

Aufklebbare Widerstands-Temperatursensoren und ihre Messschaltungen

1.0 Einführung

Vishay Micro-Measurements stellt eine Palette von Widerstands-Temperatursensoren her, die in ihrem Aufbau DMS für einen breiten Temperatureinsatzbereich gleichen, deren Messgitter jedoch aus hochreinem Nickel bestehen. Diese Temperatursensoren werden auf die Bauteile aufgeklebt, wobei die gleichen Klebetechniken wie bei DMS eingesetzt werden. Mit den Sensoren können Oberflächentemperaturen in einem Bereich von -195° bis $+260^{\circ}\text{C}$ gemessen werden.

In der vorliegenden TechNote werden die Einsatzcharakteristika der Nickel-Temperatursensoren und verschiedene Methoden der Datenerfassung diskutiert. Die Standard-Sensorenpalette und zugehörige Anpassungsnetzwerke werden im DMS Data Book aufgelistet.

Der Widerstand von hochreinem Nickel erhöht sich mit steigender Temperatur rasch und folgt einer reproduzierbaren und stabilen Funktionskurve bis über $+260^{\circ}\text{C}$. Abb. 1 zeigt, dass wirklich große Widerstandsänderungen entstehen, die große Messsignale ergeben. Abb. 1 enthält auch eine Funktionskurve für Balco[®]-Legierung*. Diese wird in **Abschnitt 6** der TechNote diskutiert. Der Referenz-Widerstandswert der Sensoren von 50Ω stellt sich bei einer Temperatur von $+23,9^{\circ}\text{C}$ ein. Diese Temperatur entspricht 75°F , dem Wert der legalen Raumtemperatur in USA. Standardmäßig haben alle von Vishay Micro-Measurements gefertigten Widerstands-Temperatursensoren diesen Referenzwert, jedoch können auf Anfrage andere Widerstandswerte geliefert werden. Die Charakteristika der Widerstands-/Temperatur-Funktion für nicht standardmäßige Referenzwiderstände können direkt in Prozent des Nominalwerts bei $23,9^{\circ}\text{C}$ ausgedrückt werden, indem man die Ordinatenwerte aus dem Diagramm in Abb. 1 mit dem Faktor 2,0 multipliziert.

Am Ende der TechNote sind Tabellen eingefügt, denen die Widerstandswerte von TG-Sensoren für verschiedene Temperaturen mit größerer Genauigkeit entnommen werden können, als dieses aus Abb. 1 möglich wäre. Die Werte dieser Tabellen beziehen sich ebenso auf den Referenzwert von 50Ω bei $23,9^{\circ}\text{C}$, und es können durch Multiplikation mit dem Faktor 2,0 die Widerstandswerte von nicht standardmäßigen Sensoren in Prozent ihres $23,9^{\circ}\text{C}$ -Wertes erhalten werden.

* Balco ist ein eingetragenes Warenzeichen der W.B. Driver Co.

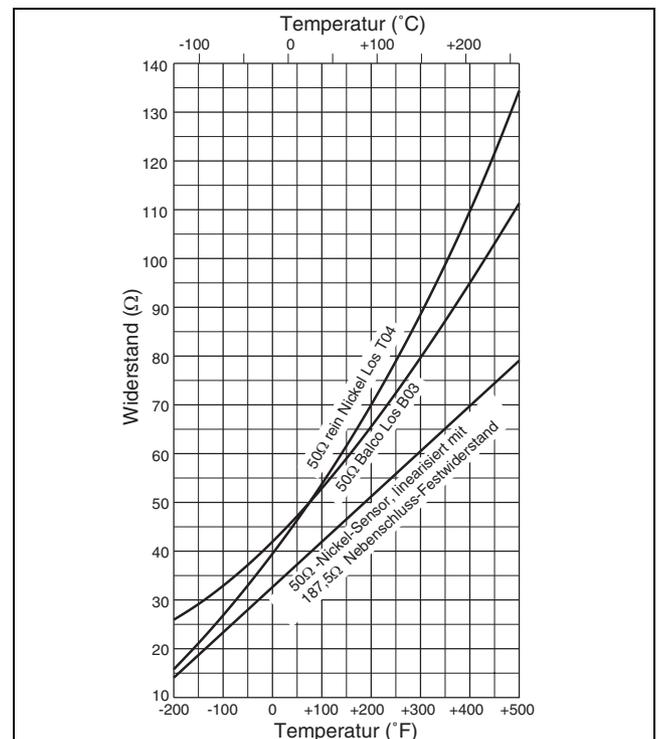


Abb. 1: Widerstandsänderungen als Funktion der Temperatur bei 50Ω -Sensoren, installiert auf 1018-Stahl

2.0 Installation der Sensoren

Zur Installation von TG-Temperatursensoren werden die gleichen Techniken benutzt, die für DMS in einem breiten Temperatureinsatzbereich eingesetzt werden. Gewöhnlich werden die Kleber M-Bond 600 oder M-Bond 610 herangezogen, da diese den gesamten Temperaturbereich der Sensoren abdecken. Die erforderliche Oberflächenvorbereitung ist im Instruktions-Bulletin B-129 beschrieben, und Instruktionen für die spezifischen Installationsprozeduren sind den gewählten Klebern beigegeben.

Die Messkabelfrage wird normalerweise in der gleichen Weise wie bei DMS-Messungen behandelt, jedoch mit einem wichtigen Unterschied. Die 3-Leiter-Verdrahtung, die bei DMS-Viertelbrückenschaltungen zur Eliminierung von Temperatureinflüssen auf die Messkabel angewandt wird, ist bei TG-Sensoren nicht generell wirksam. Diese Problematik wird in den **Abschnitten 3 und 5** weitergehend behandelt.

TECH NOTE

Aufklebbare Widerstands-Temperatursensoren und ihre Messschaltungen

3.0 Messmethoden

Eine Methode für die Temperaturmessung mit TG-Temperatursensoren besteht darin, den Sensor an eine Wheatstone'sche Brückenschaltung anzuschließen und die Widerstandsmesswerte mit Hilfe der in dieser TechNote gegebenen Tabellen in die entsprechenden Temperaturwerte zu konvertieren. Allerdings können die Messkabel in der Wheatstone-Brücke zwei verschiedene Fehler hervorrufen. Erstens wird der Messkabelwiderstand einen Initial-Offset hervorrufen und den Brückenweig, der den Sensor enthält, desensibilisieren. Der zweite Fehler entsteht durch Widerstandsänderungen der Messkabel, die sich aus Temperatureinwirkungen ergeben. Abgesehen von außergewöhnlichen Bedingungen werden diese Fehler in der Regel sehr klein sein. Liegen sehr lange Messleitungen vor, können spezielle Kalibriertechniken oder Kompensationsysteme eingesetzt werden.^{1,2*}

Eine Abwandlung der oben beschriebenen Methode bietet mittels eines 3-Leiter-Systems eine genaue Kompensation der Messleiterwiderstände. Die Schaltung wird in Abb. 2 gezeigt, wobei anstelle eines Widerstands in der Wheatstone-Brücke eine Präzisions-Widerstandsdekade eingeschaltet wird.

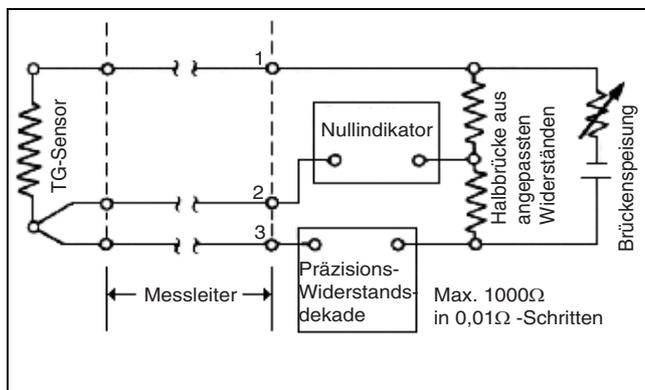


Abb. 2: 3-Leiter-Nullabgleichschaltung für TG-Sensoren

Die Einstellungen der Widerstandsdekade werden so geändert, dass das Ausgangssignal am Nullindikator Null bleibt, womit der Ablesewert der Dekade dem Widerstand des Sensors entspricht. Sind Länge und Durchmesser der Leiter 1 und 3 sowie ihr Material identisch, werden Temperatureinflüsse, die für alle Leiter gleich sind, keine Messfehler hervorrufen. Damit ist in diesem Fall die 3-Leiter-Kompensationstechnik wirksam, da es sich um ein wirkliches Nullabgleichsystem handelt, in dem der dem Sensor benachbarte Brückenweig (die Widerstandsdekade) zum Zeitpunkt der Messung immer auf den Widerstand des Sensors gesetzt ist.

* Hochgestellte Hinweiszahlen beziehen sich auf Referenzen im Anhang der TechNote.

Die Brückenspeisung kann Wechselspannung oder Gleichspannung sein, abhängig allein vom gewählten Nullindikator. Zu hohe Speisespannung kann Fehler aufgrund einer Selbsterwärmung des Sensors hervorrufen, wobei dieser Fehler jedoch leicht vermieden oder korrigiert werden kann, wie in **Abschnitt 5.5** dargestellt wird.

Abb. 3 zeigt ein anspruchsvolleres Messsystem, welches die Notwendigkeit eines manuellen Abgleichs erübrigt. Diese Anordnung eliminiert Messleitungsfehler, indem ein 4-Leitersystem eingeführt wird.

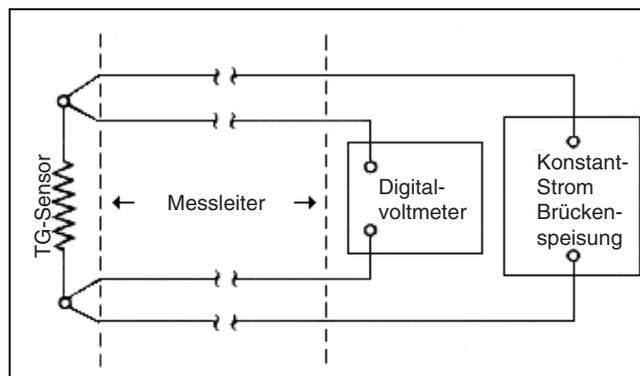


Abb. 3: 4-Leiterschaltung für TG-Sensoren

Besitzt das Digitalvoltmeter eine hinreichend hohe Eingangsimpedanz, werden die Messwerte immer eine bekannte Funktion des Sensorwiderstands sein, unabhängig von irgendwelchen Widerstandsänderungen in den Messkabeln. Ein Strompegel von 1mA erlaubt dem Voltmeter den Sensorwiderstand in mV anzuzeigen (für 50Ω ergibt sich also eine Anzeige von 50mV).

3.1 Linearisierung des Sensorsignals

Die Messanordnungen aus den Abb. 2 und 3 sind insofern etwas unhandlich, als sie den Sensorwiderstand direkt anzeigen. Wegen der Unlinearität der Widerstands/Temperatur-Funktionen werden damit Tabellen erforderlich, um den jeweiligen Widerstandswert dem äquivalenten Temperaturwert zuzuordnen zu können. Es gibt jedoch eine sehr einfache Methode, die es gestattet, das Ausgangssignal des nichtlinearen Sensors mit guter praktischer Genauigkeit zu linearisieren. Das geschieht derart, dass zum Sensor ein Festwiderstand parallel geschaltet wird, dessen Wert 3,75-mal seinem Widerstandswert bei 23,9°C entspricht, also $50\Omega \times 3,75 = 187,50\Omega$. Die entstehende Temperatur/Widerstands-Funktion hat eine niedrigere Steigung, ist aber, wie in Abb. 1 gezeigt, gut linear. Abb. 4 zeigt das Linearitätsverhalten einer solchen Schaltung mit höherer Auflösung, um die Linearitätsabweichung besser beurteilen zu können, als das aus Abb. 1 möglich ist.

Ein nützliches Ergebnis der Nebenschluss-Linearisierung ist eine asymmetrische Brückenschaltung, die eine der zu messenden Temperatur in linearer Weise folgende Ausgangsspannung ergibt. Mit dieser Schaltung kann auf einem

Aufklebbare Widerstands-Temperatursensoren und ihre Messschaltungen

Digitalvoltmeter die Temperatur direkt in mV abgelesen werden oder das Instrument treibt einen X/Y-Schreiber, um die Temperatur als Funktion einer anderen Variablen direkt aufzuzeichnen.

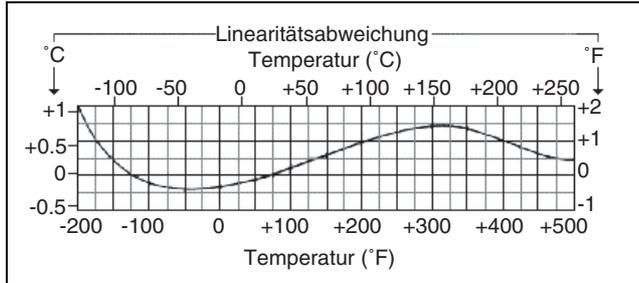


Abb. 4: Linearitätsverhalten aus Abb. 1 eines TG-Sensors mit Nebenschluss-Widerstand

Eine vereinfachte Version dieser Schaltung wird in Abb. 5 dargestellt. Diese Linearisierungsschaltung erfordert eine Konstant-Spannung-Brückenspeisung, die in einfacher Weise mit einer Batterie bewerkstelligt werden kann. Der Übertragungsfaktor bei dieser Schaltung ist 0,9mV/V/K. Dieser kann mit einem Spannungsteiler hohen Widerstands am Ausgang herunterskaliert werden. Dazu kommt ein Abgleichpotenziometer, um die Toleranz des Sensorwiderstands und den Offset durch den Messleitungswiderstand abzugleichen. Wird in der Celsiuskala gemessen, ist es möglicherweise sinnvoller bei 24°C (als bei 23,9°C) abzugleichen, womit dann auch die Messwerte in vollen Zahlen abgelesen werden. Eine Kalibrierung kann erfolgen, indem man den Sensor durch eine Widerstandsdekade ersetzt und auf dieser aus den Tabellen entnommene Widerstände entsprechend der Temperaturwerte einstellt.

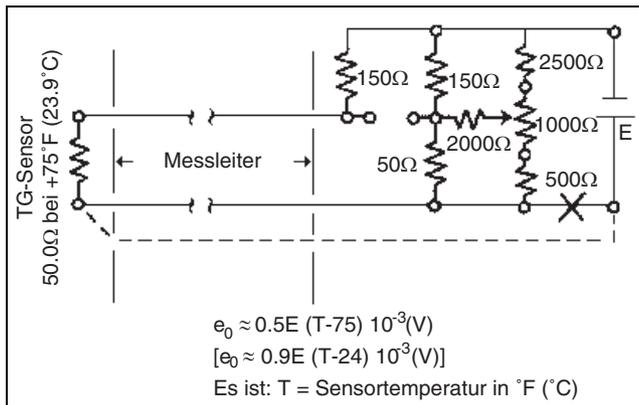


Abb. 5: Linearisierungsschaltung

Wegen der Brückenasymmetrie kann ein 3-Leiter-Verdrahtungssystem mit der Schaltung in Abb. 5 nicht effektiv eingesetzt werden, um Fehler aus der Temperatureinwirkung auf die Messkabel zu eliminieren. Für den begrenzten Zweck der Kompensation des Offset-Fehlers, der vom Leitungswiderstand herrührt, ist es allerdings möglich die

3-Leiterschaltung zu nutzen. Dazu wird der dritte Leiter eingeführt und die Schaltung an der mit X markierten Stelle unterbrochen.

4.0 LST-Anpassungsnetzwerke

Kommerziell verfügbare Einkanal- oder Mehrkanal-Dehnungsmessbrücken sind exzellente Messgeräte für TG-Temperatursensoren und stellen sich als besonders bequem heraus, wenn Dehnung und Temperatur gleichzeitig gemessen und aufgezeichnet werden müssen. Dabei ist als Schnittstelle zwischen Sensor und Messgerät ein Signalanpassungsnetzwerk erforderlich, das LST-Anpassungsnetzwerk genannt wird. Es dient der Anpassung des Messsignals, wie es vom Sensor kommt, an die Eingangsbedingungen des Messgeräts, der Dehnungsmessbrücke. Abb. 6 zeigt den Aufbau des Anpassungsnetzwerks.

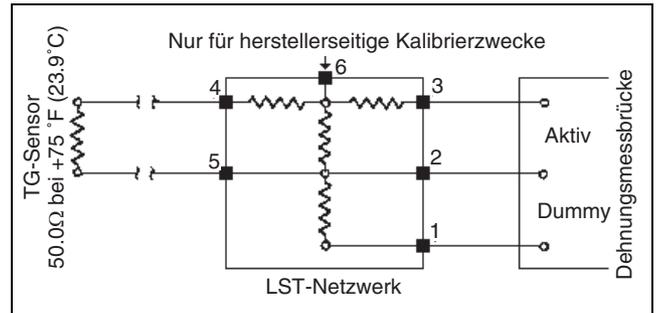


Abb. 6: Schaltung des LST-Netzwerks

Das LST-Netzwerk ist ein kleiner, komplett gekapselter Baustein, bestehend aus vier speziellen Präzisionswiderständen. Bei Anwendung mit einem standardmäßigen 50Ω-Nickel-Temperatursensor erfüllt es die folgenden drei Funktionen:

1. Es stellt am Netzwerkausgang ein lineares Signal der Sensorwiderstandsänderung zur Verfügung.
2. Es stellt die Steilheit der Widerstandsänderungsfunktion derart ein, dass bei einer K-Faktoreinstellung von 2,00 an der Dehnungsmessbrücke ein Äquivalent von 10 oder 100µm/m pro Grad vorliegt. Wird in einem großen Temperaturbereich gemessen, ist es gewöhnlich am praktischsten ein Netzwerk mit der Anpassung 10µm/m/K zu benutzen. Ist bei einem kleineren Temperaturbereich eine höhere Auflösung des Messwerts erwünscht, wird man ein Netzwerk mit der Anpassung 100µm/m/K einsetzen.
3. Das Netzwerk stellt für den Anschluss an die Dehnungsmessbrücke eine komplette 350Ω-Halbbrückenschaltung zur Verfügung.

Aufklebbare Widerstands-Temperatursensoren und ihre Messschaltungen

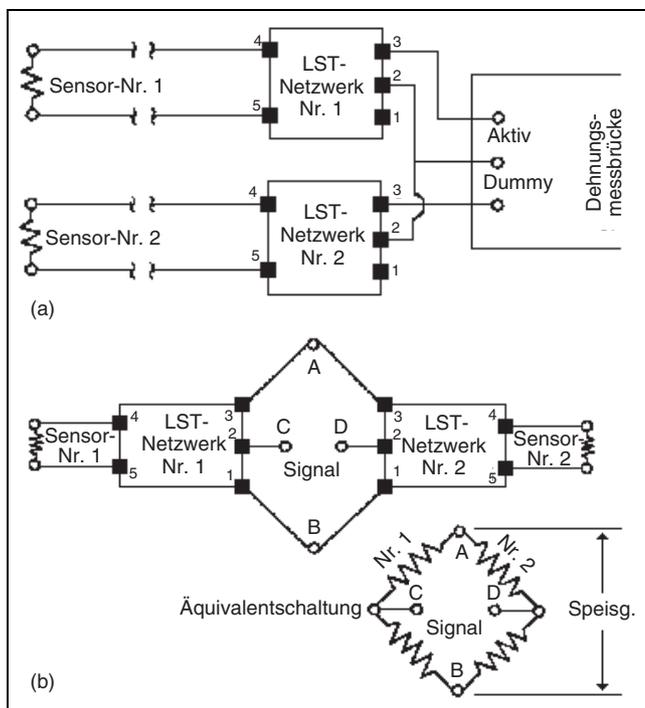


Abb. 7: Differenz-Temperaturmessung mit zwei TG-Sensoren und zwei LST-Netzwerken
a) Halbbrückenschaltung und b) Vollbrückenschaltung

Differenz-Temperaturmessungen können mit einer Kombination aus zwei TG-Sensoren und zwei LST-Netzwerken durchgeführt werden. Die Anordnung in Abb. 7a ergibt für die Dehnungsmessbrücke eine Halbbrücken-Eingangsschaltung, bei welcher der AKTIVE Brückenweig dem Sensor 1 zugeordnet ist und dem DUMMY-Brückenweig der Sensor 2. Alternativ dazu können die Netzwerke noch so angeordnet werden, dass sie eine Vollbrücke ergeben, wie in Abb. 7b gezeigt wird. Das wäre für Messgeräte erforderlich, die nur einen Vollbrückeneingang aufweisen.

Die Kalibrierung und der Abgleich von Eingangsschaltungen, die LST-Netzwerke enthalten, können auf verschiedene Weise durchgeführt werden. Der Initialabgleich geschieht meistens derart, dass die Anzeige der Dehnungsmessbrücke mit der ABGLEICH-Funktion (BALANCE) so eingestellt wird, dass die Anzeige mit Initialtemperatur am Sensor korrespondiert. Sind die Kontrolle oder die Messung der Initialtemperatur am Sensor nicht möglich, kann der Sensor vorübergehend durch einen präzisen 50Ω-Widerstand ersetzt werden. Dann wird mit der ABGLEICH-Funktion das Instrument so eingestellt, dass eine Anzeige entsteht, die 23,9°C entspricht. Dann wird der Sensor wieder in die Schaltung eingefügt. Die erstere Methode hat den Vorteil, dass Fehler aufgrund der Sensor-Widerstandstoleranz korrigiert werden.

Um die Linearität und die Bereichsgenauigkeit der Instru-

mentation zu verifizieren, kann an den Ausgangskontakten des LST-Netzwerks eine Widerstands-Nebenschlusskalibrierung eingeführt werden. Das ist auch von Vorteil, wenn bei instrumentenfernen Netzwerken die K-FAKTOR-Einstellung am Instrument vorgenommen oder der Fehler der Desensibilisierung durch Messkabelwiderstände korrigiert wird. Für den letzteren Fall ist zu beachten, dass die Nebenschlusswiderstände am LST-Netzwerk geschaltet werden müssen und nicht auf der Instrumentenseite der Leitungen.

Wegen der beträchtlichen Widerstandsänderung mit der Temperatur im mit AKTIV bezeichneten Brückenweig kann eine Kalibrierung mit dem Kalibrierwiderstand an den Kontakten 2 und 3 des Netzwerks nur dann korrekt sein, wenn die Sensortemperatur nahe bei 24°C liegt. Es ist also vorzuziehen, den Kalibrierwiderstand parallel zum mit DUMMY bezeichneten Brückenweig zu schalten (Netzwerkkontakte 1 und 2). Wird eine Nebenschlusskalibrierung parallel zu beiden Brückenweigen gewünscht, um so positive und negative Temperaturänderungen zu simulieren und eine Temperaturstabilisierung bei 24°C schwierig ist, kann der Sensor für die Kalibrierung durch einen präzisen 50Ω-Widerstand ersetzt werden.

Wird die Nebenschlusskalibrierung mit der in Abb. 7a gezeigten Differenz-Temperatur-Messschaltung angewandt, wird es notwendig sein, die Kalibrierung im Nebenschluss zum mit AKTIV bezeichneten Brückenweig vorzunehmen (Netzwerkkontakte 2 und 3). Nebenschluss zu Netzwerk 1 wird eine Temperatursenkung in Sensor 1 simulieren, und Nebenschluss zu Netzwerk 2 eine Temperaturerhöhung in Sensor 2. Unter diesen Umständen muss die nominelle oder Gleichaktttemperatur in beiden Sensoren nahe 24°C liegen, wenn im Nebenschluss zu beiden Netzwerken kalibriert werden soll. Lässt sich dieser Temperaturzustand nur schwer realisieren, müssen beide Sensoren vorübergehend durch präzise 50Ω-Widerstände ersetzt werden. Wenn mit der in Abb. 7b dargestellten Vollbrückenschaltung gearbeitet wird, kann die Kalibrierung unabhängig von der Temperatur als Nebenschluss zu einem der beiden DUMMY-Brückenweige bewerkstelligt werden (Netzwerkkontakte 1 und 2).

Um die beste Genauigkeit zu erzielen, ist es immer ratsam solche Nebenschlusswiderstände auszuwählen, die nahe des Temperaturbereichs des größten Interesses liegen. Stimmen die am Instrument angezeigten Werte nicht mit der simulierten Temperatur überein, kann der Fehler mit Hilfe der K-FAKTOR-Einstellung beseitigt werden.

Für spezielle Temperaturbereiche oder Funktionscharakteristika des Ausgangssignals (Funktionssteigung) und für Impedanzanpassung können spezielle LST-Netzwerke hergestellt werden. Solche Spezialanforderungen müssen mit der nächsten Beratungsstelle der Vishay Micro-Measurements diskutiert werden.

Aufklebbare Widerstands-Temperatursensoren und ihre Messschaltungen

5.0 Fehlerquellen

5.1 Linearitätsabweichungen

Bei der Linearisierung des Ausgangssignals von TG-Sensoren bleiben charakteristischerweise kleine Abweichungen von einer wirklichen Linearität bestehen. Um eine optimale Korrektur der Nichtlinearität sicher zu stellen, kann folgende Auswahl getroffen werden:

TEMPERATURBEREICH	EMPFOHLENER NETZWERKTYP
-200 bis +500°F	LST-10F/100F-350D
-320 bis +100°F	LST-10F/100F-350C
-150 bis +260°C	LST-10C/100C-350D
-200 bis +25°C	LST-10C/100C-350C

Die Linearitätsabweichungen für diese Netzwerke sind in Abb. 8 dargestellt.

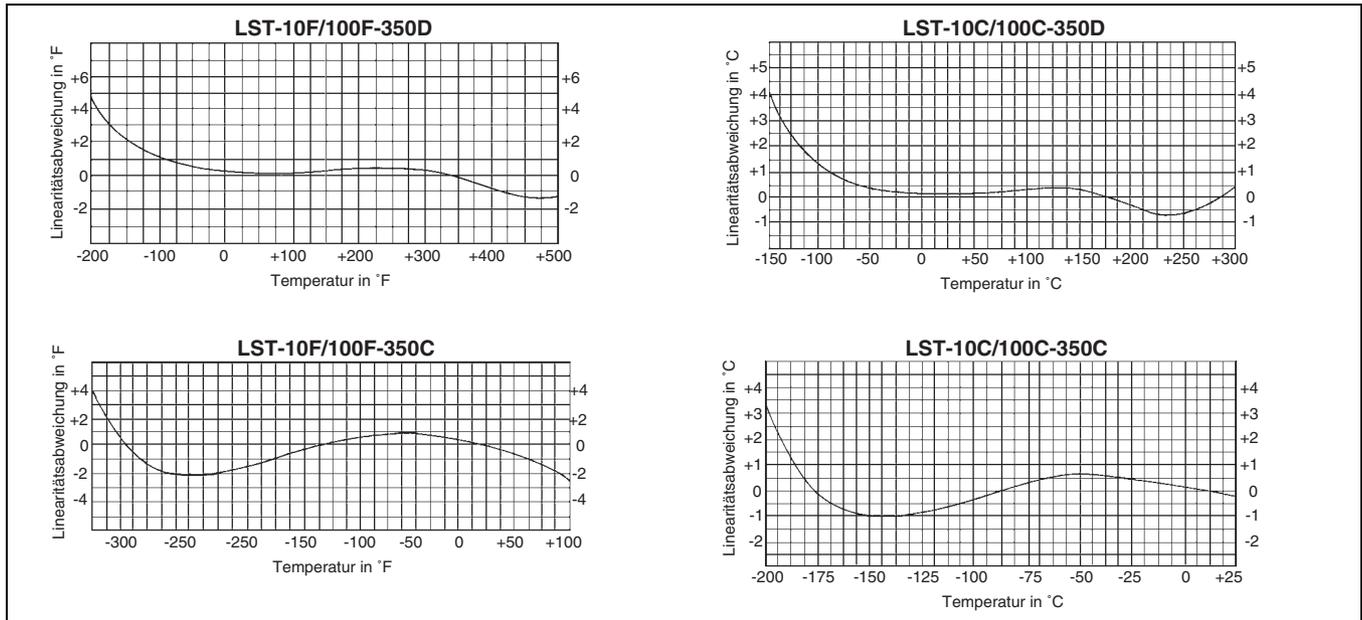


Abb. 8: Typische Linearitätsabweichung von TG-Sensoren und LST-Netzwerken

Der thermische Ausdehnungskoeffizient des Bauteilmaterials auf das der Sensor installiert ist, wird das Linearitätsverhalten beeinflussen. Abb. 9 zeigt die Linearitätsabweichung eines TG-Sensors mit dem Netzwerktyp LST-10F-350D, installiert auf 1018-Stahl und 2024-Aluminium. Um beste Genauigkeit zu erreichen, ist es unerlässlich, das Sensor/LST-System auf dem vorliegenden Bauteilmaterial zu kalibrieren. Bei den meisten Anwendungsfällen sind jedoch die Funktionswerte aus Abb. 8 zufriedenstellend.

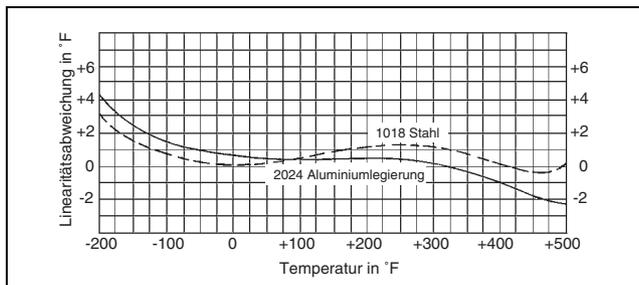


Abb. 9: Typische Linearitätsabweichung von TG-Sensoren installiert auf 1018 Stahl und 2024 Aluminiumlegierung

5.2 Messkabeleffekte und verwandte Fehler

Messkabel sind in allen Schaltungen mit TG-Sensoren eine Fehlerquelle, außer in solchen, wie sie in den Abb. 2 und 3 gezeigt sind. Um diese Fehler zu minimieren, sollten die Kabel zwischen dem Sensor und dem Messinstrument (oder dem LST-Netzwerk) einen möglichst geringen Widerstand zeigen und nicht länger als unbedingt nötig sein. Ein gesamter 2-Leiterwiderstand von $0,5\Omega$ wird bei Raumtemperatur ein Offset-Signal (Signalverschiebung) von +2K hervorrufen. Der genannte Kabelwiderstand entspricht der Kabellänge von 7,5m eines AWG20-2-Leiter-Kupferkabels (0,8mm Leiterdurchmesser) oder 30m eines 2-Leiter-Kupferkabels (AWG14 - 1,6mm Leiterdurchmesser).

Änderungen der Messkabeltemperatur sind normalerweise nur eine kleinere Fehlerquelle. Eine Temperaturänderung von ca. 30K über die ganze Länge eines $0,5\Omega$ -Kupferkabels wird ein Offset-Signal von lediglich etwa 0,2K bewirken, wenn die Sensortemperatur nahe 24°C liegt. Der Fehler wird mit höheren Sensortemperaturen kleiner und mit niedrigeren Temperaturen größer. Genaue Messungen in kryogenen Temperaturbereichen mögen eine Anwendung der Schaltungen Abb. 2 oder 3 erfordern, wenn längere Messleitungen mit niedrigem Durchmesser vorliegen.

Aufklebbare Widerstands-Temperatursensoren und ihre Messschaltungen

Initiale "Nullpunkt"-Fehler, also Offset-Signale die den Toleranzen der LST-Netzwerke und der TG-Sensoren selbst zuzuordnen sind, können eliminiert werden, indem die Sensorinstallation bei einer beliebigen bekannten Temperatur nahe 24°C stabilisiert und dann mit der ABGLEICH-Funktion des Instruments eine Anzeige eingestellt wird, die mit der bekannten Temperatur korrespondiert. Diese Vorgehensweise eliminiert auch Offset-Fehler aufgrund des Initialwiderstands der Messkabel.

Unter bestimmten Umständen ist es möglich, dass sich das Messinstrument in großer Distanz von der Sensorinstallation befindet. Ist das der Fall, sollte sich das Netzwerk vorzugsweise nahe am Sensor befinden und von dort über eine 3-Leiterschaltung mit dem Instrument verbunden werden (das sollte so nicht geschehen, wenn die zu messende Temperatur den Anwendungsbereich des Netzwerks übersteigt). Jedenfalls werden so Fehler erster Ordnung, die sich aufgrund von Messkabelwiderständen und Temperatureinflüssen auf das Messkabel ergeben, eliminiert. System-Desensibilisierung und eine Änderung der Funktionssteigung werden entscheidend reduziert und können durch eine richtige Einstellung des K-FAKTORS am Instrument ganz eliminiert werden. Die korrekte Einstellung kann auf der Basis eines bekannten Messkabelwiderstands berechnet oder mittels Nebenschlusskalibrierung am Netzwerk bestimmt werden.

5.3 Fehler aus der Dehnungsempfindlichkeit

Die Dehnungsempfindlichkeit von reinem Nickel kann Messfehler hervorrufen, wenn TG-Sensoren in Bauteilbereiche installiert sind, die hohe Dehnungen aufweisen. Wie in Abb. 10 dargestellt wird, sind die Fehlergrößen allerdings gering.

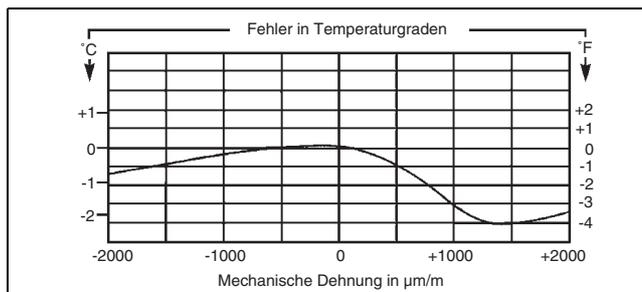


Abb. 10: Typisches Fehlersignal aufgrund von Dehnungseinwirkung auf den TG-Sensor.

Die Daten gelten für eine Sensortemperatur nahe 24°C.

Die Kurvenform in Abb. 10 ist bedingt von der nichtlinearen Reaktion von reinem Nickel. Der Koeffizient der Dehnungsempfindlichkeit nimmt in der Mitte des elastischen Bereichs von Nickel einen hohen negativen Wert an und tendiert in Richtung eines viel kleineren positiven Werts auf beiden Seiten des Bereichs. Man kann beobachten, dass Druckdehnungen kleinere Fehlersignale hervorrufen, woraus folgt, dass die Sensoren wenn möglich in solche Berei-

che von Dehnungsfeldern installiert werden sollten. Das Symmetriezentrum der Kurve liegt bei ca. +750µm/m, weil der Sensor den Herstellungsprozess mit einer inhärenten Druckdehnung in der Größe dieses Werts verlässt.

Es ist wichtig zu wissen, dass das Symmetriezentrum der Kurve verschoben werden kann durch Installation des Sensors auf Werkstoffe mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und/oder durch unterschiedliche Aushärtetemperaturen der Kleber. Aus diesem Grund ergibt sich eine leicht unterschiedliche Reaktion wenn der Sensor auf Aluminium installiert ist im Vergleich zu einer Installation auf Stahl. Die Tabellen auf den Seiten 9 bis 12 demonstrieren diesen Effekt.

Es ist festzustellen, dass die Reproduzierbarkeit der Messwerte von richtig installierten TG-Sensoren besser als ±0,05% des angewandten Temperaturbereichs sein kann. Um aus dieser guten Reproduzierbarkeit und aus anderen, den Sensoren innewohnenden guten Eigenschaften den vollen Nutzen zu ziehen, ist es immer ratsam, eine Kalibrierung durchzuführen, wenn ein Sensor auf ein bestimmtes Material installiert ist und höchstmögliche Messgenauigkeit erzielt werden soll.

5.4 Stabilität

Ebenso wie andere organische Materialsysteme, ist das Trägermaterial der TG-Sensoren einem langsamen Sublimationsprozess unterworfen und verliert mit der Alterung unter höheren Temperaturen Festigkeit. Sind die Sensoren fachgerecht installiert, kann bei Temperaturen unter +120°C mit praktisch unbegrenzter Lebensdauer gerechnet werden; bei Temperaturen bis +200°C liegt die Lebensdauer bei ca. 10 000 Stunden. Bei bis zu +260°C kann mit 1000 Stunden gerechnet werden, wenn der Sensor normaler Luft ausgesetzt ist; unter Schutzgas wird sich diese Lebensdauer beträchtlich erhöhen.

Die Messgitter selbst zeigen unter den oben beschriebenen Alterungsbedingungen eine gute Stabilität. Bei Temperaturen über +260°C wird eine kleine Verschiebung des spezifischen Widerstands und des Widerstands-Temperaturkoeffizienten eintreten. Wird ein WTG-Sensor z. B. für eine Stunde einer Temperatur von +315°C ausgesetzt, wird der Widerstand bei 23,9°C sich von 50Ω auf ca. 50,6Ω verschieben. Auf einer normalisierten Grundlage ergibt sich dann für den Temperaturbereich von 23,9°C bis +232°C ein Widerstandsanstieg von 140% anstatt der vorhergehenden 143%. Messungen bei unter +290°C werden dann aber stabil und reproduzierbar sein.

5.5 Selbsterwärmung

Um aus passiven Sensoren, wie es die TG-Sensoren sind, ein Ausgangssignal zu erhalten, muss an sie eine Speisepannung angelegt werden, was aufgrund des Stromflusses zu einer Selbsterwärmung des Sensors führen kann. Daraus ergibt sich eine Temperaturerhöhung der Oberfläche, auf die der Sensor installiert ist und somit ein Fehlersignal. Da

Aufklebbare Widerstands-Temperatursensoren und ihre Messschaltungen

TG-Sensoren einen hohen Temperaturkoeffizienten des Widerstands besitzen, ist jedoch zum Erreichen hoher Ausgangssignale eine hohe Speisespannung nicht erforderlich, womit Selbsterwärmungsfehler leicht im Bereich vernachlässigbarer Größen gehalten werden können. Wenn aber hohe Speisespannungen für hohe Ausgangssignale erforderlich sind, sollte ein Sensor mit möglichst großem Messgitter gewählt werden. Die Wärmeleitfähigkeit und die thermische Masse des Bauteils, auf das der Sensor installiert ist, wird dann die mögliche Größe der Speisespannung bestimmen, mit welcher der Sensor bezüglich der Selbsterwärmung beaufschlagt werden kann.

Gewöhnlich ist es sehr einfach, den Selbsterwärmungsfehler direkt mit TG-Sensoren zu messen. Schließlich kann die Speisespannung unter Bedingungen konstanter Umgebungstemperatur variiert und ein auftretender Selbsterwärmungseffekt direkt in Temperaturgraden am Instrument abgelesen werden. Bei einer Sensoranwendung auf Metallen, wird eine Speisespannung von 0,25V oder weniger üblicherweise eine Selbsterwärmung von Bruchteilen eines Grads hervorrufen. Allerdings muss der Selbsterwärmung größere Aufmerksamkeit gewidmet werden, wenn die Sensoren auf Werkstoffe mit niedriger Wärmeleitfähigkeit installiert sind, wie z. B. Plastik- oder Glasmaterialien.

Der mit der Anwendung von LST-Netzwerken einhergehende Abschwächungsfaktor reduziert die vom Instrument kommende Speisespannung, und Selbsterwärmungsproblemen wird bei Messungen mit LST-Netzwerken nur selten begegnet.

6.0 Spezialsensoren

Zusätzlich zur Produktlinie der im DMS Data Book beschriebenen Standard-TG-Sensoren, kann Vishay Micro-Measurements Sensoren in so gut wie allen möglichen Bauformen und in einem sehr breiten Widerstandsreich liefern. Die Werkzeugkosten sind minimal, wenn die gewünschte Sensorgeometrie Baumustern nahe kommt, wie sie für DMS der Serie EA vorliegen, wobei allerdings der Bereich für den Widerstandswert etwas eingengt sein kann.

Für die Messgitter kann auch Balco® herangezogen werden, eine Ni/Fe-Legierung mit hohem Widerstands-Temperaturkoeffizienten und einem spezifischen Widerstand, der 2,4-mal dem von reinem Nickel entspricht. Diese Legierung wird häufig für die Temperaturkompensation von Aufnehmer-DMS-Schaltungen herangezogen.

Zwei Festwiderstände aus Balco werden in die Speiseleitungen der Aufnehmer-Brückenschaltung eingebracht, um eine automatische Kompensation des kombinierten Effekts der E-Modul-Abhängigkeit (des Aufnehmer-Federkörpers) und der K-Faktor-Abhängigkeit (der DMS) von der Temperatur zu bewirken. Dafür steht eine Serie von aufklebbaren, abgleichbaren Widerständen zur Verfügung, die es gestatten den Widerstand genau auf den benötigten Wert hinzu-

trimmen. Beide Widerstandstypen sind auch mit Messgittern aus reinem Nickel lieferbar.

Wenn Balco auch einen etwas niedrigeren Widerstands-Temperaturkoeffizienten aufweist als reines Nickel, ergibt sich doch aus den niedrigeren Kosten und dem höheren spezifischen Widerstand eine bessere Wirtschaftlichkeit. Abb. 1 zeigt die Widerstands/Temperaturabhängigkeit von Balco im Vergleich zu reinem Nickel.

7.0 Kalibrierung

Die Produktionslose der Nickelfolie werden mit speziellen Versuchseinrichtungen kalibriert, welche aus einem sorgfältig gesteuerten Bad konstanter Temperatur bestehen und aus einem Platin-Widerstandsnormale. Daraus ergeben sich Kalibrierergebnisse, die rückführbar sind auf das National Institute of Standards and Technology (USA). Die Kalibriergenauigkeit während dieser Versuche liegt bei $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,5^{\circ}\text{F}$), in einem Temperaturbereich von -195°C bis $+260^{\circ}\text{C}$. Die Versuchsdaten für die TG-Sensoren zeigen, dass ihr Verhalten in allgemeiner Form durch folgendes Polynom beschrieben werden kann:

$$R = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 + FT^5 + GT^6 \quad (1)$$

Es sind: R = Sensorwiderstand

T = Temperatur

A bis G = Konstanten, die mittels Regressionsanalyse bestimmt werden.

Werden Temperatur-Widerstandssensoren (RTD's) zur Temperaturanzeige benutzt, muss Gleichung (1) in der folgenden transponierten Form eingesetzt werden:

$$T = A' + B'R + C'R^2 + D'R^3 + E'R^4 + F'R^5 + G'R^6 \quad (2)$$

Die Werte für die Konstanten aus den Gleichungen (1) und (2) für Nickel-TG-Sensoren mit 50Ω sind in den Tabellen 1A und 1B aufgelistet.

Anmerkungen

1. Die Konstanten A' bis G' in Gl. (2) sind nicht gleich den Konstanten A bis G in Gl. (1).
2. Die Kurvenanpassungsgleichungen sind Gleichungen für beste Anpassungen und müssen nicht exakt die in den Tabellen 2 bis 5 aufgelisteten Werte ergeben.



Aufklebbare Widerstands-Temperatursensoren und ihre Messschaltungen

8.0 Tabellen - Widerstandsabhängigkeit von der Temperatur

Der folgende Abschnitt listet die Widerstandswerte von Standard-Nickel-TG-Sensoren von Vishay Micro-Measurements mit 50Ω Widerstand in Tabellen auf, in einem Tem-

peraturbereich vom Siedepunkt flüssigen Stickstoffs (-195,8°C) bis +260°C. Die Fahrenheit-Tabellen sind in Schritten von 2 Grad, die Celsius-Tabellen in Schritten von 1K dargestellt.

Tabelle 1A - Koeffizienten für Gl. (1)		
Koeff.	Los T04 Nickel	
	1018 Stahl	2024 Aluminium
A	3.946795 x 10 ¹ [4.384157 x 10 ¹]	3.939097 x 10 ¹ [4.378630 x 10 ¹]
B	1.33972 x 10 ⁻¹ [2.50996 x 10 ⁻¹]	1.34525 x 10 ⁻¹ [2.52373 x 10 ⁻¹]
C	8.31445 x 10 ⁻⁵ [2.84885 x 10 ⁻⁴]	8.63411 x 10 ⁻⁵ [2.95290 x 10 ⁻⁴]
D	4.72396 x 10 ⁻⁸ [3.00807 x 10 ⁻⁷]	5.02142 x 10 ⁻⁸ [2.88453 x 10 ⁻⁷]
E	4.93933 x 10 ⁻¹¹ [2.03720 x 10 ⁻¹⁰]	1.21108 x 10 ⁻¹¹ [2.13625 x 10 ⁻¹⁰]
F	-2.16840 x 10 ⁻¹³ [-2.95460 x 10 ⁻¹²]	-2.51606 x 10 ⁻¹³ [-2.97514 x 10 ⁻¹²]
G	3.15935 x 10 ⁻¹⁶ [1.07663 x 10 ⁻¹⁴]	4.88934 x 10 ⁻¹⁶ [1.65922 x 10 ⁻¹⁴]

Grau unterlegte Bereiche gelten für °C.

Tabelle 1B - Koeffizienten für Gl. (2)		
Koeff.	Los T04 Nickel	
	1018 Stahl	2024 Aluminium
A'	-3.87148 x 10 ² [-2.32852 x 10 ²]	-3.85275 x 10 ² [-2.31809 x 10 ²]
B'	1.437356 x 10 ¹ [79.8384 x 10 ⁻¹]	1.423312 x 10 ¹ [79.0495 x 10 ⁻¹]
C'	-20.6576 x 10 ⁻² [-11.4693 x 10 ⁻²]	-1.96463 x 10 ⁻¹ [-1.09006 x 10 ⁻¹]
D'	3.47019 x 10 ⁻³ [1.92684 x 10 ⁻³]	3.14370 x 10 ⁻³ [1.74321 x 10 ⁻³]
E'	-3.70193 x 10 ⁻⁵ [-2.05640 x 10 ⁻⁵]	-3.23587 x 10 ⁻⁵ [-1.79412 x 10 ⁻⁵]
F'	2.05767 x 10 ⁻⁷ [1.14362 x 10 ⁻⁷]	1.75570 x 10 ⁻⁷ [9.73545 x 10 ⁻⁸]
G'	-4.55192 x 10 ⁻¹⁰ [-2.53118 x 10 ⁻¹⁰]	-3.82500 x 10 ⁻¹⁰ [-2.12139 x 10 ⁻¹⁰]

Grau unterlegte Bereiche gelten für °C.

Referenzen

1. Watson, Robert B., James Dorsey, James E. Starr, "Conditioning Circuits for Bondable RTD's," 30th International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America, Denver, Colorado, May 1984.
2. American National Standard ASTM E-644, "Standard Methods for Testing Industrial Resistance Thermometers." American Society for Testing and Materials. 1916 Race Street, Philadelphia, Pennsylvania 19103, 1978.
3. Vishay Micro-Measurements, Tech Note TN-514, "Shunt Calibration of Strain Gage Instrumentation," 1988.



Aufklebbare Widerstands-Temperatursensoren und ihre Messschaltungen

TABELLE 2 - Widerstand vs. Temperatur in Grad Fahrenheit

TG Nickel-Sensor installiert auf 1018 Stahl - Los-Nr. T04AH

°F	R	°F	R	°F	R	°F	R	°F	R	°F	R
+500	134.27	+362	101.06	+224	74.15	+86	51.65	-50	32.77	-188	16.74
+498	133.73	+360	100.63	+222	73.79	+84	51.35	-52	32.51	-190	16.54
+496	133.19	+358	100.20	+220	73.44	+82	51.05	-54	32.26	-192	16.33
+494	132.66	+356	99.78	+218	73.09	+80	50.75	-56	32.01	-194	16.13
+492	132.13	+354	99.35	+216	72.73	+78	50.45	-58	31.75	-196	15.92
+490	131.60	+352	98.93	+214	72.38	+76	50.15	-60	31.50	-198	15.72
+488	131.07	+350	98.50	+212	72.03	+75.0	50.00	-62	31.25	-200	15.51
+486	130.54	+348	98.08	+210	71.69	+74	49.86	-64	31.00	-202	15.31
+484	130.02	+346	97.66	+208	71.34	+72	49.56	-66	30.75	-204	15.11
+482	129.49	+344	97.24	+206	70.99	+70	49.27	-68	30.50	-206	14.91
+480	128.97	+342	96.82	+204	70.64	+68	48.97	-70	30.25	-208	14.71
+478	128.45	+340	96.41	+202	70.30	+66	48.68	-72	30.00	-210	14.51
+476	127.93	+338	95.99	+200	69.96	+64	48.38	-74	29.75	-212	14.31
+474	127.42	+336	95.58	+198	69.61	+62	48.09	-76	29.50	-214	14.11
+472	126.90	+334	95.16	+196	69.27	+60	47.80	-78	29.26	-216	13.92
+470	126.39	+332	94.75	+194	68.93	+58	47.51	-80	29.01	-218	13.72
+468	125.88	+330	94.34	+192	68.59	+56	47.22	-82	28.76	-220	13.53
+466	125.37	+328	93.93	+190	68.25	+54	46.93	-84	28.52	-222	13.33
+464	124.86	+326	93.52	+188	67.91	+52	46.64	-86	28.27	-224	13.14
+462	124.36	+324	93.12	+186	67.57	+50	46.35	-88	28.03	-226	12.95
+460	123.85	+322	92.71	+184	67.23	+48	46.07	-90	27.79	-228	12.75
+458	123.35	+320	92.31	+182	66.89	+46	45.78	-92	27.55	-230	12.56
+456	122.85	+318	91.90	+180	66.56	+44	45.49	-94	27.31	-232	12.37
+454	122.35	+316	91.50	+178	66.22	+42	45.21	-96	27.06	-234	12.18
+452	121.85	+314	91.10	+176	65.89	+40	44.92	-98	26.82	-236	12.00
+450	121.36	+312	90.70	+174	65.56	+38	44.64	-100	26.58	-238	11.81
+448	120.86	+310	90.30	+172	65.22	+36	44.35	-102	26.35	-240	11.62
+446	120.37	+308	89.90	+170	64.89	+34	44.07	-104	26.11	-242	11.44
+444	119.88	+306	89.50	+168	64.56	+32	43.79	-106	25.87	-244	11.25
+442	119.39	+304	89.11	+166	64.23	+30	43.51	-108	25.63	-246	11.07
+440	118.90	+302	88.71	+164	63.90	+28	43.23	-110	25.40	-248	10.88
+438	118.42	+300	88.32	+162	63.57	+26	42.94	-112	25.16	-250	10.70
+436	117.93	+298	87.93	+160	63.24	+24	42.67	-114	24.93	-252	10.52
+434	117.45	+296	87.54	+158	62.92	+22	42.39	-116	24.69	-254	10.34
+432	116.97	+294	87.15	+156	62.59	+20	42.11	-118	24.46	-256	10.16
+430	116.49	+292	86.76	+154	62.27	+18	41.83	-120	24.23	-258	9.98
+428	116.01	+290	86.37	+152	61.94	+16	41.55	-122	24.00	-260	9.80
+426	115.53	+288	85.98	+150	61.62	+14	41.28	-124	23.76	-262	9.63
+424	115.06	+286	85.60	+148	61.29	+12	41.00	-126	23.53	-264	9.45
+422	114.59	+284	85.21	+146	60.97	+10	40.73	-128	23.30	-266	9.28
+420	114.11	+282	84.83	+144	60.65	+8	40.45	-130	23.08	-268	9.10
+418	113.64	+280	84.45	+142	60.33	+6	40.18	-132	22.85	-270	8.93
+416	113.17	+278	84.07	+140	60.01	+4	39.90	-134	22.62	-272	8.76
+414	112.71	+276	83.69	+138	59.69	+2	39.63	-136	22.39	-274	8.58
+412	112.24	+274	83.31	+136	59.37	+0	39.36	-138	22.17	-276	8.41
+410	111.78	+272	82.93	+134	59.05	-2	39.09	-140	21.94	-278	8.24
+408	111.31	+270	82.55	+132	58.74	-4	38.82	-142	21.72	-280	8.08
+406	110.85	+268	82.17	+130	58.42	-6	38.55	-144	21.49	-282	7.91
+404	110.39	+266	81.80	+128	58.10	-8	38.28	-146	21.27	-284	7.74
+402	109.93	+264	81.43	+126	57.79	-10	38.01	-148	21.04	-286	7.58
+400	109.48	+262	81.05	+124	57.48	-12	37.74	-150	20.82	-288	7.41
+398	109.02	+260	80.68	+122	57.16	-14	37.47	-152	20.60	-290	7.25
+396	108.57	+258	80.31	+120	56.85	-16	37.21	-154	20.38	-292	7.09
+394	108.12	+256	79.94	+118	56.54	-18	36.94	-156	20.16	-294	6.92
+392	107.66	+254	79.57	+116	56.23	-20	36.67	-158	19.94	-296	6.76
+390	107.21	+252	79.20	+114	55.92	-22	36.41	-160	19.72	-298	6.60
+388	106.77	+250	78.83	+112	55.61	-24	36.15	-162	19.51	-300	6.44
+386	106.32	+248	78.47	+110	55.30	-26	35.88	-164	19.29	-302	6.29
+384	105.87	+246	78.10	+108	54.99	-28	35.62	-166	19.07	-304	6.13
+382	105.43	+244	77.74	+106	54.68	-30	35.36	-168	18.86	-306	5.97
+380	104.99	+242	77.37	+104	54.37	-32	35.10	-170	18.64	-308	5.82
+378	104.54	+240	77.01	+102	54.07	-34	34.83	-172	18.43	-310	5.67
+376	104.10	+238	76.65	+100	53.76	-36	34.57	-174	18.22	-312	5.51
+374	103.67	+236	76.29	+98	53.46	-38	34.31	-176	18.00	-314	5.36
+372	103.23	+234	75.93	+96	53.15	-40	34.05	-178	17.79	-316	5.21
+370	102.79	+232	75.57	+94	52.85	-42	33.80	-180	17.58	-318	5.06
+368	102.36	+230	75.21	+92	52.55	-44	33.54	-182	17.37	-320	4.91
+366	101.92	+228	74.86	+90	52.25	-46	33.28	-184	17.16	-320.4	4.88
+364	101.49	+226	74.50	+88	51.95	-48	33.02	-186	16.95		

TECH NOTE



Aufklebbare Widerstands-Temperatur Sensoren und ihre Messschaltungen

TABELLE 3 - Widerstand vs. Temperatur in Grad Fahrenheit

TG Nickel-Sensor installiert auf 2024-T4 Aluminiumlegierung - Los-Nr. T04AH

°F	R	°F	R	°F	R	°F	R	°F	R	°F	R
+500	134.14	+362	100.54	+224	73.83	+86	51.62	-50	32.77	-188	16.74
+498	133.59	+360	100.12	+222	73.48	+84	51.33	-52	32.51	-190	16.54
+496	133.04	+358	99.69	+220	73.13	+82	51.03	-54	32.26	-192	16.33
+494	132.49	+356	99.26	+218	72.78	+80	50.73	-56	32.01	-194	16.13
+492	131.95	+354	98.84	+216	72.43	+78	50.44	-58	31.75	-196	15.92
+490	131.40	+352	98.41	+214	72.09	+76	50.15	-60	31.50	-198	15.72
+488	130.86	+350	97.99	+212	71.74	+75.0	50.00	-62	31.25	-200	15.51
+486	130.33	+348	97.57	+210	71.40	+74	49.86	-64	31.00	-202	15.31
+484	129.79	+346	97.15	+208	71.06	+72	49.56	-66	30.75	-204	15.11
+482	129.26	+344	96.73	+206	70.71	+70	49.27	-68	30.50	-206	14.91
+480	128.72	+342	96.31	+204	70.37	+68	48.97	-70	30.25	-208	14.71
+478	128.19	+340	95.90	+202	70.03	+66	48.68	-72	30.00	-210	14.51
+476	127.67	+338	95.48	+200	69.69	+64	48.38	-74	29.75	-212	14.31
+474	127.14	+336	95.07	+198	69.35	+62	48.09	-76	29.50	-214	14.11
+472	126.62	+334	94.66	+196	69.01	+60	47.80	-78	29.26	-216	13.92
+470	126.09	+332	94.25	+194	68.68	+58	47.51	-80	29.01	-218	13.72
+468	125.57	+330	93.84	+192	68.34	+56	47.22	-82	28.76	-220	13.53
+466	125.05	+328	93.43	+190	68.01	+54	46.93	-84	28.52	-222	13.33
+464	124.54	+326	93.03	+188	67.67	+52	46.64	-86	28.27	-224	13.14
+462	124.02	+324	92.62	+186	67.34	+50	46.35	-88	28.03	-226	12.95
+460	123.51	+322	92.22	+184	67.00	+48	46.07	-90	27.79	-228	12.75
+458	123.00	+320	91.82	+182	66.67	+46	45.78	-92	27.55	-230	12.56
+456	122.49	+318	91.41	+180	66.34	+44	45.49	-94	27.31	-232	12.37
+454	121.99	+316	91.01	+178	66.01	+42	45.21	-96	27.06	-234	12.18
+452	121.48	+314	90.61	+176	65.68	+40	44.92	-98	26.82	-236	12.00
+450	120.98	+312	90.22	+174	65.35	+38	44.64	-100	26.58	-238	11.81
+448	120.48	+310	89.82	+172	65.02	+36	44.35	-102	26.35	-240	11.62
+446	119.98	+308	89.43	+170	64.70	+34	44.07	-104	26.11	-242	11.44
+444	119.48	+306	89.03	+168	64.37	+32	43.79	-106	25.87	-244	11.25
+442	118.99	+304	88.64	+166	64.04	+30	43.51	-108	25.63	-246	11.07
+440	118.49	+302	88.25	+164	63.72	+28	43.23	-110	25.40	-248	10.88
+438	118.00	+300	87.86	+162	63.39	+26	42.94	-112	25.16	-250	10.70
+436	117.51	+298	87.47	+160	63.07	+24	42.67	-114	24.93	-252	10.52
+434	117.02	+296	87.08	+158	62.75	+22	42.39	-116	24.69	-254	10.34
+432	116.54	+294	86.69	+156	62.43	+20	42.11	-118	24.46	-256	10.16
+430	116.05	+292	86.31	+154	62.11	+18	41.83	-120	24.23	-258	9.98
+428	115.57	+290	85.92	+152	61.79	+16	41.55	-122	24.00	-260	9.80
+426	115.09	+288	85.54	+150	61.47	+14	41.28	-124	23.76	-262	9.63
+424	114.61	+286	85.16	+148	61.15	+12	41.00	-126	23.53	-264	9.45
+422	114.13	+284	84.77	+146	60.83	+10	40.73	-128	23.30	-266	9.28
+420	113.65	+282	84.39	+144	60.51	+8	40.45	-130	23.08	-268	9.10
+418	113.18	+280	84.02	+142	60.20	+6	40.18	-132	22.85	-270	8.93
+416	112.71	+278	83.64	+140	59.88	+4	39.90	-134	22.62	-272	8.76
+414	112.23	+276	83.26	+138	59.57	+2	39.63	-136	22.39	-274	8.58
+412	111.77	+274	82.89	+136	59.25	+0	39.36	-138	22.17	-276	8.41
+410	111.30	+272	82.51	+134	58.94	-2	39.09	-140	21.94	-278	8.24
+408	110.83	+270	82.14	+132	58.62	-4	38.82	-142	21.72	-280	8.08
+406	110.37	+268	81.76	+130	58.31	-6	38.55	-144	21.49	-282	7.91
+404	109.90	+266	81.39	+128	58.00	-8	38.28	-146	21.27	-284	7.74
+402	109.44	+264	81.02	+126	57.69	-10	38.01	-148	21.04	-286	7.58
+400	108.98	+262	80.65	+124	57.38	-12	37.74	-150	20.82	-288	7.41
+398	108.53	+260	80.28	+122	57.07	-14	37.47	-152	20.60	-290	7.25
+396	108.07	+258	79.92	+120	56.76	-16	37.21	-154	20.38	-292	7.09
+394	107.61	+256	79.55	+118	56.45	-18	36.94	-156	20.16	-294	6.92
+392	107.16	+254	79.19	+116	56.15	-20	36.67	-158	19.94	-296	6.76
+390	106.71	+252	78.82	+114	55.84	-22	36.41	-160	19.72	-298	6.60
+388	106.26	+250	78.46	+112	55.53	-24	36.15	-162	19.51	-300	6.44
+386	105.81	+248	78.10	+110	55.23	-26	35.88	-164	19.29	-302	6.29
+384	105.36	+246	77.74	+108	54.93	-28	35.62	-166	19.07	-304	6.13
+382	104.92	+244	77.38	+106	54.62	-30	35.36	-168	18.86	-306	5.97
+380	104.47	+242	77.02	+104	54.32	-32	35.10	-170	18.64	-308	5.82
+378	104.03	+240	76.66	+102	54.02	-34	34.83	-172	18.43	-310	5.67
+376	103.59	+238	76.30	+100	53.71	-36	34.57	-174	18.22	-312	5.51
+374	103.15	+236	75.94	+98	53.41	-38	34.31	-176	18.00	-314	5.36
+372	102.71	+234	75.59	+96	53.11	-40	34.05	-178	17.79	-316	5.21
+370	102.28	+232	75.24	+94	52.81	-42	33.80	-180	17.58	-318	5.06
+368	101.84	+230	74.88	+92	52.51	-44	33.54	-182	17.37	-320	4.91
+366	101.41	+228	74.53	+90	52.22	-46	33.28	-184	17.16	-320.4	4.88
+364	100.98	+226	74.18	+88	51.92	-48	33.02	-186	16.95		

TECH NOTE

Aufklebbare Widerstands-Temperatursensoren und ihre Messschaltungen

TABELLE 4 - Widerstand vs. Temperatur in Grad Celsius

TG Nickel-Sensor installiert auf 1018 Stahl - Los-Nr. T04AH

°C	R	°C	R	°C	R	°C	R	°C	R	°C	R	°C	R
+260	134.27	+194	105.25	+128	81.13	+62	60.59	-3	43.03	-69	27.52	-135	14.41
+259	133.78	+193	104.85	+127	80.79	+61	60.30	-4	42.78	-70	27.31	-136	14.23
+258	133.30	+192	104.46	+126	80.46	+60	60.01	-5	42.53	-71	27.09	-137	14.05
+257	132.82	+191	104.06	+125	80.12	+59	59.72	-6	42.27	-72	26.87	-138	13.88
+256	132.34	+190	103.67	+124	79.79	+58	59.43	-7	42.02	-73	26.66	-139	13.70
+255	131.86	+189	103.27	+123	79.46	+57	59.15	-8	41.77	-74	26.44	-140	13.53
+254	131.39	+188	102.88	+122	79.13	+56	58.86	-9	41.52	-75	26.23	-141	13.35
+253	130.91	+187	102.49	+121	78.80	+55	58.58	-10	41.28	-76	26.01	-142	13.18
+252	130.44	+186	102.10	+120	78.47	+54	58.29	-11	41.03	-77	25.80	-143	13.00
+251	129.96	+185	101.71	+119	78.14	+53	58.01	-12	40.78	-78	25.59	-144	12.83
+250	129.49	+184	101.32	+118	77.81	+52	57.73	-13	40.53	-79	25.37	-145	12.66
+249	129.02	+183	100.93	+117	77.48	+51	57.44	-14	40.29	-80	25.16	-146	12.49
+248	128.56	+182	100.55	+116	77.16	+50	57.16	-15	40.04	-81	24.95	-147	12.32
+247	128.09	+181	100.16	+115	76.83	+49	56.88	-16	39.79	-82	24.74	-148	12.15
+246	127.62	+180	99.78	+114	76.51	+48	56.60	-17	39.55	-83	24.53	-149	11.98
+245	127.16	+179	99.39	+113	76.18	+47	56.32	-18	39.30	-84	24.32	-150	11.81
+244	126.70	+178	99.01	+112	75.86	+46	56.04	-19	39.06	-85	24.11	-151	11.64
+243	126.24	+177	98.63	+111	75.54	+45	55.76	-20	38.82	-86	23.90	-152	11.47
+242	125.78	+176	98.25	+110	75.21	+44	55.48	-21	38.57	-87	23.70	-153	11.31
+241	125.32	+175	97.87	+109	74.89	+43	55.20	-22	38.33	-88	23.49	-154	11.14
+240	124.86	+174	97.49	+108	74.57	+42	54.93	-23	38.09	-89	23.28	-155	10.97
+239	124.41	+173	97.12	+107	74.25	+41	54.65	-24	37.85	-90	23.08	-156	10.81
+238	123.95	+172	96.74	+106	73.93	+40	54.37	-25	37.61	-91	22.87	-157	10.65
+237	123.50	+171	96.37	+105	73.61	+39	54.10	-26	37.37	-92	22.66	-158	10.48
+236	123.05	+170	95.99	+104	73.30	+38	53.82	-27	37.13	-93	22.46	-159	10.32
+235	122.60	+169	95.62	+103	72.98	+37	53.55	-28	36.89	-94	22.25	-160	10.16
+234	122.15	+168	95.25	+102	72.66	+36	53.28	-29	36.65	-95	22.05	-161	10.00
+233	121.70	+167	94.88	+101	72.35	+35	53.00	-30	36.41	-96	21.85	-162	9.84
+232	121.26	+166	94.51	+100	72.03	+34	52.73	-31	36.17	-97	21.65	-163	9.68
+231	120.81	+165	94.14	+99	71.72	+33	52.46	-32	35.93	-98	21.45	-164	9.52
+230	120.37	+164	93.77	+98	71.41	+32	52.19	-33	35.70	-99	21.25	-165	9.36
+229	119.93	+163	93.40	+97	71.09	+31	51.92	-34	35.46	-100	21.04	-166	9.21
+228	119.49	+162	93.04	+96	70.78	+30	51.65	-35	35.23	-101	20.85	-167	9.05
+227	119.05	+161	92.67	+95	70.47	+29	51.38	-36	34.99	-102	20.65	-168	8.89
+226	118.61	+160	92.31	+94	70.16	+28	51.11	-37	34.76	-103	20.45	-169	8.74
+225	118.17	+159	91.94	+93	69.85	+27	50.84	-38	34.52	-104	20.25	-170	8.58
+224	117.74	+158	91.58	+92	69.54	+26	50.57	-39	34.29	-105	20.05	-171	8.43
+223	117.31	+157	91.22	+91	69.23	+25	50.30	-40	34.05	-106	19.85	-172	8.28
+222	116.87	+156	90.86	+90	68.93	+24	50.03	-41	33.82	-107	19.66	-173	8.13
+221	116.44	+155	90.50	+89	68.62	+23.9	50.00	-42	33.59	-108	19.46	-174	7.98
+220	116.01	+154	90.14	+88	68.31	+23	49.77	-43	33.36	-109	19.27	-175	7.83
+219	115.58	+153	89.78	+87	68.01	+22	49.50	-44	33.13	-110	19.07	-176	7.68
+218	115.15	+152	89.43	+86	67.70	+21	49.24	-45	32.90	-111	18.88	-177	7.53
+217	114.73	+151	89.07	+85	67.40	+20	48.97	-46	32.67	-112	18.69	-178	7.38
+216	114.30	+150	88.71	+84	67.10	+19	48.71	-47	32.44	-113	18.49	-179	7.23
+215	113.88	+149	88.36	+83	66.79	+18	48.44	-48	32.21	-114	18.30	-180	7.09
+214	113.46	+148	88.01	+82	66.49	+17	48.18	-49	31.98	-115	18.11	-181	6.94
+213	113.03	+147	87.66	+81	66.19	+16	47.92	-50	31.75	-116	17.92	-182	6.80
+212	112.61	+146	87.30	+80	65.89	+15	47.66	-51	31.52	-117	17.73	-183	6.65
+211	112.20	+145	86.95	+79	65.59	+14	47.39	-52	31.30	-118	17.54	-184	6.51
+210	111.78	+144	86.60	+78	65.29	+13	47.13	-53	31.07	-119	17.35	-185	6.37
+209	111.36	+143	86.26	+77	64.99	+12	46.87	-54	30.85	-120	17.16	-186	6.22
+208	110.95	+142	85.91	+76	64.69	+11	46.61	-55	30.62	-121	16.97	-187	6.08
+207	110.53	+141	85.56	+75	64.40	+10	46.35	-56	30.40	-122	16.79	-188	5.94
+206	110.12	+140	85.21	+74	64.10	+9	46.09	-57	30.17	-123	16.60	-189	5.80
+205	109.71	+139	84.87	+73	63.80	+8	45.84	-58	29.95	-124	16.41	-190	5.67
+204	109.30	+138	84.52	+72	63.51	+7	45.58	-59	29.72	-125	16.23	-191	5.53
+203	108.89	+137	84.18	+71	63.21	+6	45.32	-60	29.50	-126	16.04	-192	5.39
+202	108.48	+136	83.84	+70	62.92	+5	45.06	-61	29.28	-127	15.86	-193	5.26
+201	108.07	+135	83.50	+69	62.62	+4	44.81	-62	29.06	-128	15.68	-194	5.12
+200	107.66	+134	83.16	+68	62.33	+3	44.55	-63	28.84	-129	15.49	-195	4.99
+199	107.26	+133	82.82	+67	62.04	+2	44.30	-64	28.62	-130	15.31	-195.8	4.88
+198	106.86	+132	82.48	+66	61.75	+1	44.04	-65	28.40	-131	15.13		
+197	106.45	+131	82.14	+65	61.46	+0	43.79	-66	28.18	-132	14.95		
+196	106.05	+130	81.80	+64	61.16	-1	43.53	-67	27.96	-133	14.77		
+195	105.65	+129	81.46	+63	60.87	-2	43.28	-68	27.74	-134	14.59		



Aufklebbare Widerstands-Temperatursensoren und ihre Messschaltungen

TABELLE 5 - Widerstand vs. Temperatur in Grad Celsius

TG Nickel-Sensor installiert auf 2024-T4 Aluminiumlegierung - Los-Nr. T04AH

°C	R	°C	R	°C	R	°C	R	°C	R	°C	R	°C	R
+260	134.14	+194	104.74	+128	80.73	+62	60.45	-3	43.03	-69	27.52	-135	14.41
+259	133.64	+193	104.34	+127	80.40	+61	60.16	-4	42.78	-70	27.31	-136	14.23
+258	133.15	+192	103.94	+126	80.06	+60	59.88	-5	42.53	-71	27.09	-137	14.05
+257	132.65	+191	103.55	+125	79.73	+59	59.60	-6	42.27	-72	26.87	-138	13.88
+256	132.16	+190	103.15	+124	79.41	+58	59.31	-7	42.02	-73	26.66	-139	13.70
+255	131.68	+189	102.76	+123	79.08	+57	59.03	-8	41.77	-74	26.44	-140	13.53
+254	131.19	+188	102.36	+122	78.75	+56	58.75	-9	41.52	-75	26.23	-141	13.35
+253	130.70	+187	101.97	+121	78.42	+55	58.47	-10	41.28	-76	26.01	-142	13.18
+252	130.22	+186	101.58	+120	78.10	+54	58.19	-11	41.03	-77	25.80	-143	13.00
+251	129.74	+185	101.19	+119	77.77	+53	57.91	-12	40.78	-78	25.59	-144	12.83
+250	129.26	+184	100.80	+118	77.45	+52	57.63	-13	40.53	-79	25.37	-145	12.66
+249	128.78	+183	100.42	+117	77.12	+51	57.35	-14	40.29	-80	25.16	-146	12.49
+248	128.30	+182	100.03	+116	76.80	+50	57.07	-15	40.04	-81	24.95	-147	12.32
+247	127.82	+181	99.64	+115	76.48	+49	56.79	-16	39.79	-82	24.74	-148	12.15
+246	127.35	+180	99.26	+114	76.16	+48	56.52	-17	39.55	-83	24.53	-149	11.98
+245	126.88	+179	98.88	+113	75.84	+47	56.24	-18	39.30	-84	24.32	-150	11.81
+244	126.41	+178	98.50	+112	75.52	+46	55.96	-19	39.06	-85	24.11	-151	11.64
+243	125.94	+177	98.12	+111	75.20	+45	55.69	-20	38.82	-86	23.90	-152	11.47
+242	125.47	+176	97.74	+110	74.88	+44	55.41	-21	38.57	-87	23.70	-153	11.31
+241	125.00	+175	97.36	+109	74.56	+43	55.14	-22	38.33	-88	23.49	-154	11.14
+240	124.54	+174	96.98	+108	74.25	+42	54.86	-23	38.09	-89	23.28	-155	10.97
+239	124.08	+173	96.61	+107	73.93	+41	54.59	-24	37.85	-90	23.08	-156	10.81
+238	123.61	+172	96.23	+106	73.62	+40	54.32	-25	37.61	-91	22.87	-157	10.65
+237	123.15	+171	95.86	+105	73.30	+39	54.05	-26	37.37	-92	22.66	-158	10.48
+236	122.70	+170	95.48	+104	72.99	+38	53.77	-27	37.13	-93	22.46	-159	10.32
+235	122.24	+169	95.11	+103	72.68	+37	53.50	-28	36.89	-94	22.26	-160	10.16
+234	121.78	+168	94.74	+102	72.36	+36	53.23	-29	36.65	-95	22.05	-161	10.00
+233	121.33	+167	94.37	+101	72.05	+35	52.96	-30	36.41	-96	21.85	-162	9.84
+232	120.88	+166	94.00	+100	71.74	+34	52.69	-31	36.17	-97	21.65	-163	9.68
+231	120.43	+165	93.64	+99	71.43	+33	52.42	-32	35.93	-98	21.45	-164	9.52
+230	119.98	+164	93.27	+98	71.12	+32	52.16	-33	35.70	-99	21.25	-165	9.36
+229	119.53	+163	92.90	+97	70.82	+31	51.89	-34	35.46	-100	21.04	-166	9.21
+228	119.08	+162	92.54	+96	70.51	+30	51.62	-35	35.23	-101	20.85	-167	9.05
+227	118.64	+161	92.18	+95	70.20	+29	51.35	-36	34.99	-102	20.65	-168	8.89
+226	118.20	+160	91.82	+94	69.90	+28	51.09	-37	34.76	-103	20.45	-169	8.74
+225	117.75	+159	91.45	+93	69.59	+27	50.82	-38	34.52	-104	20.25	-170	8.58
+224	117.31	+158	91.09	+92	69.28	+26	50.56	-39	34.29	-105	20.05	-171	8.43
+223	116.88	+157	90.73	+91	68.98	+25	50.29	-40	34.05	-106	19.85	-172	8.28
+222	116.44	+156	90.38	+90	68.68	+24	50.03	-41	33.82	-107	19.66	-173	8.13
+221	116.00	+155	90.02	+89	68.37	+23.9	50.00	-42	33.59	-108	19.46	-174	7.98
+220	115.57	+154	89.66	+88	68.07	+23	49.77	-43	33.36	-109	19.27	-175	7.83
+219	115.13	+153	89.31	+87	67.77	+22	49.50	-44	33.13	-110	19.07	-176	7.68
+218	114.70	+152	88.95	+86	67.47	+21	49.24	-45	32.90	-111	18.88	-177	7.53
+217	114.27	+151	88.60	+85	67.17	+20	48.97	-46	32.67	-112	18.69	-178	7.38
+216	113.84	+150	88.25	+84	66.87	+19	48.71	-47	32.44	-113	18.49	-179	7.23
+215	113.42	+149	87.90	+83	66.57	+18	48.44	-48	32.21	-114	18.30	-180	7.09
+214	112.99	+148	87.55	+82	66.27	+17	48.18	-49	31.98	-115	18.11	-181	6.94
+213	112.56	+147	87.20	+81	65.98	+16	47.92	-50	31.75	-116	17.92	-182	6.80
+212	112.14	+146	86.85	+80	65.68	+15	47.66	-51	31.52	-117	17.73	-183	6.65
+211	111.72	+145	86.50	+79	65.38	+14	47.39	-52	31.30	-118	17.54	-184	6.51
+210	111.30	+144	86.15	+78	65.09	+13	47.13	-53	31.07	-119	17.35	-185	6.37
+209	110.88	+143	85.81	+77	64.79	+12	46.87	-54	30.85	-120	17.16	-186	6.22
+208	110.46	+142	85.46	+76	64.50	+11	46.61	-55	30.62	-121	16.97	-187	6.08
+207	110.04	+141	85.12	+75	64.21	+10	46.35	-56	30.40	-122	16.79	-188	5.94
+206	109.63	+140	84.77	+74	63.91	+9	46.09	-57	30.17	-123	16.60	-189	5.80
+205	109.21	+139	84.43	+73	63.62	+8	45.84	-58	29.95	-124	16.41	-190	5.67
+204	108.80	+138	84.09	+72	63.33	+7	45.58	-59	29.72	-125	16.23	-191	5.53
+203	108.39	+137	83.75	+71	63.04	+6	45.32	-60	29.50	-126	16.04	-192	5.39
+202	107.98	+136	83.41	+70	62.75	+5	45.06	-61	29.28	-127	15.86	-193	5.26
+201	107.57	+135	83.07	+69	62.46	+4	44.81	-62	29.06	-128	15.68	-194	5.12
+200	107.16	+134	82.74	+68	62.17	+3	44.55	-63	28.84	-129	15.49	-195	4.99
+199	106.75	+133	82.40	+67	61.88	+2	44.30	-64	28.62	-130	15.31	-195.8	4.88
+198	106.35	+132	82.06	+66	61.59	+1	44.04	-65	28.40	-131	15.13		
+197	105.94	+131	81.73	+65	61.31	+0	43.79	-66	28.18	-132	14.95		
+196	105.54	+130	81.39	+64	61.02	-1	43.53	-67	27.96	-133	14.77		
+195	105.14	+129	81.06	+63	60.73	-2	43.28	-68	27.74	-134	14.59		

TECH NOTE