vierte von vier Anwendungsberichten über Thermoelemente.

1. Grundlagen zu Thermoelementen
2. Auswahl von Geräten zur Kalibrierung von Thermoelementen
3. Berechnung von Unsicherheiten in einem Kalibriersystem für Thermoelemente
4. Kalibrierung eines Thermoelements

### Einrichten einer Thermoelementkalibrierung

#### Anschluss an eine Anzeige oder ein Messgerät

Der Anschluss eines Thermoelements an eine Anzeige oder ein Messgerät hängt davon ab, ob eine interne oder externe Vergleichsstelle verwendet wird. Im Allgemeinen werden interne Vergleichsstellen dann verwendet, wenn es um hohen Durchsatz und niedrige bis mittlere Genauigkeit geht. Hierbei ist die Gefahr von Fehlern geringer und der Ablauf ist einfacher. Die eingeschränkte Genauigkeit hängt mit der zusätzlichen Unsicherheit im Stromkreis der Vergleichsstellenkompensation selbst zusammen (üblicherweise weitere 0,05 °C bis 0,25 °C).

#### Anschluss an die interne Vergleichsstelle

Schließen Sie das 2-Leiter-Thermoelement unter Beachtung der Polarität entweder direkt oder über eine Verlängerung an die Anzeige oder das Messgerät an. Verwenden Sie als Verlängerungsleitung immer dasselbe Thermoelementmaterial und keinesfalls Kupfer, da dies zu Fehlern führt. Achten Sie darauf, dass alle Anschlüsse sauber und fest angeschlossen sind. Lose und/oder verschmutzte Anschlüsse verursachen Störspannungen und Messfehler. Die Verwendung von Schaltern und Multiplexern führt ebenfalls zu Fehlern, da bei diesen Geräten normalerweise Kupfer eingesetzt wird. Es sind Schalter erhältlich, bei denen Thermoelementwerkstoffe verwendet werden. Diese Schalter können verwendet werden, wenn eine große Anzahl unterschiedlicher Thermoelementtypen kalibriert werden muss. Schalter, bei denen Thermoelementwerkstoffe verwendet werden, verursachen jedoch einen Fehler, der sich nur schwer quantifizieren lässt. Wenn eine hohe Anzahl von Thermoelementen kalibriert werden muss, empfehlen sich mehrkanalige Anzeigen bzw. Messgeräte oder eine externe Vergleichsstelle.

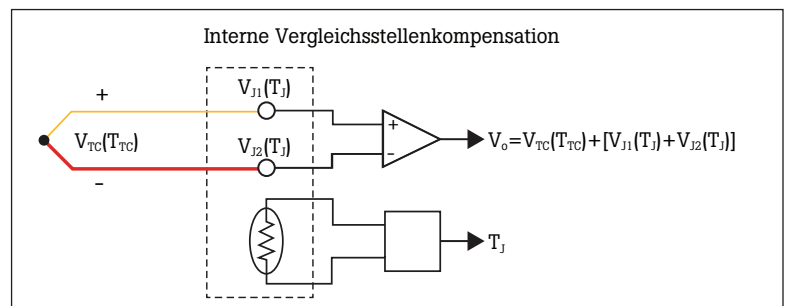


Abbildung 1: Anschluss der internen Vergleichsstelle

### Anschluss an eine externe Vergleichsstelle

Externe Vergleichsstellen liefern die höchste Genauigkeit und werden fast immer zur Kalibrierung von Edelmetall-Thermoelementen (Typen R und S) eingesetzt. Bei den für Nicht-Edelmetall-Thermoelemente geltenden Genauigkeitsanforderungen werden externe Vergleichsstellen im Allgemeinen nicht benötigt. Externe Vergleichsstellen müssen bei hohen Genauigkeitsanforderungen oder dann verwendet werden, wenn Anzeige oder Messgerät nicht mit einer internen Vergleichsstellenkompensation ausgestattet sind (z. B. typische Digitalmultimeter). Externe Vergleichsstellen werden eher bei einem einzelnen zu kalibrierenden Thermoelement eingesetzt. Wenn jedoch mehrere Thermoelemente kalibriert werden sollen, kann der Anschluss der externen Vergleichsstelle relativ kompliziert werden. Darüber hinaus müssen Unsicherheiten auf ein Minimum beschränkt werden.

Das Thermoelement wird mit hochwertigen Kupferleitungen verbunden, die an die Anzeige oder das Messgerät angeschlossen werden. Die Thermoelement-Kupfer-Verbindungen werden anschließend in ein Eisbad getaucht und bilden die Vergleichsstelle. Die Anschlüsse müssen elektrisch voneinander isoliert und trocken sein. Üblicherweise sind die Leiter verschweißt, verlötet oder fest miteinander verdrillt und durch einen Schrumpfschlauch geschützt. Die Leiter werden als Gruppe in ein dünnwandiges, am Ende geschlossenes Metall- oder Glasrohr eingeführt. Anschließend wird das Rohr in das Eisbad gelegt. Die Eintauchtiefe ist ein wichtiger Faktor und hängt vom Durchmesser der Leiter ab. Üblicherweise reichen 15 cm bis 30 cm aus. Die Kupferanschlussleitungen werden entweder direkt oder über einen Schalter an die Anzeige oder das Messgerät angeschlossen. Für jedes zu kalibrierende Thermoelement wird eine eigene Vergleichsstelle benötigt.

Manche zu kalibrierende Thermoelemente sind mit Thermoelementsteckern versehen und können nicht ohne Weiteres wie beschrieben angeschlossen werden. In diesen Fällen können aus Kupfer und dem Thermoelementdraht des benötigten Typs „Vergleichsstellenmessfühler“ aufgebaut werden. Das Thermoelement-Ende wird mit Steckern versehen, die den Steckern des zu kalibrierenden Thermoelements entsprechen. Falls eine hohe Genauigkeit benötigt wird, müssen diese Messfühler kalibriert werden. Alternativ kann eine interne Vergleichsstellenkompensation verwendet werden. Häufig werden Anzeigen und Messgeräte mit integrierter Vergleichsstellenkompensation und Thermoelementbuchsen verwendet.

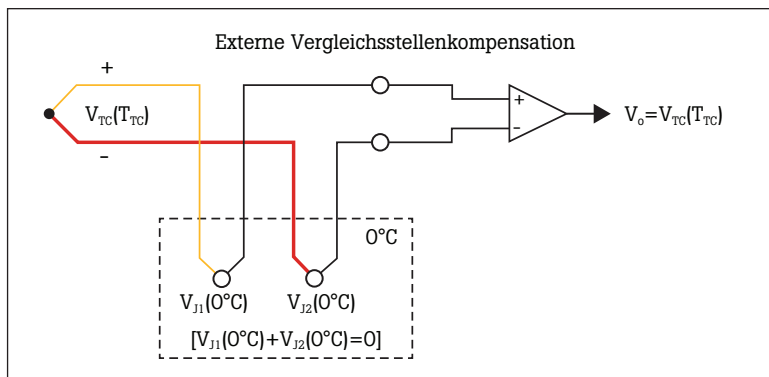


Abbildung 2: Anschluss einer externen Vergleichsstelle

### Platzierung des Messfühlers

Alle Temperaturquellen weisen Instabilitäten und Gradienten auf. Diese führen zu Kalibrierfehlern und/oder -unsicherheiten. Messfühler sollten so dicht wie möglich nebeneinander angeordnet werden, um diese Auswirkungen auf ein Minimum zu beschränken. Bei Blockkalibratoren sind die Eintauchpunkte für die Messfühler fest vorgegeben. Bei Bädern und bei Öfen mit offenen Röhren ist die Anordnung der Messfühler nicht vorgegeben. Die zu kalibrierenden Messfühler sollten radial um den in der Mitte befindlichen Referenzmessfühler angeordnet werden. Bei Verwendung eines Röhrenofens werden die Thermoelemente mit einer Glasfaserschnur oder einem Glasfaserband zusammen mit einem Referenzmessfühler zu einem Bündel verschnürt und in den Röhrenofen gelegt. Dadurch ist der Abstand zwischen allen zu kalibrierenden Thermoelementen und dem Referenzmessfühler identisch.

Des Weiteren sollten sich die Temperatursensorelemente in derselben Ebene befinden. Bei Thermoelementen befindet sich die Messstelle üblicherweise an der Spitze des Messfühlers. Sie müssen ausreichend tief eingetaucht sein, sodass kein Temperaturabfall über den Mantel des Thermoelements auftritt. Im Allgemeinen reicht eine Eintauchtiefe der Messfühler, die dem 15-Fachen des Messfühlerdurchmessers plus Länge des Sensorelements entspricht. Beispiel: Ein Messfühler mit einem Durchmesser von 0,65 mm und einer Länge des Sensorelements von 3,2 cm müsste mindestens 13 cm  $((15 \times 0,65 \text{ cm}) + 3,2 \text{ cm} \approx 13 \text{ cm})$  eingetaucht werden. Diese Faustregel eignet sich generell für dünnwandige Messfühler und bei guter Wärmeübertragung. Bei einem dickwandigen Messfühler und/oder schlechter Wärmeübertragung (z. B. bei einem Blockkalibrator mit unpassenden Lochgrößen) müssen die Messfühler tiefer eingetaucht werden.

## Datenerfassung

Industrienormen und Richtlinien schreiben vor, dass ein Thermoelement im gesamten Temperaturbereich kalibriert sein muss, in dem es eingesetzt wird. Die Kalibrierung kann zeitaufwendig sein, insbesondere dann, wenn mehrere Thermoelemente kalibriert werden müssen. Hierzu gehören das Aufheizen der Temperaturquelle auf einen Temperatureinstellwert und das Aufzeichnen der Thermoelement-Messwerte, nachdem sich der Temperatureinstellwert stabilisiert hat. Bei jedem Temperatureinstellwert muss der Temperaturquelle ausreichend Zeit gegeben werden, um eine stabile Temperatur und gleichmäßige Temperaturverteilung zu erreichen, bevor Messwerte aufgezeichnet werden können. Dieser Ablauf muss im gesamten Betriebstemperaturbereich des Thermoelements nacheinander bei jedem Temperatureinstellwert wiederholt werden.

## Automatisierung der Kalibrierung von Thermoelementen mit einem Super-DAQ 1586A

Der Temperaturscanner Super-DAQ 1586A enthält eine Funktion zur „automatischen Sensorkalibrierung“, mit der die Kalibrierung von Thermoelementen automatisiert werden kann. Wird der Super-DAQ 1586A an einen Thermoelement-Kalibrierofen 9118A angeschlossen, so steuert und überwacht der Super-DAQ den Temperatureinstellwert des 9118A und liest die Temperaturen von bis zu 40 Thermoelemente aus. Außerdem erfasst er Daten automatisch, wenn der Ofen den stabilen Zustand innerhalb von Parametern erreicht hat, die der Anwender zuvor festgelegt hat. Der Super-DAQ schaltet den 9118A dann zu den übrigen programmierten Temperatureinstellwerten weiter und erfasst auf diese Weise Daten bei jedem Wert. Sobald der Test konfiguriert und gestartet wurde, kann sich der Techniker anderen Aufgaben widmen. Mit dieser einzigartigen Funktion, die nur von Fluke Calibration angeboten wird, können die Produktivität des Kalibrierlabors und die Messgenauigkeit erheblich verbessert werden.

Weitere Informationen hierzu finden Sie im 1586A-Ressourcencenter unter [www.flukecal.com](http://www.flukecal.com).

## Zwei Arten der Kalibrierung

In den USA sind zwei Arten der Kalibrierung von Thermoelementen durch Richtlinien festgelegt: Charakterisierung und Toleranzprüfung. Die meisten Thermoelemente sind nicht stabil genug, um mittels Charakterisierung kalibriert werden zu können. Normalerweise werden Thermoelement-Messfühler und/oder Thermoelementleitungen mittels Toleranzprüfung auf Einhaltung der Fehlerkategorien geprüft, die von der American Society for Testing and Materials (ASTM) festgelegt wurden. Bei der Toleranzprüfung wird die Ausgangsspannung bei verschiedenen Temperaturen gemessen und der Fehler anhand von Standardtabelle 3-n berechnet.

## Toleranzprüfung

In den meisten Fällen wird bei Thermoelementen mittels Toleranzprüfung ermittelt, ob Abweichungen gegenüber dem Standardmodell innerhalb bestimmter Grenzen liegen. Die ASTM sieht zwei Gruppen von Grenzwerten vor, „Standard Limits of Error“ (Standard-Fehlergrenzen) und „Special Limits of Error“ (Sonder-Fehlergrenzen). Bei den Sonder-Fehlergrenzen sind die Toleranzen enger, um dem verbesserten Betriebsverhalten von höherwertigen Leitungen Rechnung zu tragen, die bei teureren Thermoelementen eingesetzt werden. Bei der Kalibrierung eines Thermoelements auf der Grundlage der ASTM-Spezifikationen wird ermittelt, ob das Thermoelement dem Standardmodell entspricht. In einigen Fällen werden einzelne Thermoelementmessfühler kalibriert, während in anderen Fällen ganze Drahtrollen kalibriert werden, die eine Zertifizierung benötigen. Die Methode ist unkompliziert und es müssen weder Daten angepasst noch umfangreiche Berechnungen durchgeführt werden.

### Schritte zur Durchführung der Toleranzprüfung

1. Die Spannungswerte und die Temperaturen der zu prüfenden Thermoelemente werden mit denselben Messwerten eines Referenz-Thermoelements verglichen. Die Spannungswerte können direkt von einem ausreichend genauen Digitalvoltmeter oder von einer anderen Anzeige abgelesen werden, die für diesen Zweck geeignet ist.
2. Bei jedem zu kalibrierenden Thermoelement wird der Temperaturunterschied zum Referenz-Thermoelement in Grad Celsius notiert. Diese Umrechnung geschieht mithilfe von Tabellen, in denen für den Thermoelementtyp die Spannungswerte und die entsprechenden Temperaturwerte (in °C) aufgeführt sind. Hierfür geeignete Tabellen müssen dieselben Daten und Werte enthalten, die entweder im NIST-Monograph 175 (1993) oder in ASTM E230-03 (2011) zu finden sind.
3. Thermoelement-Toleranzen, die z. B. im Anhang A „Übersicht über die Toleranzen von Thermoelementen“ aufgeführt sind, dienen zur Ermittlung, ob die zu kalibrierenden Thermoelemente in Bezug auf die Messwerte eines Referenz-Thermoelements entweder den Werten der „Standardtoleranzen“ oder der „Sondertoleranzen“ entsprechen.

### Charakterisierung von Thermoelementen

Wenn die Toleranzprüfung nicht genügend Informationen über das Spannungsverhalten eines Thermoelements bei den jeweiligen Temperaturen liefert, ist mithilfe einer Charakterisierung des Thermoelementverhaltens in seinem gesamten Temperaturbereich eine umfassendere Analyse möglich. Die Charakterisierung von Thermoelementen ist normalerweise den Anwendungsfällen vorbehalten, bei denen Edelmetall-Thermoelemente eingesetzt werden, um höhere Genauigkeiten zu erreichen. Meistens sind Nicht-Edelmetall-Thermoelemente nicht stabil genug und zeigen daher später nicht das während der Charakterisierung beobachtete Verhalten.

Bei der Charakterisierung eines Thermoelements wird die Differenz zwischen der gemessenen Spannung und einer Referenzspannung ermittelt. Anschließend wird diese Differenz mithilfe eines Polynoms 2. Ordnung umgerechnet. Das Prinzip der Datenanpassung ist einfach. In der Praxis kann sich die Datenanpassung jedoch als kompliziert erweisen. Im Wesentlichen besteht der Prozess darin, mehrere Gleichungen gleichzeitig zu lösen, die die Kalibrierdaten enthalten, um eine Gruppe von Koeffizienten zu erhalten, die speziell für das Thermoelement und die Kalibrierung gelten. Eine allgemein anerkannte „Charakterisierung“ beruht auf den Prinzipien, die in der NIST-Sonderveröffentlichung 250-35 formuliert sind und bei Fluke Calibration zur Neuzertifizierung von Thermoelementen der Typen S und R dienen<sup>(1)</sup>.

**Charakterisierungsschritte**

1. Die Thermoelemente werden nacheinander in vier Fixpunktzellen gelegt. Eine Übersicht mit Informationen über Fixpunktzellen ist in Abbildung 3 enthalten. Die Spannungen der zu kalibrierenden Thermoelemente werden in Bezug auf die vier Referenztemperaturen der Fixpunktzellen gemessen. Die Messstelle des Thermoelements befindet sich in der Fixpunktzelle, während die Vergleichsstelle des Thermoelements in einem Wasser-Eisbad durch separates Thermistornormal überwacht wird. Hinweis: Zur Erzeugung der Prüftemperaturen können anstelle der Fixpunktzellen auch Temperaturquellen wie Blockkalibratoren, Öfen oder Flüssigkeitsbäder sowie ein Referenz-Thermoelement verwendet werden. In diesem Fall wird die Temperaturquelle auf verschiedene Referenztemperaturen eingestellt, sodass die zu kalibrierenden, radial angeordneten Thermoelemente mit Messwerten verglichen werden können, die mithilfe des Referenz-Thermoelements in der Mitte der Temperaturquelle gemessen wurden.

2. Nachdem die zu kalibrierenden Thermoelemente und die Fixpunktzelle den thermischen Gleichgewichtszustand erreicht haben, wird die Spannung des Thermoelements aufgezeichnet. Dies geschieht bei den Temperaturen aller vier Fixpunktzellen. Zu jedem Spannungswert des Thermoelements gehört auch der entsprechende Wert der Temperatur des Eisbads in einem separaten Behälter, in dem sich die Vergleichsstelle des Thermoelements befindet.

3. Die bei dem zu kalibrierenden Thermoelement an jedem Fixpunkt erhaltenen Spannungsmesswerte sind die Bestandteile, die zur Formulierung einer „Abweichungsfunktion“ benötigt werden. Diese Funktion wird anschließend zur Standard-„Referenzfunktion“ des Thermoelementtyps hinzugefügt. Das Endergebnis ist eine „Thermoelement-Charakterisierung“ des zu kalibrierenden Thermoelements.

Zur Formulierung der „Abweichungsfunktion“ werden mehrere lineare algebraische Operationen vorgenommen, um mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate eine Lösung für das überbestimmte System zu ermitteln, gebildet durch die „Fixpunkttemperaturen und ihre quadrierten Werte“ und die „Spannungsunterschiede zwischen den durch das zu kalibrierende Thermoelement gemessenen Werten und den Fixpunkttemperaturen“ sowie durch die entsprechenden Spannungswerte der „Referenzfunktion“ bei denselben Fixpunkttemperaturen. Die Lösung nach der Methode der kleinsten Quadrate besteht aus zwei Koeffizienten, die algebraisch zu den entsprechenden Begriffen in der „Referenzfunktion“ addiert werden, um die Funktion zur Charakterisierung des Thermoelements zu erhalten. Anhang B enthält eine Übersicht über die linearen algebraischen Operationen.

Element oder Verbindung für Erstarrungspunkt	Chemisches Symbol	Erstarrungstemperatur (°C) nach ITS-90
Silber	Ag	961,78
Aluminium	Al	660,323
Zink	Zn	419,527
Zinn	Sn	231,928
Wasser	H <sub>2</sub> O	0,010

<sup>(2)</sup>NIST-Monografie 175, (1993), S. 4.

Abbildung 3: Fixpunktzellen

**Anhang A – Übersicht über die Toleranzen von Thermoelementen<sup>(3, 4)</sup>**

TYP B				
Pt - 30 % Rh – Pt - 6 % Rh			Farbkennzeichnung der Verlängerungsleitung = Grau	
Prüftemperaturen	Typ B, Empfindlichkeit	Nominelle Thermospannung	Standardtoleranz (± °C)	Sondertoleranz (± °C)
1250,00 °C	10,622 µV/°C	7,311 mV	6,25	3,13
1000,00 °C	9,123 µV/°C	4,834 mV	5,00	2,50

Messbereich: 870 °C bis 1700 °C; Toleranzen: Standard: ±0,5 % v. Mw.; Sonder: ±0,25 % v. Mw.

TYP E				
Ni-Cr – Konstantan (NiCr - CuNi)			Farbkennzeichnung der Verlängerungsleitung = Violett	
Prüftemperaturen	Typ E, Empfindlichkeit	Nominelle Thermospannung	Standardtoleranz (± °C)	Sondertoleranz (± °C)
870,00 °C	77,393 µV/°C	66,473 mV	4,35	3,48
500,00 °C	80,930 µV/°C	37,005 mV	2,50	2,00
250,00 °C	76,240 µV/°C	17,181 mV	1,70	1,00

Messbereich: -200 °C bis 870 °C; Toleranzen: Standard: ±1,7 °C bzw. ±0,5 % v. Mw. (0 bis 870 °C), je nachdem, welcher Wert größer ist. Sonder: ±1,0 °C bzw. ±0,4 % v. Mw. (0 bis 870 °C), je nachdem, welcher Wert größer ist.

TYP J				
Eisen – Konstantan (Fe - CuNi)			Farbkennzeichnung der Verlängerungsleitung = Schwarz	
Prüftemperaturen	Typ J, Empfindlichkeit	Nominelle Thermospannung	Standardtoleranz (± °C)	Sondertoleranz (± °C)
760,00 °C	63,699 µV/°C	42,281 mV	5,63	3,00
500,00 °C	55,987 µV/°C	27,393 mV	3,75	2,00
250,00 °C	55,512 µV/°C	13,555 mV	2,20	1,10

Messbereich: 0 °C bis 760 °C; Toleranzen: Standard: ±2,2 °C bzw. ±0,75 % v. Mw., je nachdem, welcher Wert größer ist. Sonder: ±1,1 °C bzw. ±0,40 % v. Mw., je nachdem, welcher Wert größer ist.

TYP K				
Ni - 10 % Cr – Ni - 5 % (Aluminiumoxid - Siliziumdioxid)			Farbkennzeichnung der Verlängerungsleitung = Gelb	
Prüftemperaturen	Typ K, Empfindlichkeit	Nominelle Thermospannung	Standardtoleranz (± °C)	Sondertoleranz (± °C)
1260,00 °C	35,566 µV/°C	51,000 mV	9,45	5,04
900,00 °C	40,005 µV/°C	37,326 mV	6,75	3,60
600,00 °C	42,505 µV/°C	24,905 mV	4,50	2,40
300,00 °C	41,446 µV/°C	12,209 mV	2,25	1,20

Messbereich: -200 °C bis 1260 °C; Toleranzen: Standard: ±2,2 °C bzw. ±0,75 % v. Mw. (0 bis 1260 °C), je nachdem, welcher Wert größer ist. Sonder: ±1,1 °C bzw. ±0,40 % v. Mw. (0 bis 1260 °C), je nachdem, welcher Wert größer ist.



TYP N				
Ni - 14 % Cr - 1,5 % Si – Ni - 4.5 % Si - 0.1 % Mg		Farbkennzeichnung der Verlängerungsleitung = Orange		
Prüftemperaturen	Typ N, Empfindlichkeit	Nominelle Thermospannung	Standardtoleranz (± °C)	Sondertoleranz (± °C)
1260,00 °C	36,580 µV/°C	46,060 mV	9,45	5,04
900,000 °C	39,040 µV/°C	32,371 mV	6,75	3,60
600,000 °C	38,959 µV/°C	20,613 mV	4,50	2,40
300,000 °C	35,422 µV/°C	9,341 mV	2,25	1,20

Messbereich: 0 °C bis 1260 °C; Toleranzen: Standard: ±2,2 °C bzw. ±0,75 % v. Mw., je nachdem, welcher Wert größer ist.  
Sonder: ±1,1 °C bzw. ±0,40 % v. Mw., je nachdem, welcher Wert größer ist.

TYP R				
Pt – Pt – 13 % Rh		Farbkennzeichnung der Verlängerungsleitung = Grün		
Prüftemperaturen	Typ R, Empfindlichkeit	Nominelle Thermospannung	Standardtoleranz (± °C)	Sondertoleranz (± °C)
1084,62 °C	13,575 µV/°C	11,640 mV	2,71	1,09
961,78 °C	13,065 µV/°C	10,003 mV	2,40	0,96
660,32 °C	11,641 µV/°C	6,277 mV	1,65	0,66
419,53 °C	10,480 µV/°C	3,611 mV	1,50	0,60
231,93 °C	9,168 µV/°C	1,756 mV	1,50	0,60

Messbereich: 0 °C bis 1480 °C; Toleranzen: Standard: ±1,5 °C bzw. ±0,25 % v. Mw., je nachdem, welcher Wert größer ist.  
Sonder: ±0,6 °C bzw. ±0,10 % v. Mw., je nachdem, welcher Wert größer ist.

TYP S				
Pt – Pt – 10 % Rh		Farbkennzeichnung der Verlängerungsleitung = Grün		
Prüftemperaturen	Typ S, Empfindlichkeit	Nominelle Thermospannung	Standardtoleranz (± °C)	Sondertoleranz (± °C)
1084,62 °C	11,798 µV/°C	10,575 mV	2,71	1,09
961,78 °C	11,418 µV/°C	9,148 mV	2,40	0,96
660,32 °C	10,398 µV/°C	5,860 mV	1,65	0,66
419,53 °C	9,638 µV/°C	3,447 mV	1,50	0,60
231,93 °C	8,711 µV/°C	1,715 mV	1,50	0,60

Messbereich: 0 °C bis 1480 °C; Toleranzen: Standard: ±1,5 °C bzw. ±0,25 % v. Mw., je nachdem, welcher Wert größer ist.  
Sonder: ±0,6 °C bzw. ±0,10 % v. Mw., je nachdem, welcher Wert größer ist.

TYP T				
Kupfer – Konstantan		Farbkennzeichnung der Verlängerungsleitung = Blau		
Prüftemperaturen	Typ T, Empfindlichkeit	Nominelle Thermospannung	Standardtoleranz (± °C)	Sondertoleranz (± °C)
370,00 °C	60,928 µV/°C	19,030 mV	2,78	1,48
200,00 °C	53,150 µV/°C	9,288 mV	1,50	0,80
100,00 °C	46,785 µV/°C	4,279 mV	1,00	0,50

Messbereich: -200 °C bis 370 °C; Toleranzen: Standard: ±1,0 °C bzw. ±0,5 % v. Mw. (0 bis 370 °C), je nachdem, welcher Wert größer ist.  
Sonder: ±1,0 °C bzw. ±0,4 % v. Mw. (0 bis 370 °C), je nachdem, welcher Wert größer ist.

## Anhang B – Lineare algebraische Operationen bei der Charakterisierung von Thermoelementen

1. Die Fixpunkttemperaturen und die entsprechenden quadrierten Temperaturwerte werden in einer 5x2-Matrix notiert, die mit „A“ bezeichnet ist. Am Ende dieses Anhangs finden Sie Informationen mit Einzelheiten über die Matrizen und die darin enthaltenen Elemente, die in diesen Schritten beschrieben werden.
2. Eine kleinere 2x1-Matrix, die als Faktor rechts neben der Matrix „A“ aufgeführt ist, dient zur Angabe des Lösungsvektors. Diese Matrix ist mit „X“ bezeichnet.
3. Das Produkt aus den beiden obigen Matrizen „A“ und „X“ wird gleich einer endgültigen Matrix gesetzt, die durch die Unterschiede zwischen den bei dem zu kalibrierenden Thermoelement gemessenen Thermospannungen und den Thermospannungen der „Referenzfunktion“ bei den Fixpunkttemperaturen gebildet wird. Dies ist eine 5x1-Matrix mit der Bezeichnung „b“.
4. Dieses Gleichungssystem hat die folgende Form:  $[A] [X] = [b]$  <sup>(5)</sup>.
5. Unter Verwendung der transponierten und invertierten Einheitsmatrizen hat die Lösung nach der Methode der kleinsten Quadrate „x\*“ für die Gleichung in Schritt 4 die folgende Form:  $[x^*] = (([A^T] [A])^{-1}) [A^T] [b]$  <sup>(5)</sup>.  
Die Matrixgleichungen in den Schritten 4 und 5 wurden anhand der Informationen in der Literaturquelle (5), Seite 50 bis 54, angepasst.
6. Die Lösungsmatrix  $[x^*]$  ist eine 2x1-Matrix und enthält die zwei von null abweichenden Koeffizienten „dc<sub>1</sub>“ und „dc<sub>2</sub>“ für die quadratische (am besten passende) Kurve.
7. Die „Referenzfunktion“ für das Thermoelement, Typ S, kann wie folgt erweitert werden:  
Thermospannung<sub>ref</sub> = c<sub>0</sub> + (c<sub>1</sub>)·t<sub>90</sub> + (c<sub>2</sub>)·t<sub>90</sub><sup>2</sup> + (c<sub>3</sub>)·t<sub>90</sub><sup>3</sup> + ... + (c<sub>8</sub>)·t<sub>90</sub><sup>8</sup> (wobei die Thermospannung in µV DC und t<sub>90</sub> in °C angegeben ist).
8. Die „Abweichungsfunktion“ bzw. am besten passende quadratische Kurve ist Thermospannung<sub>dev</sub> = 0 + (dc<sub>1</sub>)·t<sub>90</sub> + (dc<sub>2</sub>)·t<sub>90</sub><sup>2</sup>.
9. Schließlich ist, wenn die „Abweichungsfunktion“ aus Schritt 8 algebraisch zur „Referenzfunktion“ für den Typ S aus Schritt 7 hinzugefügt wird, die entstehende Überlagerungsgleichung für ein bestimmtes, zu kalibrierendes Thermoelement des Typs S eindeutig.

$$\text{Thermospannung}_{char} = c_0 + (dc_1 + c_1) \cdot t_{90} + (dc_2 + c_2) \cdot t_{90}^2 + (c_3) \cdot t_{90}^3 + \dots + (c_8) \cdot t_{90}^8 \quad (6)$$

### Charakterisierungsmatrizen, Elemente und Lösung nach der Methode der kleinsten Quadrate [x\*] (Temperaturen in °C und Thermospannungen in mV DC)

System der Matrizen für die Gleichungen:  $[A] [X] = [b]$

$$\text{Matrizelemente: } [A] = \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(0)}^2 \\ t_{(Sn)} & t_{(Sn)}^2 \\ t_{(Zn)} & t_{(Zn)}^2 \\ t_{(Al)} & t_{(Al)}^2 \\ t_{(Ag)} & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \quad [X] = \begin{bmatrix} dc_1 \\ dc_2 \end{bmatrix} \quad [b] = \begin{bmatrix} mv_{meas(0)} - mv_{ref(0)} \\ mv_{meas(Sn)} - mv_{ref(Sn)} \\ mv_{meas(Zn)} - mv_{ref(Zn)} \\ mv_{meas(Al)} - mv_{ref(Al)} \\ mv_{meas(Ag)} - mv_{ref(Ag)} \end{bmatrix}$$

Matrizen der Lösung nach der Methode der kleinsten Quadrate:  $[x^*] = ([A^T] [A])^{-1} [A^T] [b]$  (wobei  $[x^*] \approx \begin{bmatrix} dc_1 \\ dc_2 \end{bmatrix}$  und  $[x^*]$  näherungsweise  $[X]$ )

$$\text{Matrizelemente: } [A^T] [A] = \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(Sn)} & t_{(Zn)} & t_{(Al)} & t_{(Ag)} \\ t_{(0)}^2 & t_{(Sn)}^2 & t_{(Zn)}^2 & t_{(Al)}^2 & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(0)}^2 \\ t_{(Sn)} & t_{(Sn)}^2 \\ t_{(Zn)} & t_{(Zn)}^2 \\ t_{(Al)} & t_{(Al)}^2 \\ t_{(Ag)} & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 \end{bmatrix}$$

$$([A^T] [A])^{-1} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\left[ \left( \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \right) \cdot \left( \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 \right) \right] - \left[ \left( \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \right) \cdot \left( \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \right) \right]} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 & -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \end{bmatrix}$$

Lösung nach der Methode der kleinsten Quadrate:[x\*]

$$[x^*] = \frac{1}{\left[ \left( \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \right) \cdot \left( \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \right) \right] - \left[ \left( \sum_{i=0}^{Ag} (t_i) \right) \cdot \left( \sum_{i=0}^{Ag} (t_i) \right) \right]} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^4 & -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 \\ -\sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^3 & \sum_{i=0}^{Ag} (t_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{(0)} & t_{(Sn)} & t_{(Zn)} & t_{(Al)} & t_{(Ag)} \\ t_{(0)}^2 & t_{(Sn)}^2 & t_{(Zn)}^2 & t_{(Al)}^2 & t_{(Ag)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} mv_{meas(0)} - mv_{ref(0)} \\ mv_{meas(Sn)} - mv_{ref(Sn)} \\ mv_{meas(Zn)} - mv_{ref(Zn)} \\ mv_{meas(Al)} - mv_{ref(Al)} \\ mv_{meas(Ag)} - mv_{ref(Ag)} \end{bmatrix}$$

**Literaturquellen**

- 1) NIST-Sonderveröffentlichung 250-35, "The Calibration of Thermocouples and Thermocouple Materials" (Kalibrierung von Thermoelementen und Thermoelementwerkstoffen), G. W. Burns und M. G. Scroger, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1989.
- 2) NIST-Monograph 175, "Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90" (Temperatur-Thermospannungs-Referenzfunktionen und Tabellen zur Bezeichnung von Thermoelementen mit Buchstaben auf der Grundlage der ITS-90), G. W. Burns et al, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1993.
- 3) ASTM E230-03, "Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples" (Standardspezifikation und Thermospannungstabellen für standardisierte Thermoelemente), ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 2003.
- 4) Omega Engineering Technical Reference, Section Z. (Omega Engineering, Technische Referenz, Kapitel Z) <http://www.omega.com/temperature/Z/zsection.asp> (used for TC color codes)
- 5) Geometric Transformations and Image Warping (Geometrische Transformationen und Image Warping), University of Utah, SCI (School of Computer Imaging) Institute, School of Computing, eine MS-PowerPoint-Präsentation von Ross Whitaker, mit Änderungen von Guido Gerig, Class CS6640, Fall, 2012, Seite 50 bis 54.
- 6) Thermocouple Report of Calibration for Type S, latest version (Bericht zur Kalibrierung von Thermoelementen des Typs S, neueste Version), Fluke Calibration, American Fork, UT, p. 2 of 14.

**Fluke Calibration.** Precision, performance, confidence.™

Elektrisch	HF	▼	Temperatur	Druck	Fluss	Software
------------	----	---	------------	-------	-------	----------

**Fluke Calibration**  
 PO Box 9090,  
 Everett, WA 98206, USA

**Fluke Europe B.V.**  
 PO Box 1186, 5602 BD  
 Eindhoven, Niederlande

**Weitere Informationen erhalten Sie telefonisch unter den folgenden Nummern:**  
 U.S.A. (877) 355-3225 oder Fax (425) 446-5116  
 Europa/Naher Osten/Afrika: +31 (0) 40 2675 200 oder Fax +31 (0) 40 2675 222  
 Kanada (800)-36-FLUKE oder Fax (905) 890-6866  
 Andere Länder +1 (425) 446-5500 oder Fax +1 (425) 446-5116  
 Internetadresse: <http://www.flukecal.de>

©2015 Fluke Calibration.  
 Änderungen der technischen Daten vorbehalten.  
 Gedruckt in den USA 6/2015 6004550B\_DE  
 Pub-ID 13350-ger Rev 01

**Änderungen an diesem Dokument sind nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung von Fluke Calibration zulässig.**