

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

1.0 Einführung

Idealerweise sollte ein DMS, der auf einem Bauteil appliziert ist, nur auf die durch Belastungen entstehenden Dehnungen reagieren und von anderen variablen Einflußgrößen aus der Umgebung unbeeinflusst bleiben. Wie alle anderen Sensoren auch, verhält sich der konventionelle Widerstands-DMS jedoch leider nicht so perfekt. Der elektrische Widerstand des DMS ändert sich nicht nur mit der Dehnung, sondern auch mit der Temperatur. Dazu kommt, dass sich die Beziehung zwischen Dehnung und Widerstand selbst, also die als K-Faktor definierte Dehnungsempfindlichkeit des DMS, mit der Temperatur ändert. Dieses Abweichen vom Idealverhalten kann unter bestimmten Umständen wichtig werden und beträchtliche Messfehler hervorrufen, wenn es keine entsprechende Berücksichtigung findet. Werden jedoch die diesem Verhalten zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten verstanden, können diese Fehler unter Kontrolle gehalten und durch Kompensation oder Korrektur praktisch eliminiert werden.

In **Abschnitt 2.0** dieser TechNote wird das thermische Ausgangssignal aus DMS (auch "scheinbare Dehnung" genannt) definiert, und die Ursachen dieses Effekts werden beschrieben. Danach werden typische Größen des thermischen Ausgangssignals festgestellt, gefolgt von einer Darstellung gängiger Kompensations- und Korrekturmethode. **Abschnitt 3.0** behandelt die K-Faktor-Änderung mit der Temperatur in ähnlicher Weise, jedoch in kürzerer Form, da die Bedeutung dieser Fehlerquelle im Allgemeinen geringer ist. Schließlich werden in **Abschnitt 4.0** Methoden zur gleichzeitigen Korrektur von Fehlern aus dem thermischen Ausgangssignal und der thermischen K-Faktor-Änderung erläutert und mittels numerischer Beispiele verdeutlicht.

2.0 Thermisches Ausgangssignal

Wird ein installierter DMS an eine Dehnmessbrücke angeschlossen, diese abgeglichen und der DMS einer Temperaturänderung ausgesetzt, so wird diese im DMS eine Widerstandsänderung hervorrufen, die als "Dehnungs"signal auf dem Instrument abzulesen ist. Diese temperaturinduzierte Widerstandsänderung ist unabhängig von der durch mechanische Spannungen im Bauteil hervorgerufenen Dehnung und steht auch in keiner Beziehung zu ihr. Sie ist *nur* auf die Temperaturänderung zurückzuführen und wird konsequenterweise *thermisches Ausgangssignal* genannt.

Im Bereich statischer Dehnmessungen mit DMS ist das thermische Ausgangssignal die potenziell ernsthafteste Fehlerquelle. Wird eine Dehnmessung weit abseits der Raumtemperatur (oder weit abseits der Temperatur, bei welcher der Brückenabgleich stattgefunden hat) durchgeführt, kann der Fehler aus dem thermischen Ausgangssignal - wird er nicht unter Kontrolle gehalten - in der Tat größer werden als die zu messende Dehnung. Diese Fehlerquelle verlangt daher sorgfältige Beachtung bei jeder Temperatur und bei jeder Temperaturänderung, und es ist gewöhnlich notwendig, Kompensationsmaßnahmen zu ergreifen oder entsprechende Fehlerkorrekturen vorzunehmen.

Das thermische Ausgangssignal wird durch zwei zusammenwirkende und algebraisch additive Effekte in der DMS-Installation hervorgerufen. Erstens ist der spezifische Widerstand des Gittermaterials in gewissem Maße temperaturabhängig, wodurch sich der DMS-Widerstand mit der Temperatur ändert. Die zweite Beitragsgröße zum thermischen Ausgangssignal ergibt sich aus den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des DMS-Gittermaterials und des Bauteilmaterials, auf das der DMS geklebt ist. Bei Temperaturänderungen dehnt sich das Bauteilmaterial oder zieht sich zusammen, und aufgrund der Klebeverbindung ist das DMS-Gitter gezwungen, diese Formänderungen voll mitzumachen. In dem Ausmaß nun, in dem sich der thermische Ausdehnungskoeffizient des DMS-Gitters von dem des Bauteilmaterials unterscheidet, wird das Gitter mechanisch belastet, derart, dass es der freien Ausdehnung oder Kontraktion des Bauteils folgen muss. Da das Gitter in seiner DMS-Funktion aber dehnungsempfindlich ist, wird es eine dem Unterschied der genannten Ausdehnungskoeffizienten proportionale Widerstandsänderung zeigen.

Bezogen auf das Vorzeichen der Temperaturänderung können die Vorzeichen der beiden Widerstandsänderungen negativ oder positiv sein, und das thermische Ausgangssignal ist immer ihre algebraische Summe. Für das thermische Ausgangssignal, ausgedrückt als relative Widerstandsänderung, kann also geschrieben werden:

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{T/A} = \left[\beta_{DMS} + K_{DMS} \left(\frac{1 + k_t}{1 - \nu_0 k_t} \right) (\alpha_S - \alpha_{DMS}) \right] \Delta T \quad (1)$$

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

Es sind:

- $\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)$ = Relative Widerstandsänderung bezogen auf Referenztemperatur R_0 aufgrund der Charakteristik des thermischen Ausgangssignals.
- β_{DMS} = Widerstands-Temperaturkoeffizient des DMS-Gittermaterials.
- K_{DMS} = K-Faktor des DMS.*
- k_t = Querdehnungsempfindlichkeit des DMS.
- ν_0 = Poisson'sche Zahl (0,285) des Standard-Test-Werkstoffes, auf welchem der DMS-K-Faktor kalibriert wird.
- $\alpha_s - \alpha_{DMS}$ = Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Messobjektmaterials und des DMS.
- ΔT = Temperaturänderung bezogen auf eine beliebige Initial-Referenztemperatur.

Der Korrekturfaktor für die Querdehnungsempfindlichkeit $(1 + k_t/(1 - \nu_0 k_t))$ ist in Gleichung (1) enthalten, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass die beiden Hauptdehnungen im DMS-Gitter, die sich aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten ergeben, größtenteils gleich sind, während K_{DMS} sich auf eine Dehnungsempfindlichkeit bezieht, die im einachsigen Spannungsfeld mit einem Hauptdehnungsverhältnis von $1/(-0,285)$ kalibriert worden ist.

Aus der Form von Gleichung (1) sollte nicht abgeleitet werden, dass sich das thermische Ausgangssignal als Funktion der Temperaturänderung linear verhält, weil alle Koeffizienten in den Klammern selbst temperaturabhängig sind. Aus der Gleichung geht jedoch klar hervor, dass das thermische Ausgangssignal nicht allein von der Natur des DMS abhängt, sondern ebenso auch von dem Werkstoff, auf den der DMS geklebt ist. Daraus folgt, dass quantitative Aussagen über das thermische Ausgangssignal aus einem DMS nur Sinn haben, wenn sie sich auf einen bestimmten DMS und auf das Material beziehen, auf das er geklebt ist.

Der Einfachheit halber wird die durch Temperaturänderung im DMS hervorgerufene Widerstandsänderung, als das thermische Ausgangssignal des DMS, gewöhnlich in Dehnungseinheiten angegeben. Daher auch der häufig gebrauchte Begriff "scheinbare Dehnung" für das thermische Ausgangssignal. Teilt man also Gleichung (1) durch den an der Dehnungsmessbrücke eingestellten K-Faktor K_I , ergibt sich:

$$\epsilon_{T/A} = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{T/A}}{K_I} = \frac{\left[\beta_{DMS} + K_{DMS} \left(\frac{1 + k_t}{1 - \nu_0 k_t}\right) (\alpha_s - \alpha_{DMS})\right] \Delta T}{K_I} \quad (2)$$

Es ist $\epsilon_{T/A}$ = Thermisches Ausgangssignal in Dehnungseinheiten, die von der Dehnungsmessbrücke angezeigte Dehnung (bei K-Faktor-Einstel-

lung K_I), wenn die DMS-Installation einer Temperaturänderung ΔT ausgesetzt ist und unter der Bedingung einer freien Wärmedehnung des Bauteilmaterials.

Werden durch Materialspannungen hervorgerufene Dehnungen bei einer Temperatur gemessen, die sich von der während des Brückenabgleichs vorliegenden Temperatur unterscheidet, ist das thermische Ausgangssignal in einer durch Gleichung (2) definierten Größe dem DMS-Ausgangssignal, das sich aus der mechanischen Dehnung ergibt, überlagert. Das bedeutet in Bezug auf den eigentlichen Dehnungsmesswert ein Fehlersignal in Größe des thermischen Ausgangssignals. Das thermische Ausgangssignal wird von vielen Faktoren beeinflusst. Einige der wichtigeren dieser Einflussfaktoren sind: Bauteilmaterial und Bauteilform, Gitterlegierung und Produktionscharge der Gitterfolie, DMS-Serie und DMS-Bauform, Querdehnungsempfindlichkeit des DMS, Kleber und Abdeckmittel sowie die angewandten Installationsverfahren. Es ist für keinen DMS-Hersteller möglich, exakt vorzusagen, wie groß das thermische Ausgangssignal aus einem DMS sein wird, den der Anwender auf ein gegebenes Bauteil installiert. Das gilt sogar für solche Fälle, bei denen das Bauteilmaterial das gleiche ist, das der DMS-Hersteller zur Erstellung der DMS-Kennwerte benutzt, da alle technischen Werkstoffe sich in ihrem thermischen Ausdehnungsverhalten von Charge zu Charge unterscheiden. Werden gewisse Messgenauigkeiten angestrebt, ist es daher immer ratsam, einen oder mehrere DMS unter aktuellen thermischen Versuchsbedingungen (oder diesen so nahe wie möglich kommend) zu testen.

Abb. 1 zeigt die unterschiedlichen thermischen Ausgangssignale einer Reihe von DMS-Gitterlegierungen, geklebt auf Stahl. Die dargestellten Daten sollen lediglich illustrativen Zwecken dienen und nicht für Korrekturzwecke herangezogen werden. Besonders muss darauf hingewiesen werden, dass die Kurven für Konstantan und Karma das Verhalten dieser Legierungen im nicht-temperatur-selbstkompensierenden Zustand beschreiben. In ihrem temperatur-selbstkompensierenden Zustand (siehe **Abschnitt 2.1.2**), wie sie mit Vishay Micro-Measurements DMS eingesetzt werden, sind diese Legierungen so behandelt, dass ihr thermisches Ausgangssignal über einen für den Einsatz dieser DMS gegebenen Temperaturbereich minimiert ist.

*In dieser TechNote wird der K-Faktor des DMS, wie er auf dem der DMS-Packung beigegebenen Datenblatt angegeben ist, mit K_{DMS} bezeichnet, um ihn vom am Messinstrument eingestellten K-Faktor zu unterscheiden, der als K_I bezeichnet wird. Diese Unterscheidung ist insofern wichtig, als der am Instrument eingestellte K-Faktor aus messtechnischen Überlegungen heraus vom tatsächlichen K-Faktor des DMS verschieden sein kann.

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

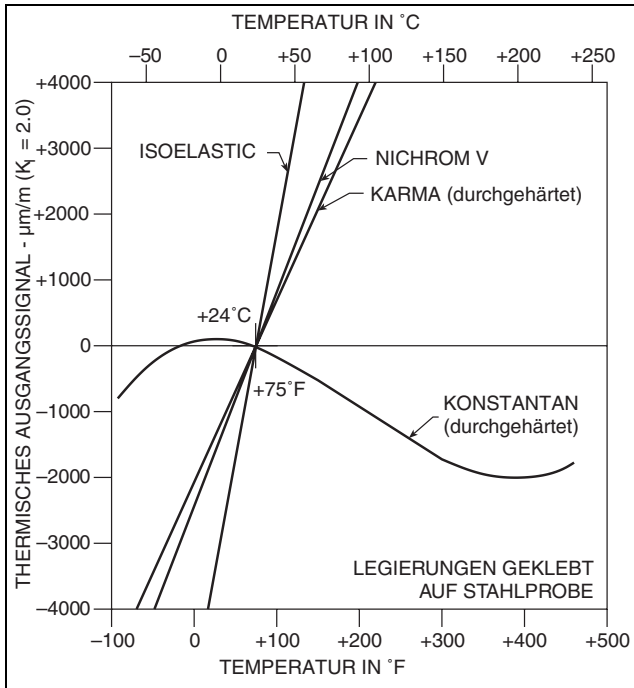


Abb. 1

Wie Abb. 1 zeigt, können die Fehler aufgrund des thermischen Ausgangssignals extrem groß werden, wenn die Temperatur stark von einer beliebigen Referenztemperatur (gewöhnlich Raumtemperatur) abweicht, welche als Bezugstemperatur für das thermische Ausgangssignal gilt. Und aus Abb. 1 wird die Notwendigkeit für Kompensationsmaßnahmen oder Korrekturen hinsichtlich des thermischen Ausgangssignals offensichtlich, wenn bei statischen Messungen Temperaturänderungen vorkommen und bestimmte Genauigkeitsansprüche gestellt werden.

In Bezug auf die letzte Aussage ist allerdings eine Bemerkung angebracht. Ist es möglich, das mit den DMS versehene Bauteil auf die der Messumgebung entsprechenden Temperatur zu bringen, es dabei von allen mechanischen und Temperaturspannungen freizuhalten und unter diesen Bedingungen die Messbrücke auf Null abzugleichen, so wird sich kein thermisches Ausgangssignal ergeben, wenn die Messung dann bei dieser eingestellten Temperatur abläuft. Mit anderen Worten: Ist ein Bauteil zwischen spannungsfreiem und belastetem Zustand keiner Temperaturänderung ausgesetzt, kann die Dehnungsmessung durchgeführt werden, ohne dass hinsichtlich des thermischen Ausgangssignals Kompensations- oder Korrekturmaßnahmen notwendig sind. Allerdings kann diese Bedingung nur äußerst selten befriedigt werden.

Auch bei dynamischen Messungen, bei denen ein stabiler Null-Referenzpunkt der Dehnung von geringer Bedeutung ist, mag das thermische Ausgangssignal ohne große messtechnische Folgen hinnehmbar sein. Schließlich ist die Fre-

quenz des dynamischen Messsignals in der Regel sehr hoch im Vergleich zur Frequenz der Temperaturänderungen, sodass beide Signale leicht trennbar sind. Liegen jedoch bei einer Messung statische und dynamische Messsignale in kombinierter Form vor, wobei der statische Signalanteil mitgemessen werden muss, ist das thermische Ausgangssignal sehr wohl in Betracht zu ziehen. Das gleiche gilt, wenn die Frequenz des dynamischen Messsignals und die Frequenz der Temperaturänderungen im gleichen Größenbereich liegen.

2.1 Kompensation des thermischen Ausgangssignals 2.1.1 Kompensations-DMS (Dummy-DMS)

Zumindest in der Theorie lässt sich das thermische Ausgangssignal durch den Einsatz eines sogenannten Kompensations-DMS komplett eliminieren. Ein DMS, der mit dem zur Dehnungsmessung benutzten "aktiven" DMS vollkommen identisch ist, wird auf ein spannungsfreies Stück Material geklebt, das wiederum mit dem Bauteilmaterial absolut identisch sein muss. Beide DMS werden in benachbarte Wheatstone-Brückenarme zur Halbbrücke verschaltet. Sie beide, der "aktive" und der Kompensations-DMS, müssen während des Nullabgleichs und während der gesamten Messzeit auf gleicher Temperatur sein. Unter diesen hypothetischen Bedingungen sollte das thermische Ausgangssignal aus beiden DMS gleich sein. Und da gleiche Widerstandsänderungen in zwei benachbarten Brückenarmen einer Wheatstone'schen Brückenschaltung den Abgleichzustand der Brücke nicht beeinträchtigen, werden sich die thermischen Ausgangssignale aus aktivem und Kompensations-DMS kompensieren, und nur das Signal aus der dehnungsabhängigen Widerstandsänderung des aktiven DMS kommt auf dem Messinstrument zur Anzeige. Dazu ist es weiter erforderlich, dass die zum aktiven und zum Kompensations-DMS führenden Kabel von gleicher Länge (widerstandsgleich) sein müssen und sie so zusammengeführt werden, dass sie auf gleicher Temperatur sind. Nur auf diese Weise werden in allen Kabeln, die schließlich Widerstandsmaterial in Wheatstone-Brückenarmen darstellen, gleiche, temperaturbedingte Widerstandsänderungen zu gewährleisten sein.

Die grundsätzlichen Probleme, denen man bei der Anwendung dieser Kompensationsmethode zu begegnen hat, liegen in den Schwierigkeiten, die sich für die Einhaltung der oben postulierten Bedingungen ergeben. Zunächst ist es manchmal sehr schwierig, die ungedehnte Materialprobe mit dem Kompensations-DMS in unmittelbarer Nähe des aktiven DMS zu platzieren und sie ungestört den Versuchsbedingungen ausgesetzt zu halten. Sicherzustellen, dass sie während der gesamten Messung unter allen Versuchsbedingungen auch wirklich ungedehnt bleibt, kann noch schwieriger sein. Die weitere Schwierigkeit liegt in der Forderung, dass die Temperatur der Materialprobe mit dem Kompensations-DMS während der Messung zu jedem Zeitpunkt gleich der Temperatur des Messobjekts mit dem aktiven

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

DMS zu sein hat. Dieses Problem wird besonders gravierend, wenn in der Testumgebung Temperaturgradienten, Temperaturübergänge oder ganz allgemein mehr oder weniger schnelle Temperaturänderungen vorkommen. Und wie weiter oben schon festgestellt, werden nicht nur die DMS entsprechend reagieren, sondern man muss ebenso mit Reaktionen der Kabel und der Brückenverdrahtungen rechnen. Schließlich muss beachtet werden, dass es zwischen zwei DMS, sogar zwei benachbarten aus einer Packung, keine hundertprozentige Identität gibt. Für die meisten statischen Messaufgaben im Raumtemperaturbereich kann zwar die Differenz der thermischen Ausgangssignale von DMS des gleichen Typs aus der gleichen Herstellungscharge als vernachlässigbar klein betrachtet werden. Aber im Bereich von Temperaturextremen kann dieser Unterschied merkliche, manchmal beträchtliche Größen annehmen. Unter solchen Umständen wird eine Punkt-für-Punkt-Korrektur des Fehlers aus dem thermischen Ausgangssignal gewöhnlich unumgänglich sein. Werden bei Messungen weit abseits von Raumtemperatur DMS eingesetzt, die nicht temperaturselbstkompensierend wirken, kann die Differenz der thermischen Ausgangssignale zwischen zwei DMS so groß sein, dass die Möglichkeit der Temperaturkompensation mittels zur Halbbrücke verschalteter und mittels Kompensations-DMS ausgeschlossen ist.

Sind die drei Identitätskriterien (Identität von aktivem und Kompensations-DMS, identische Werkstoffe und identische Temperatur erfüllt, ist die Methode der Kompensation des Temperatureingangssignals sehr effektiv. Es gibt sogar eine bestimmte Klasse von Dehnungsmessungen, für welche sich diese Art der Temperaturkompensation besonders anbietet. Dabei handelt es sich um Fälle, bei denen das Verhältnis der Dehnungsgrößen zweier nahe benachbarter (oder zumindest thermisch gleicher) Punkte auf einem Messobjekt von vornherein bekannt sind. Dazu gehören z. B. mit reiner Torsion belastete Wellen, Biegebalken, zug/druckbelastete Säulen, Membranen und dergleichen, unter der Voraussetzung natürlich, dass sie nur innerhalb ihrer Proportionalitätsgrenzen belastet werden. Bei solchen Anwendungsfällen kann der Kompensations-DMS direkt mit auf das Messobjekt appliziert werden, und zwar derart, dass er die gleiche Temperatur wie der aktive DMS erfährt, während er einer Dehnung ausgesetzt ist, die in einem bekannten Verhältnis zur Dehnung des aktiven DMS steht und, wenn möglich, von entgegengesetztem Vorzeichen ist. Diese beiden DMS, in benachbarte Brückenzweige geschaltet, funktionieren dann als aktive Halbbrücke.

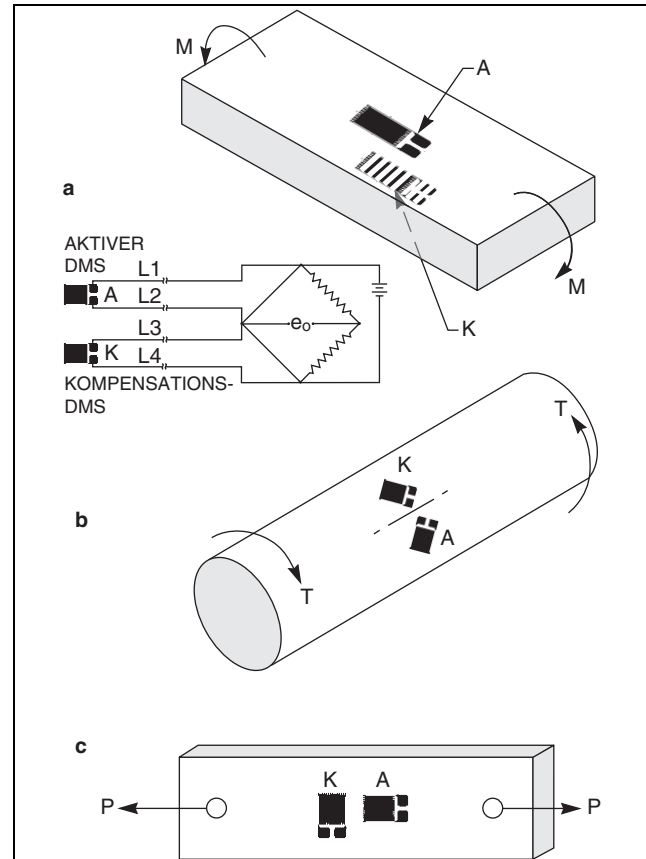


Abb. 2

Ist z. B. eine Dehnungsmessung an einem Balken unter Biegebelastung durchzuführen, der dünn genug ist, dass unter Versuchsbedingungen die Temperatur an den beiden gegenüberliegenden, parallel zur Biegeebene verlaufenden Oberflächen gleich ist, können die beiden DMS direkt gegenüberliegend installiert werden (Abb. 2a). Die so erzielte Halbbrücke wird das Temperatureingangssignal über einen relativ großen Temperaturbereich kompensieren, und sie werden gleichzeitig das Brückensignal verdoppeln, da die beiden DMS die gleiche Dehnungsgröße messen, jedoch mit jeweils entgegengesetzten Vorzeichen, Gleiches gilt für eine Welle unter reiner Torsion (Abb. 2b), bei der die beiden DMS nebeneinander und unter 45° zur Wellenlängsachse platziert werden.

Bei Dehnungsmessungen entlang einer Säulenachse oder eines Zugglieds kann der Kompensations-DMS direkt neben den aktiven DMS installiert werden, allerdings quer zur Säulenlängsachse, sodass er die Poisson'sche Querdehnung erfährt (Abb. 2c). Das Resultat ist wiederum eine Kompensation des thermischen Eingangssignals, begleitet von einer Erhöhung des Brückenausgangssignals, diesmal um den Faktor $(1 + \nu)$. Man sollte in diesem Falle allerdings bedenken, dass die Genauigkeit der Dehnungsmes-

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

sung bis zu einem gewissen Grade davon abhängt, wie genau die Poisson'sche Zahl des Bauteilmaterials bekannt ist. Der prozentuale Fehler, der sich ergeben kann, entspricht etwa $\nu/(1 + \nu)$ -mal dem prozentualen Fehler, mit dem die Poisson'sche Zahl behaftet ist. Weiter ist zu beachten, dass bei runden Säulen mit kleinen Radien oder generell, wenn in solchen Fällen die Quer-DMS auf Oberflächen mit kleinen Radien appliziert sind, ein weiterer Effekt eintritt. Hines (s. Anhang) hat gezeigt, dass sich das thermische Ausgangssignal aus DMS, die auf kleinen Radien appliziert sind, unterscheidet vom Ausgangssignal der gleichen DMS, die sich auf ebenen Oberflächen des gleichen Materials befinden.

Bei allen DMS-Anwendungen, bei denen der Kompensations-DMS mit auf das Messobjekt installiert ist, *muss also das Verhältnis der Dehnungen am aktiven DMS zur Dehnung am Kompensations-DMS mit Sicherheit bekannt sein und konstant bleiben*. Im Falle eines Biegebalkens z. B. dürfen also keine unbestimmten Axial- oder Torsionsdehnungen vorhanden ebenso darf eine Torsionswelle keinen unbestimmten Axial- oder Biegebelastungen unterworfen sein. Die Forderung, nach der das Verhältnis der aktiven Dehnung zur Dehnung am Kompensations-DMS bekannt sein muss, damit der Kompensations-DMS mit auf das Messobjekt installiert werden kann, verweist die überwiegende Mehrzahl aller Anwendungsfälle in den Bereich des Messwertaufnehmerbaus. Und natürlich wird diese Methode der Temperaturkompensation bei der Herstellung von Messwertaufnehmern auf DMS-Basis universell praktiziert. Allerdings werden dann gewöhnlich Vollbrückenschaltungen angewandt, und die DMS werden so platziert, dass eine unerwünschte Empfindlichkeit für Seitenkraft und Momente eliminiert wird.

2.1.2 Temperatur-Selbst-Kompensierende DMS

Die metallurgischen Eigenschaften bestimmter DMS-Gitterlegierungen, insbesondere Konstantan und modifizierte Karma-Legierung (Vishay Micro-Measurements Gitterlegierungen A und K), können so bearbeitet werden, dass ihr thermisches Ausgangssignal über einen großen Temperaturbereich minimiert bleibt, wenn die daraus hergestellten DMS auf Werkstoffe gedacht sind, für welche die betreffenden DMS gedacht sind. DMS, die in der Herstellung solchen Bearbeitungsprozessen unterzogen worden sind, nennt man *temperatur-selbst-kompensierend*.

Seit es temperatur-selbst-kompensierende DMS gibt, ist es in vielen Fällen nicht mehr notwendig, die Temperaturkompensation mittels der oben beschriebenen Halbbrückenschaltung aus aktivem und Kompensations-DMS zu verwirklichen. Werden DMS-Messungen bei oder um Raumtemperatur herum durchgeführt, ist die Viertelbrückenschaltung mit 3-Leiter-Verdrahtung normale Praxis geworden. Dabei wird die DMS-Viertelbrücke durch einen stabilen Fixwiderstand im benachbarten Brückenergänzt (Abb.3).

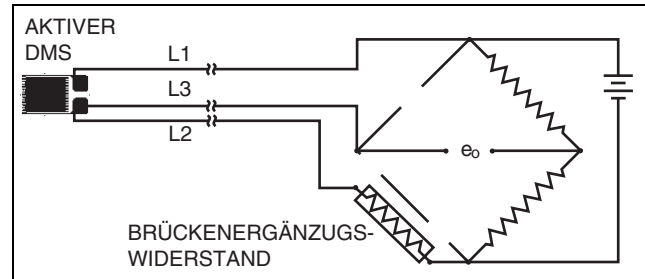


Abb. 3

Solche "Brückenergänzungswiderstände" mit einem extrem niedrigen Temperaturkoeffizienten werden von der Vishay Micro-Measurements geliefert und befinden sich heute in den meisten modernen Dehnungsmessbrücken.

Abb.4 zeigt in Diagrammform die typischen Funktionen des thermischen Ausgangssignals temperatur-selbst-kompensierender DMS mit A- und K-Gitterfolienlegierungen. Die Kurven demonstrieren, dass bei diesen DMS das thermische Ausgangssignal über einen Temperaturbereich von -20°C bis $+205^{\circ}\text{C}$ minimiert ist. Wird ein temperatur-selbst-kompensierender DMS auf einen Werkstoff geklebt, welcher den Temperaturexpansionskoeffizienten besitzt, für den der DMS gedacht ist und wird die Messung in einem Temperaturbereich durchgeführt, für den eine wirksame Temperaturkompensation besteht, ist eine Korrektur hinsichtlich des thermischen Ausgangssignals oftmals nicht nötig. Wird eine solche Korrektur unabdingbar, kann sie, wie im nächsten Abschnitt beschrieben, durchgeführt werden.

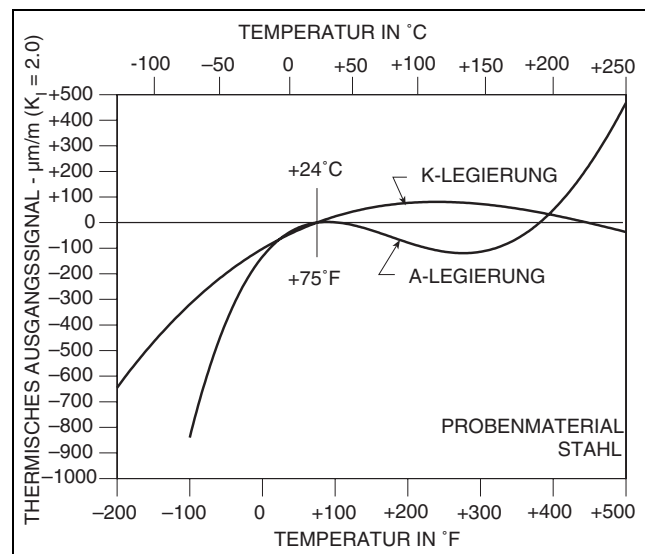


Abb. 4

Temperatur-selbst-kompensierende DMS können auch in der im **Abschnitt 2.1.1** geschilderten Weise eingesetzt werden. Wenn die Umstände so sind, dass ein Paar identischer

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

DMS in die benachbarten Zweige einer Brücke geschaltet werden, beide DMS auf dem gleichen Temperaturniveau bleiben, ein DMS ungedehnt bleibt (oder beide DMS mit unterschiedlicher Dehnung in einem bekannten Verhältnis beaufschlagt sind), kann über einen großen Temperaturbereich ausgezeichnete Temperaturkompensation erzielt werden.

Zur Identifikation der temperatur-selbst-kompensierenden DMS unserer Vishay Micro-Measurements enthält die DMS-Typenbezeichnung eine zweistellige Zahl (S-T-C-Nummer), die dem nominellen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Werkstoffs (in $10^{-6}/^{\circ}\text{F}$) entspricht, auf den der DMS appliziert wird. Das bedeutet, dass das thermische Ausgangssignal des DMS sich entsprechend der Funktion *Abb.4* verhält, wenn der DMS auf ein Material geklebt wird, dessen thermischer Ausdehnungskoeffizient durch die S-T-C-Nummer in der DMS-Typenbezeichnung definiert ist. Konstantan-DMS (A-Legierung) unserer Vishay Micro-Measurements sind mit folgenden S-T-C-Nummern verfügbar: 00, 03, 05, 06, 09, 13, 15, 18, 30, 40 und 50. Das entspricht thermischen Ausdehnungskoeffizienten in $10^{-6}/\text{K}$ von: 00; 5,4; 9; 10,8; 16,2; 23,4; 27; 32,4; 54; 72 und 90. DMS mit S-T-C-Nummern von 30 und höher sind vorzugsweise zur Anwendung auf Kunststoffmaterialien gedacht. Bei DMS mit Messgittern aus modifizierter Karma-Legierung (K-Legierung) ist der Bereich der S-T-C-Nummern etwas eingeschränkt; folgende S-T-C-Nummern liegen vor: 00, 03, 05, 06, 09, 13 und 15. Zu Referenzzwecken ist in *Tabelle 1* eine Reihe von gebräuchlichen Werkstoffen aufgelistet, mit den nominellen thermischen Ausdehnungskoeffizienten pro K sowie den jeweils entsprechenden S-T-C-Nummern, welche normalerweise für die DMS zur Anwendung auf den Materialien zu wählen wären. In der Tabelle werden außerdem diejenigen Werkstoffe identifiziert, die von uns bei der Bestimmung der entsprechenden DMS-Kennwerte eingesetzt werden.

Wird ein DMS mit einer bestimmten S-T-C-Nummer auf ein Material installiert, dessen thermischer Ausdehnungskoeffizient mit ihr nicht übereinstimmt, liegt also eine Fehlanpassung vor, so wird das die Charakteristika des in *Abb.4* gezeigten thermischen Ausgangssignals ändern. Das Resultat wird eine Rotation der Kurve des thermischen Ausgangssignals um den Raumtemperaturpunkt sein (s. dazu **Abschnitt 2.2.5**). Ist die S-T-C-Nummer niedriger als der Ausdehnungskoeffizient des Baumaterials, rotiert die Kurve entgegen dem Uhrzeigersinn; ist sie höher, rotiert die Kurve im Uhrzeigersinn. Absichtliche Fehlanpassungen werden in der messtechnischen Praxis dazu benutzt, die Kurve des thermischen Ausgangssignals so rotieren zu lassen, dass das thermische Ausgangssignal bei einer bestimmten konstanten Anwendungstemperatur, abseits von Raumtemperatur, weiter minimiert wird.

Tabelle 1
Thermischer Ausdehnungskoeffizient gebräuchlicher Werkstoffe

S-T-C-Nummer	Wärmeausdehnungskoeffizient	
	in ppm/K (0 - 100°C)	Material
00	1,4	Invar (FeNi-Legierung)
	0,5	Quarz, geschmolzen
	0,03	Titansilikat*
03	5,4	Gebrennte Tonerde (Alumina)
	4,9	Molybdän*
	4,3	Wolfram
	5,6	Zirkonium
05	9,2	Glas, Natronkalk
	9,0	Stahl, 15-7 Mo. PH.
	9,9	Stahl, 410 S.S.
	8,6	Titan, rein
	8,8	Titan, 6 AL-4V*
06	11,5	Beryllium
	12,6	Inconel, geschmiedet
	12,1	Inconel X
	10,8	Eisen, Grauguss
	13,5	Monel-Metall
	11,9	Nickel, A
	12,1	Stahl, 1008,1018*
	11,3	Stahl, 4340
	10,8	Stahl, 17-4 PH.
	10,3	Stahl, 17-7 PH.
09	16,7	Beryllium-Kupfer 25
	18,4	Phosphor-Bronze (P 10%)
	16,6	Kupfer; 99,9%+
	17,3	Stahl, 304 S.S.*
	17,4	Stahl, 310 S.S.
13	23,2	Aluminium 2024-T4*, 7075-T6
	20,0	Messing, 30-70
	22,7	Zinn, rein
15	26,1	Magnesium, AZ-31B*

* Materialien zur Bestimmung des thermischen Ausgangssignals

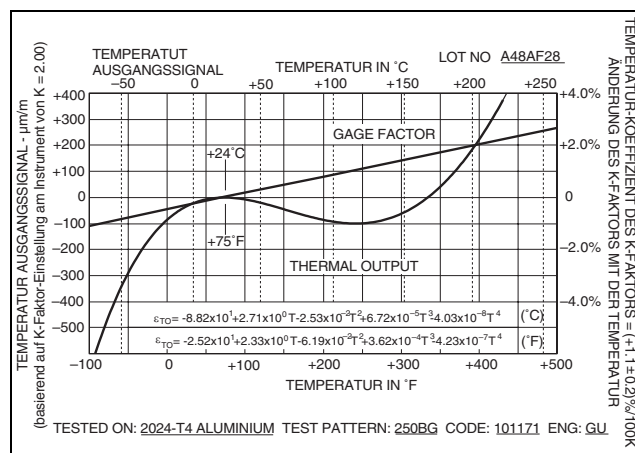


Abb. 5

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

2.2 Korrektur für das thermische Ausgangssignal

Abhängig von der vorliegenden Temperatur während einer Messung und vom Grad der verlangten Messgenauigkeit kann es manchmal notwendig werden, für das thermische Ausgangssignal zu korrigieren, obwohl temperatur-selbst-kompensierende DMS benutzt werden. Werden DMS-Messungen bei einer Temperatur durchgeführt, die sich von der Temperatur zum Zeitpunkt des Instrumenten-Nullabgleichs unterscheidet, ist die angezeigte Dehnung jedenfalls gleich der Summe der durch die Materialsplannung hervorgerufenen Dehnung plus dem thermischen Ausgangssignal des DMS (und plus dem Dehnungsäquivalent aller in der Brückenschaltung vorgekommenen Widerstandsänderungen). Mit dem, entsprechend der Gleichung (2), in Dehnungseinheiten ausgedrückten thermischen Ausgangssignal, wird einfach derart korrigiert, dass das thermische Ausgangssignal von der angezeigten Dehnung algebraisch, unter Berücksichtigung des Vorzeichens, subtrahiert wird.

Als Korrekturhilfe hinsichtlich der temperaturbedingten Eigenschaften steht dem Anwender mit jeder DMS-Packung der Vishay Micro-Measurements ein Diagramm zur Verfügung, welches das thermische Ausgangssignal über der Temperatur sowie die K-Faktor-Abhängigkeit von der Temperatur zeigt. *Abb.5* zeigt so ein typisches Diagramm für die A-Gitterlegierung (Konstantan), wie es den DMS-Packungen beigegeben ist. Zusätzlich zur grafischen Darstellung des thermischen Ausgangssignals und der K-Faktor/Temperatur-Funktion enthält das Blatt die polynomen Gleichungen (für die Celsius-und Fahrenheit-Skala) für die Funktion des thermischen Ausgangssignals. Außerdem enthält das Blatt, neben anderen Angaben, zwei weitere wichtige Informationen: 1. die Produktionschargen-Nr. (Lot-No.) der DMS und 2. das Testmaterial, mit dem die Daten des thermischen Ausgangssignals erstellt werden. Hier muss bemerkt werden, dass die Daten des so dargestellten thermischen Ausgangssignals streng genommen nur für die DMS der angegebenen Lot-No. anwendbar sind, wenn sie auf das angegebene Testmaterial appliziert sind.

2.2.1 Vereinfachte Korrektur

Eine annähernde Korrektur für das thermische Ausgangssignal kann sehr direkt und einfach durch die Anwendung des Diagramms (*Abb.5*) erzielt werden, das jeder Packung von temperatur-selbst-kompensierenden DMS beiliegt. Diese einfache Korrekturmethode basiert auf der Tatsache, dass die K-Faktoren von DMS aus A- und K-Legierung (Konstantan bzw. Karma) nahe bei 2,0 liegen, welches die standardisierte Einstellung ist, die für die Kalibrierung der DMS für das thermische Ausgangssignal benutzt wird. Die Anpassung der thermischen Ausgangsdaten für andere K-Faktor-Einstellungen, am Instrument ist in **Abschnitt 2.2.2** beschrieben.

Der erste Schritt dieser Korrekturmethode besteht darin, dass man der Kurve (*Abb.5*) den Wert des thermischen Aus-

gangssignals für die Testtemperatur entnimmt. Unter der Voraussetzung, dass der Nullabgleich der Brückenschaltung bei Raumtemperatur vorgenommen worden ist, wird jetzt der dem Diagramm entnommene Wert von dem bei Testtemperatur gemessenen Dehnungswert abgezogen, *unter Berücksichtigung aller Vorzeichen*. Der Vorgang kann analytisch so ausgedrückt werden:

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{\epsilon}^* - \epsilon_{T/A} \quad (3)$$

Es sind: $\tilde{\epsilon}^*$ = unkorrigierter Dehnungswert, wie vom Messinstrument angezeigt.

$\tilde{\epsilon}$ = teilweise korrigierter Dehnungswert, d. h. korrigiert für das thermische Ausgangssignal, aber nicht für die K-Faktor-Änderung mit der Temperatur,

$\epsilon_{T/A}$ = Temperatur-Ausgangssignal, Wert aus dem Diagramm des DMS-Datenblatts.

Beispiel: Die DMS-Messbrücke ist bei unbelastetem Bauteil und bei Raumtemperatur auf Null abgeglichen worden. Bei der Versuchstemperatur von 120°C zeigt die Dehnungsmessbrücke eine Dehnung von +2300µm/m an. Aus dem Diagramm *Abb.5*, und angenommen, dieses Diagramm war exakt das, welches dem benutzten DMS beilieg, kann man ein thermisches Ausgangssignal von -100µm/m ablesen. Entsprechend der Gleichung (3) ergibt sich somit ein korrigierter Dehnungswert von 2300 - (-100) = 2400µm/m. Wäre die angezeigte Dehnung negativ gewesen, hätte daraus eine korrigierte Dehnung von -2300 - (-100) = -2200µm/m resultiert. Wäre der Nullabgleich bei einer anderen Temperatur als Raumtemperatur vorgenommen worden, hätte man den Wert $\epsilon_{T/A}$ in Gleichung (3) die Nettodifferenz zwischen thermischem Ausgangssignal bei Abgleichtemperatur (T_1) und thermischem Ausgangssignal bei Versuchstemperatur (T_2) einsetzen müssen oder anders ausgedrückt: $\epsilon_{T/A} = \epsilon_{T/A}(T_2) - \epsilon_{T/A}(T_1)$, wobei streng auf die Vorzeichen zu achten ist.

2.2.2 Berücksichtigung des K-Faktors beim thermischen Ausgangssignal

Es sollte beachtet werden, dass bei der Bestimmung des thermischen Ausgangssignals von Konstantan-DMS (A-Legierung) und Karma-DMS (K-Legierung) am Instrument ein K-Faktor von 2,0 eingestellt ist. Ist bei Dehnungsmessungen ein anderer K-Faktor als 2,0 eingestellt, wird sich der Anteil des thermischen Ausgangssignals der angezeigten Dehnung von den Werten unterscheiden, die im Diagramm *Abb.5* zum Ausdruck kommen. Wenn die wirklichen K-Faktoren von Konstantan- oder Karma-DMS bei solchen Messungen an der Dehnungsmessbrücke eingestellt sind, wird dieser Unterschied gewöhnlich nur ein paar Prozent betragen. Eine leichte Verbesserung bezüglich der Genauigkeit der Werte des thermischen Ausgangssignals kann erreicht werden, wenn man diese wirklichen K-Fakto-

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

ren entsprechend berücksichtigt. Das kann unter Anwendung folgender einfacher Beziehung geschehen:

$$\varepsilon'_{T/A} = \varepsilon_{T/A} \frac{2,0}{K_1} \quad (4)$$

Es sind: $\varepsilon'_{T/A}$ = thermisches Ausgangssignal, angepasst an den wirklichen eingestellten K-Faktor.

$\varepsilon_{T/A}$ = thermisches Ausgangssignal aus dem Diagramm des DMS-Datenblatts.

K_1 = bei der Dehnungsmessung am Instrument eingestellter K-Faktor.

Für diesen Fall das numerische Beispiel von oben weiterführend, sei angenommen, dass der wirkliche K-Faktor eines eingesetzten DMS bei Raumtemperatur 2,10 ist und dass dieser K-Faktor auch der Einstellung am Instrument entspricht. Das diesem K-Faktor angepasste thermische Ausgangssignal wäre dann entsprechend Gleichung (4):

$$\varepsilon'_{T/A} = -100 \times \frac{2,0}{2,1} - 95 \mu\text{m/m}$$

Somit ergibt sich für die korrigierte Dehnung:

$$2300 - (-95) = 2395 \mu\text{m/m}$$

und

$$-2300 - (-95) = -2205 \mu\text{m/m}$$

Wie aus dem Diagramm *Abb.5* hervorgeht, ändert sich der K-Faktor leicht mit der Temperatur. Wird dieser Effekt in Bezug auf die gewünschte Genauigkeit für eine Dehnungsmessung relevant, kann der K-Faktor entsprechend der Temperatur zum Messzeitpunkt korrigiert werden (s. **Abschnitt 3.1**) und der so erhaltene K-Faktor am Instrument eingestellt werden. Dieser korrigierte K-Faktor wird in Gleichung (4) eingesetzt, um den Wert des thermischen Ausgangssignals entsprechend zu bestimmen. Schließlich wird dieser Wert vom angezeigten Dehnungswert algebraisch subtrahiert, sodass man letztendlich die wirkliche, durch mechanische Spannung hervorgerufene Dehnung erhält.

2.2.3 Datenerfassungsprogramme

Falls gewünscht und technisch sinnvoll, kann das Diagramm *Abb.5* derart neu erstellt werden, dass es dem wirklichen K-Faktor der eingesetzten DMS bereits angepasst ist, und zwar entweder für Raumtemperatur oder für die Temperatur während der Messung. Aus diesem neu erstellten Diagramm können dann die Werte des thermischen Ausgangssignals direkt zur Korrektur der gemessenen Dehnungswerte angewandt werden. Diese Vorgehensweise kann der Mühe wert sein, wenn mit einem DMS viele Messungen durchgeführt werden müssen oder wenn mit einer größeren Anzahl von DMS aus dem gleichen Produktions-Los bei einer Messung gemessen wird.

Für computergestützte Messungen gibt die Vishay Micro-Measurements zur Erhöhung des Messkomforts auf

den DMS-Datenblättern die nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate regressionsangepasste polynome Gleichung für die Funktion des thermischen Ausgangssignals an. Damit kann der Computer eine automatische Korrektur der Messwerte durchführen. Das Polynom steht in der folgenden Form:

$$\varepsilon_{T/A} = A_0 + A_1T + A_2T^2 + A_3T^3 + A_4T^4 \quad (5)$$

wobei: T = Temperatur.

Im Diagramm *Abb.5* ist das Polynom (für die Fahrenheit- und Celsius-Skala) enthalten. Wird es nicht angegeben, können die Koeffizienten A_i von der Vishay Micro-Measurements abgerufen werden, wobei die Lot-No. (Produktions-Los) angegeben werden muss.

Es muss beachtet werden, dass dieses regressionsangepasste Polynom, ebenso wie die Daten, von denen es abgeleitet ist, auf einem am Instrument eingestellten K-Faktor von 2,0 beruht. Um größte Korrekturgenaugigkeit zu erlangen, müssen die thermischen Ausgangssignalwerte, die mit dem Polynom errechnet werden, dem tatsächlich am Instrument eingestellten K-Faktor angepasst werden, falls dieser anders als 2,0 ist. Als Alternative können die Koeffizienten A_i mit $2,0/K_1$ multipliziert werden, wobei K_1 der am Instrument eingestellte K-Faktor der DMS ist, die bei der Messung eingesetzt werden. Auch darf nicht übersehen werden, dass die auf den DMS-Datenblättern angegebenen Daten und Gleichungen für das thermische Ausgangssignal streng genommen *nur* für die DMS des angegebenen Produktions-Loses gelten und *nur* für den Werkstoff, auf dem für diese DMS diese Daten erstellt worden sind.

2.2.4 Genauigkeit und praktische Anwendbarkeit - Messen des thermischen Ausgangssignals

Es gibt Grenzen dafür, inwieweit es praktisch ist, die vom DMS-Hersteller angegebenen Daten des thermischen Ausgangssignals einer konkreten Situation anzupassen, um höhere Messgenauigkeit zu erlangen. Zuerst einmal repräsentiert die Kurve des thermischen Ausgangssignals (oder das Polynom) auf dem DMS-Datenblatt Mittelwerte, da die Daten von DMS zu DMS innerhalb eines Produktions-Loses leicht unterschiedlich sind. Und die Breite dieses Streubandes wird größer, je weiter sich die Messtemperatur von der Raumtemperatur als Referenz entfernt. Diese Breitenänderung des Streubandes verhält sich ungefähr linear, zumindest was den Temperaturbereich 0°C bis +175°C anbelangt, für den Streudaten vorliegen. Bei einer statistischen Sicherheit von 2σ (entsprechend 95%) liegt die Streubreite bei $\pm 0,27 \mu\text{m/m/K}$ für die A-Legierung (Konstantan) und bei $\pm 0,45 \mu\text{m/m/K}$ für die K-Legierung (Karma). Das bedeutet, dass z. B. bei einer Temperatur von +135°C die 2σ -Streubreite für A-Legierung $\pm 30 \mu\text{m/m}$ ist und für K-Legierung $\pm 50 \mu\text{m/m}$.

Weiter ist zu bedenken, dass die Daten des thermischen Ausgangssignals notwendigerweise auf einem bestimmten

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

Werkstoff einer bestimmten Produktionscharge erstellt worden sind (s. *Tabelle 1*). Andere Werkstoffe mit gleichem oder nur leicht unterschiedlichem Ausdehnungskoeffizienten können sich hinsichtlich ihrer thermischen Ausdehnungscharakteristika signifikant anders verhalten, und das gilt sogar für unterschiedliche Produktionschargen des gleichen Werkstoffs.

Aus den obigen Betrachtungen ergibt sich, dass es für die bestmögliche Korrektur des thermischen Ausgangssignals eigentlich notwendig ist, dieses Signal mit dem für eine gedachte Messung wirklich eingesetzten DMS auf dem wirklichen Messobjekt zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird in unmittelbarer Nachbarschaft zum DMS ein Thermoelement oder Widerstands-Temperatursensor installiert, um die Temperatur jederzeit einwandfrei bestimmen zu können. Dann wird der DMS an eine Dehnungsmessbrücke angeschlossen, welche bei mechanisch unbelastetem Messobjekt für den Dehnungszustand Null auf Null abgeglichen wird. Nun wird das Messobjekt der Versuchstemperatur ausgesetzt, und die Temperatur sowie die angezeigte Dehnung werden immer zum Zeitpunkt des *thermischen Gleichgewichts* registriert, natürlich immer unter der Bedingung, dass das Messobjekt mechanisch unbelastet bleibt. Bleibt das Messobjekt während des ganzen Prozesses frei von mechanischen und *thermischen* Spannungen, wird die resultierende Dehnungsanzeige bei jeder Temperatur dem thermischen Ausgangssignal des DMS bei dieser Temperatur entsprechen. Bleibt während der folgenden Dehnungsmessungen die K-Faktor-Einstellung am Instrument die gleiche wie bei der Bestimmung des thermischen Ausgangssignals, kann dieses Signal für jede Versuchstemperatur von der angezeigten Dehnung algebraisch subtrahiert werden, um die korrigierte Dehnung zu erhalten. Ansonsten müssen für eventuelle Differenzen der K-Faktor-Einstellungen die Daten des thermischen Ausgangssignals vor der Subtraktion, entsprechend der in Abschnitt 2.2.2 dargestellten Vorgangsweise, angepasst werden.

Um Korrekturen für das thermische Ausgangssignal der DMS in der beschriebenen Weise vornehmen zu können, ist es natürlich notwendig, jeweils zum Zeitpunkt der Dehnungsmessung auch eine begleitende Temperaturmessung durchzuführen. Der Hauptnachteil dieser Prozedur liegt darin, dass für einen DMS immer zwei Kanäle des Instruments belegt sind, einer für den DMS selbst und der zweite für das Thermoelement bzw. den Widerstands-Temperatursensor.

2.2.5 Fehlanpassung der S-T-C-Nummer

Wird ein DMS auf einem Werkstoff eingesetzt, der sich von dem Werkstoff, auf dem der Hersteller die Daten des thermischen Ausgangssignals bestimmt hat, unterscheidet, liegt eine Fehlanpassung der S-T-C-Nummer vor. In solchen Fällen wird sich die Kurve des thermischen Ausgangssignals von der auf dem Datenblatt der DMS dargestellten unterscheiden. Nehmen wir an, ein DMS mit der S-T-C-Nummer

06 würde auf Monel-Metall eingesetzt. Die Daten des thermischen Ausgangssignals dieses DMS sind auf 1018-Stahl erstellt worden (s. *Tabelle 1*). Die Charakteristika der thermischen Ausdehnung von Monel unterscheiden sich leicht von denen des 1018-Stahls. Sollen also Dehnungsmessungen mit bestmöglicher Genauigkeit vorgenommen werden, müssen, wie in **Abschnitt 2.2.4** beschrieben, die Charakteristika des thermischen Ausgangssignals des auf Monel geklebten DMS über den gesamten Temperaturbereich der Dehnungsmessung bestimmt werden. Entfernt man sich bei der Dehnungsmessung nicht weit von Raumtemperatur, wird der Effekt aus der Differenz der Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten zwischen Monel und 1018-Stahl ohne große Bedeutung sein und gewöhnlich ignoriert werden können.

Wenn aber andererseits der Unterschied zwischen thermischen Ausdehnungseigenschaften des Materials, mit dem das thermische Ausgangssignal des DMS ermittelt worden ist, und dem Material des Messobjekts groß ist, kann das Diagramm des thermischen Ausgangssignals auf dem DMS-Datenblatt nicht unmittelbar für Korrekturen herangezogen werden. Typische Beispiele für solche Fälle wären Konstantan-DMS mit den S-T-C-Nummern 30, 40 und 50. Diese DMS werden hauptsächlich für Dehnungsmessungen auf Plastikwerkstoffen mit hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten eingesetzt. Die thermischen Eigenschaften (und andere) dieser Werkstoffe variieren jedoch wegen Formulierungsunterschieden von einer Produktionscharge zur anderen erheblich, und sie unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller noch mehr, obwohl nominell das gleiche Material vorliegt. Diese Tatsache, zusammen mit der generellen Instabilität der Eigenschaften von Plastikwerkstoffen mit der Zeit, der Temperatur, der Feuchtigkeit, etc. führt zu der Situation, dass keine Plastikwerkstoffe zur Verfügung stehen, die eine direkte Messung des thermischen Ausgangssignals von DMS mit S-T-C-Nummern von 30 und höher zulassen. Als eine zugegebenermaßen weniger als befriedigende Alternative werden die thermischen Ausgangssignale, welche für diese DMS angegeben werden, auf 1018-Stahl gemessen, und zwar eben wegen der Stabilität und Reproduzierbarkeit dieses Werkstoffs.

Folgend aus dem eben Gesagten, ist es immer empfehlenswert, das thermische Ausgangssignal aus DMS mit S-T-C-Nummern von 30 bis 50 erst experimentell auf dem Messobjekt zu bestimmen, wenn Dehnungsmessungen auf Plastikwerkstoffen bei Temperaturen durchgeführt werden sollen, die abseits der Temperatur liegen, bei welcher der Instrumentenabgleich vorgenommen worden ist. Dabei geht man nach der in **Abschnitt 2.2.4** beschriebenen Weise vor und benutzt dann die so erlangten Daten, um die Korrekturen durch algebraisches Subtrahieren von der gemessenen Dehnung vorzunehmen.

Die thermischen Ausgangssignaldaten von DMS mit den

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

S-T-C-Nummern 30, 40 oder 50 auf Plastikmaterialien (oder beliebigen anderen Werkstoffen) mit konstanten Ausdehnungskoeffizienten können in erster Näherung rasch bestimmt werden, indem man die uhrzeigersinnweise Drehung der entsprechenden Funktionskurve, die entsteht, wenn solch ein DMS auf Stahl geklebt ist, zurückdreht. Es sei beispielsweise angenommen, dass ein DMS mit der S-T-C-Nummer 30 auf ein Kunststoffmaterial geklebt wird, das einen linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $63 \times 10^{-6}/K$ hat. Es sei weiter davon ausgegangen, dass der Ausdehnungskoeffizient von 1018-Stahl über den gleichen Temperaturbereich konstant bei $12,1 \times 10^{-6}/K$ liegt. Ist an der Dehnungsmessbrücke ein K-Faktor des benutzten DMS eingestellt, also $K_1 = K_{DMS}$ und unter Beachtung der Tatsache, dass das Verhältnis $(1 + k_t)/(1 - \nu_0 k_t)$ für Konstantan-DMS normalerweise nahe 1 liegt, kann Gleichung (2) in vereinfachter Form für eine Näherungslösung so geschrieben werden:

$$\varepsilon_{T/A} = \left(\frac{\beta_{DMS}}{K_{DMS}} - \alpha_{DMS} \right) \Delta T + \alpha_S \Delta T \quad (6)$$

Speziell auf Werkstoffe mit den Ausdehnungskoeffizienten 12,1 und $63 \times 10^{-6}/K$ angewandt, wird aus der Gleichung (6):

$$\varepsilon_{T/A(12,1)} = \left(\frac{\beta_{DMS}}{K_{DMS}} - \alpha_{DMS} \right) \Delta T + 12,1 \Delta T \quad (7a)$$

und

$$\varepsilon_{T/A(63)} = \left(\frac{\beta_{DMS}}{K_{DMS}} - \alpha_{DMS} \right) \Delta T + 63 \Delta T \quad (7b)$$

Löst man Gleichung (7a) nach $\left(\frac{\beta_{DMS}}{K_{DMS}} - \alpha_{DMS} \right) \Delta T$,

und setzt in Gleichung (7b) ein, erhält man:

$$\varepsilon_{T/A(63)} = \varepsilon_{T/A(12,1)} + (63 - 12,1) \Delta T \quad (8)$$

In Worten ausgedrückt bedeutet die Gleichung (8) weiter nichts als folgendes: Ist ein DMS mit der S-T-C-Nummer 30 auf ein Material mit dem Ausdehnungskoeffizienten $63 \times 10^{-6}/K$ geklebt, kann seine auf 1018-Stahl erstellte Kurve des thermischen Ausgangssignals konvertiert werden in die Kurve des thermischen Ausgangssignals, die sich für den gleichen DMS auf einem Material mit dem Ausdehnungskoeffizienten $63 \times 10^{-6}/K$ ergibt, und zwar dergestalt, dass man zu der Originalkurve das Produkt der Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten und der Temperaturabweichung von Raumtemperatur addiert, wobei das Vorzeichen der Temperaturabweichung immer sorgfältig beachtet werden muss.

Abb.6 zeigt die Kurve des thermischen Ausgangssignals für einen DMS mit der S-T-C-Nummer 30, wie sie ursprünglich auf einer 1018-Stahl-Probe erstellt worden ist und zwar gedreht entgegen dem Uhrzeigersinn, um so dem Signal zu

entsprechen, welches sich ergibt, wenn der DMS auf ein Kunststoffmaterial mit dem Ausdehnungskoeffizienten 63×10^{-6} geklebt gewesen wäre.

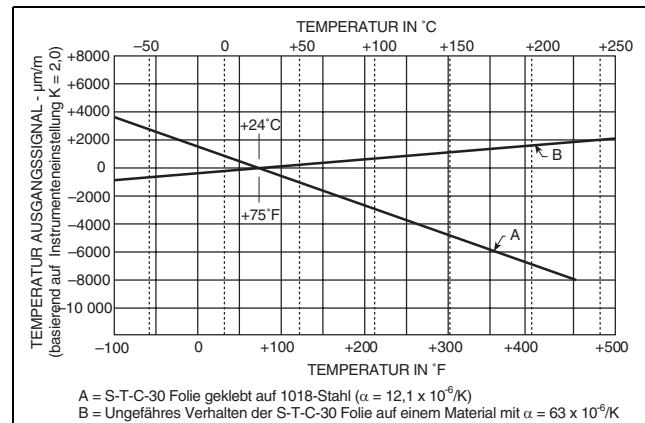


Abb. 6

Die gerade geschilderte Vorgehensweise ist recht allgemein und kann angewandt werden, um den Effekt ungefähr vorauszusagen, der entsteht, wenn ein Unterschied der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen dem Material, auf dem das thermische Ausgangssignal eines DMS für das Datenblatt bestimmt worden ist und dem Material, auf das er für eine Dehnungsmessung geklebt werden soll, vorliegt. Obwohl allgemein anwendbar, hat diese Prozedur jedoch hinsichtlich erzielbarer Genauigkeiten ihre Grenzen, da die für Gleichung (6) benötigten Ausdehnungskoeffizienten in Bezug auf die meisten Werkstoffe selbst eine Funktion der Temperatur sind.

Eine weitere Genauigkeitsbegrenzung kann sich ergeben, wenn Dehnung auf Plastikmaterialien oder generell auf Werkstoffen mit schlechter Wärmeleitfähigkeit gemessen werden soll. Wird während der Messung durch einen Selbsterwärmungseffekt die Temperatur des DMS beträchtlich höher als die Temperatur des Probenmaterials, können die Daten des thermischen Ausgangssignals, die auf dem DMS-Datenblatt angegeben sind, nicht mehr sinnvoll angewandt werden.

Es sollte nicht vergessen werden, dass die oben geschilderte Vorgehensweise bestenfalls eine grobe Näherung des thermischen Ausgangssignals ergeben kann, wenn der Ausdehnungskoeffizient des Probenmaterials und die gewählte S-T-C-Nummer des DMS nicht übereinstimmen. Ist eine genaue Korrektur für das thermische Ausgangssignal von DMS erwünscht, wird eine direkte Messung, wie sie in **Abschnitt 2.2.4** beschrieben wird, angelegentlich empfohlen.

3.0 K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

Die für die Herstellung von DMS eingesetzten Gitterlegierungen zeigen typischerweise eine Abhängigkeit ihres K-Faktors von der Temperatur. In manchen Fällen ist der

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

Fehler klein, der auf diesen Effekt zurückzuführen ist, und er kann ignoriert werden. In anderen Fällen mag, abhängig von der vorliegenden Gitterlegierung, der Versuchstemperatur und der verlangten Messgenauigkeit, eine Korrektur für die K-Faktor-Änderung mit der Temperatur notwendig werden.

Abb. 7 zeigt eine grafische Darstellung der K-Faktor-Änderung mit der Temperatur für Konstantan und Isoelastic-Legierung (Vishay Micro-Measurements Gitterlegierungen A bzw. D). Daraus ist ersichtlich, dass der Effekt bei Konstantan in jedem Temperaturbereich eigentlich klein ist, weniger als 2%/100K beträgt und in einem Temperaturbereich von z. B. ±50K in vielen Fällen vernachlässigbar ist. In extremeren Fällen und wenn von Genauigkeitsanforderungen gerechtfertigt, kann entsprechend der Darstellung in **Abschnitt 3.1** korrigiert oder die Korrektur mit der Korrektur für das thermische Ausgangssignal kombiniert werden (**Abschnitt 4.0**).

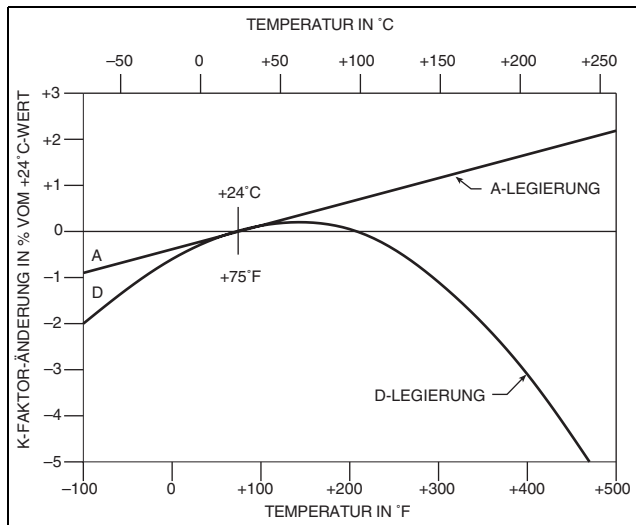


Abb. 7

Während sich der K-Faktor der Isoelastic-Legierung zwischen Raumtemperatur und etwa 100°C nur in bescheidenem Maße ändert und dort die Funktion flach verläuft, wird sie außerhalb dieses Bereichs merklich steiler. Aber selbst in Temperaturbereichen, innerhalb derer die Änderung mehrere Prozent ausmacht, muss eine Korrektur nicht unbedingt oder praktisch sein, da DMS mit Isoelastic-Gitterlegierung in der Regel nur für dynamische Dehnungsmessungen eingesetzt werden, und unter diesen Bedingungen können andere Fehler im Messsystem den K-Faktor/Temperatur-Effekt vergleichsweise bedeutungslos machen.

Dass die K-Faktor-Änderung mit der Temperatur bei der Karma-Gitterlegierung (Legierung K) sich von der bei den Legierungen A und D beobachteten wesentlich unterscheidet, wird in **Abb. 8** gezeigt. Die K-Faktor-Änderung verläuft fast linear, wie bei Konstantan (Legierung A), allerdings

mit negativer Steigung, und außerdem ist sie eine Funktion der S-T-C-Nummer; sie verläuft steiler mit steigender S-T-C-Nummer.

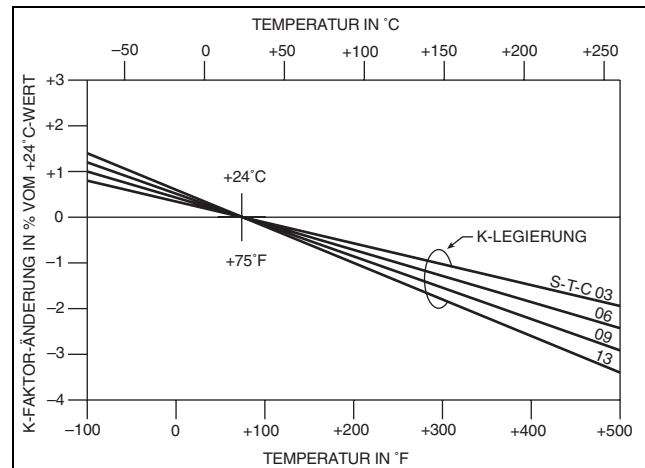


Abb. 8

3.1 Korrektur der Dehnungsmessung für die K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

Der K-Faktor einer Produktions-Charge jedes beliebigen DMS-Typs wird vom Hersteller standardmäßig bei Raumtemperatur bestimmt. Es ist dies der K-Faktor-Wert, den der Anwender auf dem Datenblatt der gelieferten DMS findet. Also ist bei jeder von Raumtemperatur abweichenden Temperatur mit einem unterschiedlichen K-Faktor zu rechnen, und es mögen, je nach Umständen, entsprechende Korrekturen notwendig werden. Auf dem DMS-Datenblatt befindet sich aber auch ein Diagramm der K-Faktor-Änderung mit der Temperatur wie in **Abb. 7** und **Abb. 8** dargestellt. Mehr als diese Information wird für die Durchführung von Korrekturen nicht benötigt.

Im Allgemeinen können Dehnungsmesswerte für jeden K-Faktor mittels einfacher Beziehung korrigiert (oder angepasst) werden. Es sei z. B. die Dehnung ε_1 mit einer K-Faktor-Einstellung am Instrument von K_1 gemessen worden, und es wird eine Korrektur des Wertes für einen anzuwendenden K-Faktor K_2 gewünscht. Die korrigierte Dehnung ε_2 berechnet sich dann zu:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \times \frac{K_1}{K_2} \quad (9)$$

Es wird also für K_1 der auf dem DMS-Datenblatt angegebene K-Faktor für Raumtemperatur herangezogen, der auf dem Messinstrument eingestellt war, und K_2 ist der für die Messtemperatur tatsächlich in Frage kommende K-Faktor. Natürlich kann man den K-Faktor K_2 von vornherein am Instrument einstellen, wenn die Messtemperatur mit hinreichender Sicherheit bekannt ist, womit dann keine Korrektur mehr notwendig wäre. Werden allerdings in solchen Fällen Korrekturen für das thermische Ausgangssignal der DMS

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

mithilfe des Diagramms oder des Polynoms vorgenommen, ist zu beachten, dass diese thermischen Ausgangssignaldaten auch für den neuen K-Faktor K_2 angepasst oder korrigiert werden müssen, da ja den Angaben auf dem Datenblatt ein K-Faktor von 2,0 (mit dem die Temperatur-Ausgangsdaten vom Hersteller ermittelt wurden) zugrunde liegt.

Indem man die auf dem DMS-Datenblatt angegebenen Informationen benutzt, wird folgende Beziehung zur Bestimmung des K-Faktors bei Messtemperatur angewandt:

$$K_2 = K_1 \left(1 + \frac{\Delta K(\%)}{100} \right) \quad (10)$$

Es ist: $\Delta K(\%)$ = Prozentuale Änderung des K-Faktors mit der Temperatur wie in *Abb. 7* und *Abb. 8* dargestellt. (**Achtung:** Das Vorzeichen der Änderung muss immer in die Rechnung eingehen).

Hier ein numerisches Beispiel: Ein Karma-DMS (K-Legierung) mit der S-T-C-Nummer 13 hat einen K-Faktor bei Raumtemperatur von 2,05 (vom DMS-Datenblatt), und dieser Wert wird vor der Messung am Instrument eingestellt. Die Messung findet bei 230°C statt, und die Dehnungsanzeige ist 1820 $\mu\text{m}/\text{m}$. Aus *Abb. 8* ergibt sich bei den genannten Daten ein ΔK von -3% und entsprechend Gleichung (10):

$$K_2 = 2,05(1 - 0,03) = 1,99$$

Setzt man diesen neuen K-Faktor K_2 in Gleichung (9) ein, erhält man den korrigierten Dehnungswert:

$$\varepsilon_2 = 1820 \frac{2,05}{1,99} = 1875 \mu\text{m}/\text{m}$$

Da die K-Faktor-Änderung mit der Temperatur Einfluss sowohl auf das thermische Ausgangssignal des DMS als auch auf den zu messenden Dehnungswert hat, und um Verwirrung zu vermeiden, wenn beide Korrekturen getrennt durchgeführt und dann erst kombiniert werden, zeigt der folgende Abschnitt Wege auf, wie man beide Korrekturen gleichzeitig, in einem Schritt vornehmen kann.

4.0 Gleichzeitige Korrektur für das thermische Ausgangssignal aus DMS und der K-Faktor-Änderung

In diesem Abschnitt werden Beziehungen gegeben, die es ermöglichen, gemessene Dehnungswerte gleichzeitig für das thermische Ausgangssignal aus DMS und der K-Faktor-Änderung mit der Temperatur zu korrigieren. Die Form, die diese Beziehungen annehmen können, hängt von den Messumständen ab, aber im Wesentlichen davon, welcher K-Faktor am Instrument eingestellt war und bei welcher Temperatur am DMS der Brücken-Nullabgleich des Instruments vorgenommen wurde.

Der K-Faktor kann am Instrument (Dehnungsmessbrücke) prinzipiell auf jeden beliebigen Wert eingestellt werden, den der Einstellbereich zulässt. In der Regel wird jedoch einer der drei folgenden Werte eingestellt werden¹⁾:

1. K-Faktor K^* . Das ist der K-Faktor, mit dem vom DMS-Hersteller werksseitig das thermische Ausgangssignal der DMS bestimmt wird ($K^* = 2,0$).
2. Der K-Faktor bei Raumtemperatur der eingesetzten DMS, wie er auf dem DMS-Datenblatt angegeben ist.
3. Der K-Faktor, der für die eingesetzten DMS bei der Messtemperatur oder jeder anderen beliebigen Temperatur abseits von Raumtemperatur gilt.

Kein einzelner K-Faktor kann der Situation voll gerecht werden, aber von den drei genannten Einstellvarianten wird die erste Alternative im Allgemeinen zur einfachsten Form einer Korrekturbeziehung führen. Deswegen erfordert die hier entwickelte Vorgehensweise, dass am Messinstrument der K-Faktor $K_1 = K^* = 2,0$ eingestellt wird. Also der K-Faktor, mit dem herstellereitig die Daten des thermischen Ausgangssignals der DMS aufgezeichnet werden.

In ähnlicher Weise kann an der Dehnungsmessbrücke der Brücken-Nullabgleich bei verschiedenen möglichen DMS-Temperaturen durchgeführt werden:

1. Bei Raumtemperatur.
2. Bei Versuchstemperatur, also der Temperatur zum Zeitpunkt der Dehnungsmessung.
3. Bei einer beliebigen Temperatur ungleich der Versuchstemperatur oder der Raumtemperatur.

Die zweite und dritte Variante können für sinnvolle Dehnungsmessungen nur dann gewählt werden, wenn sichergestellt ist, dass das Messobjekt bei der Abgleichtemperatur absolut frei ist von thermischen und mechanischen Spannungen. Da diese Bedingung gewöhnlich nur schwer oder überhaupt nicht erfüllbar sein wird, ist die erste Alternative vorzuziehen, und sie wird deswegen für die folgende Prozedur herangezogen.

Eine Dehnungsmessbrücke ist beispielsweise zu dem Zeitpunkt auf Null abgeglichen worden, zu dem der angeschlossene DMS auf Raumtemperatur war. Als K-Faktor war K^* eingestellt, also der, welcher beim Hersteller zur Bestimmung des thermischen Ausgangssignals der DMS benutzt wird. Es wird weiter angenommen, dass entsprechend dieser Einstellungen bei einer von Raumtemperatur abweichenden Versuchstemperatur T_1 eine Dehnung $\tilde{\varepsilon}_1^*$ angezeigt worden ist. Diese angezeigte Dehnung $\tilde{\varepsilon}_1^*$ ist nun mit einem Fehler sowohl aus dem thermischen Ausgangssignal des DMS behaftet als auch mit einem Fehler aus der K-Faktor-Änderung mit der Temperatur, deswegen die Tilde mit Stern über dem Dehnungssymbol.

¹⁾ Der am Instrument eingestellte K-Faktor sollte während der Messung (nach dem Brückenabgleich) nicht geändert werden, da dies eine Nullpunktverschiebung zur Folge haben kann.

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

Zuerst sei die Korrektur für das thermische Ausgangssignal betrachtet. Da die K-Faktor-Einstellung am Messinstrument mit derjenigen übereinstimmt, die zur Messung des thermischen Ausgangssignals benutzt worden ist, kann die Korrektur einfach dergestalt durchgeführt werden, dass man den für die Temperatur T_1 vorliegenden thermischen Ausgangssignalwert aus dem Diagramm des DMS-Datenblatts entnimmt und vom angezeigten Dehnungswert subtrahiert. Also:

$$\tilde{\varepsilon}_1 = \tilde{\varepsilon}_1^* - \varepsilon_{T/A}(T_1)$$

Es sind: $\tilde{\varepsilon}_1^*$ = Angezeigte Dehnung, ohne Korrektur für thermisches Ausgangssignal und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur.

$\tilde{\varepsilon}_1$ = Teilkorrigierte Dehnung; z. B. nur korrigiert für das thermische Ausgangssignal.

$\varepsilon_{T/A}(T_1)$ = Thermisches Ausgangssignal bei Temperatur T_1 (Funktions-Notation wird angewandt, um doppelte oder dreifache Indizierung zu vermeiden).

Als nächstes kommt die Korrektur für die K-Faktor-Änderung mit der Temperatur. Da die Dehnungsmessung mit einer K-Faktor-Einstellung K^* unternommen worden ist, wird, um den für den Zeitpunkt der Messung bei der Temperatur T_1 gültigen K-Faktor zur Anwendung zu bringen, mit der Gleichung (9) wie folgt korrigiert:

$$\varepsilon_1 = \tilde{\varepsilon}_1 \frac{K^*}{K(T_1)}$$

Es sind: ε_1 = Dehnungsgröße, korrigiert sowohl für das thermische Ausgangssignal als auch für die K-Faktor-Änderung mit der Temperatur.

$K(T_1)$ = K-Faktor bei Versuchstemperatur.

Die Kombination beider Korrekturen ergibt:

$$\varepsilon_1 = [\tilde{\varepsilon}_1^* - \varepsilon_{T/A}(T_1)] \frac{K^*}{K(T_1)} \quad (11)$$

Sind die vorgeschriebenen Bedingungen für die K-Faktor-Einstellung und die Temperatur für den Zeitpunkt des Brücken-Nullabgleichs erfüllt worden, ist die mit der Gleichung (11) errechnete Dehnung ε_1 die tatsächliche Dehnung, die im Messobjekt bei der Versuchstemperatur T_1 durch mechanische und/oder thermische Spannungen hervorgerufen worden ist. Hier ein numerisches Beispiel für die Anwendung der Gleichung (11):

DMS-Typ: WK-06-250BG-350

Werkstoff des Messobjekts: Stahl

K-Faktor des DMS bei Raumtemperatur (vom DMS-Datenblatt): 2,07

Versuchstemperatur: $-45\text{ }^\circ\text{C}$

ε_1 , angezeigte Dehnung bei Versuchstemperatur, (mit K-Faktor-Einstellung am Instrument K^*): $-1850\text{ }\mu\text{m/m}$

$\varepsilon_{T/A}(T_1)$, thermisches Ausgangssignal des DMS bei Versuchstemperatur (vom DMS-Datenblatt): $-200\text{ }\mu\text{m/m}$

Abweichung des K-Faktors bei Versuchstemperatur vom K-Faktor bei Raumtemperatur (vom DMS-Datenblatt): $+0,6\%$

Zuerst wird mithilfe der Gleichung (10) $K(T_1)$ ermittelt, der K-Faktor des DMS bei Versuchstemperatur:

$$K(T_1) = K_0 \left(1 + \frac{0,6}{100} \right) = 2,07 \times 1,006$$

$$K(T_1) = 2,08$$

Der ermittelte Wert von $K(T_1)$ wird in Gleichung (11) eingesetzt (wobei $K^* = 2,0$):

$$\varepsilon_1 = \frac{[-1850 - (-200)] \cdot 2,0}{2,08} = -1587\text{ }\mu\text{m/m}$$

Als letztes sei das Praxisbeispiel eines DMS-instrumentierten Radialverdichters angeführt, welches ein wenig komplexer erscheinen mag. Der Verdichter soll zuerst mit der Drehzahl N_1 arbeiten, bei der sich an der DMS-Installation eine Temperatur T_1 einstellt. Unter diesen Bedingungen ist die angezeigte Dehnung $\tilde{\varepsilon}_1^*$. Jetzt wird die Drehzahl auf N_2 erhöht, womit sich am DMS die Temperatur T_2 ergibt, woraus wiederum die Dehnung $\tilde{\varepsilon}_2^*$ resultiert. Es soll die spannungsbedingte Dehnungsänderung bestimmt werden, die von der Drehzahländerung von N_1 auf N_2 hervorgerufen wird.

In der Tat liegt hier kein schwierigeres Problem als beim ersten Beispiel vor. Man wendet einfach Gleichung (11) für jede der beiden Drehzahlbedingungen an:

$$\varepsilon_1 = [\tilde{\varepsilon}_1^* - \varepsilon_{T/A}(T_1)] \frac{K^*}{K(T_1)}$$

$$\varepsilon_2 = [\tilde{\varepsilon}_2^* - \varepsilon_{T/A}(T_2)] \frac{K^*}{K(T_2)}$$

und subtrahiert die Ergebnisse ($\varepsilon_2 - \varepsilon_1$) um die Änderung der spannungsinduzierten Dehnung, die sich zwischen Drehzahl N_1 und N_2 ergibt, zu ermitteln. Die Subtraktion kann natürlich auch algebraisch durchgeführt werden, um für die Berechnung der Dehnungsänderung mit nur einer einzigen Gleichung arbeiten zu können:

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = K^* \left[\frac{\tilde{\varepsilon}_2^* - \varepsilon_{T/A}(T_2)}{K(T_2)} - \frac{\tilde{\varepsilon}_1^* - \varepsilon_{T/A}(T_1)}{K(T_1)} \right]$$

Bei computergestützter Datenauswertung können für die Funktionen $\varepsilon_{T/A}(T)$ und $K(T)$ analytische Ausdrücke ins Auswertprogramm eingeführt werden, um eine direkte Berechnung korrigierter Dehnungswerte aus angezeigten Dehnungswerten zu ermöglichen.

Anhang

Der Einfluss gekrümmter Oberflächen auf das thermische Ausgangssignal von DMS

FRANK F. HINES hat dargestellt¹⁾, dass sich bei DMS-Installationen auf eng gekrümmten Oberflächen im Vergleich zur Installation auf ebenen Flächen Änderungen des thermischen Ausgangssignals aus DMS ergeben. Diese durch die Oberflächenkrümmung hervorgerufene *Änderung* des thermischen Ausgangssignals, hier als *inkrementelles* thermisches Ausgangssignal bezeichnet, ergibt sich aus der Tatsache, dass das eigentliche dehnungsmessende Element des DMS, das Messgitter, sich in einem Abstand von der Oberfläche des Messobjekts befindet, der durch die Dicke der Kleberschicht und der DMS-Trägerfolie definiert ist. Es kann gezeigt werden, dass unter dieser Bedingung eine Temperaturänderung im DMS-Messgitter eine andere Dehnung hervorruft als das der Fall wäre, wenn der DMS auf einer ebenen Fläche installiert wäre. Das Ergebnis ist ein anderes thermisches Ausgangssignal, als es auf dem DMS-Datenblatt angegeben ist.

Das durch Oberflächenkrümmung entstehende inkrementelle thermische Ausgangssignal aus DMS ist ein Effekt zweiter Ordnung, der gewöhnlich ignoriert werden kann. Handelt es sich jedoch um Krümmungen mit sehr kleinen Radien, kann der Effekt erhebliche Ausmaße annehmen. Als Faustregel kann man unterstellen, dass das inkrementelle thermische Ausgangssignal bei Krümmungsradien über 13mm vernachlässigbar ist. Bei Radien, die wesentlich kleiner als der genannte sind, können Korrekturen notwendig werden, je nachdem, welche Genauigkeitsanforderungen an die vorliegende Dehnungsmessung gestellt werden.

Den gleichen grundsätzlichen Lösungsansatz und die gleichen Näherungen wie HINES in seiner Ableitung benutzend, jedoch gewisse Verallgemeinerungen einfürend, um die Eigenschaften aller Kleber/Trägerfolien-Kombinationen abzudecken, kann eine Beziehung zur Abschätzung des inkrementellen thermischen Ausgangssignals wie folgt geschrieben werden:

(A-1)

$$\Delta\varepsilon_{T/A} = \frac{1}{R} [(1 + 2\nu_{A-B})(h_A\alpha_A + h_B\alpha_B) - 2\nu_{A-B}\alpha_S(h_A + h_B)]\Delta T$$

Es sind (in konsistenten Einheiten):

$\Delta\varepsilon_{T/A}$ = Krümmungsinduziertes inkrementelles thermisches Ausgangssignal des DMS.

- R = Radius der Oberflächenkrümmung des Messobjekts.
- ν_{A-B} = Mittelwert der Poisson'schen Zahl des Klebers und der DMS-Trägerfolie.
- h_A, h_B = Dicke der Kleberschicht und der DMS-Trägerfolie (in dieser Reihenfolge).
- α_A, α_B = Temperatur-Ausdehnungskoeffizient des Klebers und der DMS-Trägerfolie (in dieser Reihenfolge).
- α_S = Temperatur-Ausdehnungskoeffizient des Substrats (Messobjekt-Werkstoff)
- ΔT = Temperaturänderung im Vergleich zur Referenztemperatur.

Näherungswerte für die den Kleber und das Trägermaterial betreffenden Parameter in Gleichung (A-1) sind für repräsentative Kleber und DMS-Serien der Vishay Micro-Measurements in *Tabelle A-1* zu finden. Das Vorzeichen des inkrementellen thermischen Ausgangssignals ergibt sich aus Gleichung (A-1), wenn die richtigen Vorzeichen für ΔT und R eingesetzt worden sind; ein Temperaturanstieg im Vergleich zur Referenztemperatur wird als positiv bewertet, eine konvexe Krümmung ist positiv und eine konkave negativ. Das mit Gleichung (A-1) errechnete Ergebnis wird zum thermischen Ausgangssignal des DMS, wie es auf dem DMS-Datenblatt angegeben ist, algebraisch addiert. Damit erhält man das für den Krümmungsradien-Effekt korrigierte thermische Ausgangssignal, welches jetzt wiederum herangezogen werden kann, um in dieser TechNote dargestellten allgemeinen Korrekturen für das thermische Ausgangssignal aus DMS durchführen zu können.

Tabelle A-1
Parameter der Kleber und DMS-Trägerfolien zur Anwendung mit Gleichung (A-1).

Kleber-Typ	h_A, h_B mm	α_A, α_B pro K
M-Bond 200	0,015	$81 \times 10^{-6}/K$
AE-10/15	0,025	81
M-Bond 600/610	0,005	81
DMS-Serie (Trägerfolie)		
EA, CEA, EP, ED	0,030	$90 \times 10^{-6}/K$
SA, SK, SD, S2K	0,025	18
WA, WK, WD	0,038	18
$\nu_{A-B} = 0,35$ für alle Kombinationen		

¹⁾ Proceedings, Western Regional Strain Gage Committee, Nov. 9, 1960, pp. 39-44.

Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

Da die Parameter für die Kleber und DMS-Trägerfolien in *Tabelle A-1* lediglich Näherungswerte sein können und darüber hinaus durch DMS-Installationstechniken und andere Variable beeinflusst werden können, müssen die Korrekturergebnisse aus Gleichung (A-1) in ihrer Genauigkeit begrenzt sein. Erreichen die Radien von Oberflächenkrümmungen, auf die DMS installiert werden sollen, Werte, die das inkrementelle thermische Ausgangssignal wichtig erscheinen lassen, und sind die Anforderungen an die Genauigkeit der Messung streng genug, sollte das für die Installation tatsächlich vorliegende thermische Ausgangssignal der DMS nach der in **Abschnitt 2.2.4** dargestellten Vorgehensweise gemessen werden. Das bedeutet, dass die DMS auf das Messobjekt geklebt werden, in ihrer unmittelbaren Nähe ein Thermoelement oder Widerstands-Temperatursensor installiert wird und dass dann das Messobjekt den Versuchstemperaturen ausgesetzt wird, um das "wirkliche" thermische Ausgangssignal aus dem DMS zu messen. Dabei muss natürlich vorausgesetzt werden, dass das Messobjekt frei von thermischen und mechanischen Spannungen bleibt.

Als Hilfe zur Bewertung der ungefähren Größe des inkrementellen thermischen Ausgangssignals sind hier unter Anwendung von Gleichung (A-1) einige repräsentative Kombinationen von Klebern und DMS-Serien der Vishay Micro-Measurements ausgewertet und dargestellt. Parameter aus *Tabelle A-1* sind in die Gleichung eingesetzt worden. Die Resultate sind, unter Zugrundelegung von $\alpha_s = 11 \times 10^{-6}/K$, also der Annahme von Stahl als Werkstoff des Messobjekts, in *Abb. A-1* grafisch dargestellt.

Zu beachten ist, dass in diesem Diagramm die Ordinate als inkrementelle Ausgangssignal pro Temperaturänderungseinheit angibt, d. h. als $\Delta\varepsilon_T/\Delta T$.

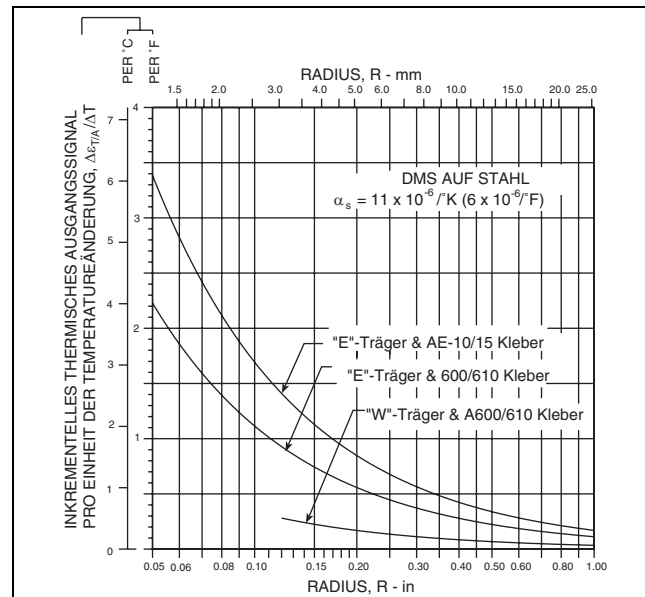


Abb. 9