

Bestimmung von thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten mittels DMS

Der thermische Ausdehnungskoeffizient gehört zu den fundamentalen Eigenschaften eines Werkstoffs, und er kann hinsichtlich allgemeiner mechanischer Fragestellungen und beim konstruktiven Einsatz von Materialien sehr große Bedeutung erlangen. Obwohl für gebräuchliche Metallwerkstoffe und Standardlegierungen thermische Ausdehnungskoeffizienten in publizierten Tabellen vorliegen, kann es gelegentlich erforderlich werden, diese Eigenschaft für ein ganz bestimmtes Material innerhalb eines besonderen Temperaturbereichs zu bestimmen. In einigen Fällen (z. B. bei völlig neuen oder bei Speziallegierungen, bei Kompositwerkstoffen) kann es durchaus sein, dass überhaupt keine publizierten Daten vorliegen; und in wieder anderen mögen Daten existieren, sogar gefunden werden, aber sie können sich auf den falschen Temperaturbereich beziehen, nicht ganz genau dem vorliegenden Material entsprechen oder sonst wie nicht dem aktuellen Anwendungsfall gerecht werden.

Historisch gesehen ist das klassische Mittel zur Messung von thermischen Ausdehnungskoeffizienten natürlich das wohlbekannte Dilatometer. Der messtechnische Vorgang bei diesem Instrument beruht auf einer Messung der Ausdehnungsdifferenz zwischen einer bestimmten Länge des Probenmaterials, dessen Ausdehnungskoeffizient bestimmt werden soll und einer entsprechenden Länge eines Quarzes oder von Silikaglas^{1,2}. Ihre unterschiedliche Ausdehnung wird mittels eines Zeigerinstruments, also eines mechanischen Extensometers oder mithilfe eines elektrischen Wegaufnehmers gemessen. Wenn notwendig, können die thermischen Ausdehnungseigenschaften des Quarzes oder des Silikaglases gegen die exakt bekannten Werte von reinem Platin oder reinem Kupfer kalibriert werden. Das Instrument wird normalerweise in einen speziellen Ofen oder in ein Flüssigkeitsbad eingebracht, um so die gewünschte Temperatur stabil sicherzustellen. Das Messen mit einem Dilatometer ist eine delikate, anspruchsvolle Angelegenheit, bleibt eher dem Werkstoffwissenschafts-Labor vorbehalten als den typischen Anwendungsbedingungen in der experimentellen Beanspruchungsanalyse.

Diese TechNote beschreibt eine andere mögliche Methode zur einfachen und relativ genauen Messung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten eines Probenmaterials im Vergleich zu dem eines beliebigen Referenzmaterials, dessen Ausdehnungscharakteristika genau bekannt sind. Die hier aufgezeigte Technik benutzt zwei sehr gut aufeinander abgestimmte Dehnmessstreifen (DMS), von denen

einer auf eine Probe des Referenzwerkstoffs, der andere auf eine Probe des Werkstoffs geklebt wird, dessen Ausdehnungskoeffizient bestimmt werden soll. Die Proben können von beliebiger Form sein, solange sie in ihrer Größe den Kammern von verfügbaren Heiz- und Kühlgeräten entsprechen. Es ist mit Rücksicht auf potenzielle Probleme durch unerwünschte Temperaturgradienten in den Proben aber günstig, wenn Test- und Referenzmaterialprobe gleiche Querschnitte aufweisen. Unter der Bedingung, dass die Proben spannungsfrei bleiben, ist die Differenz zwischen den Ausgangssignalen der DMS auf den beiden Proben gleich der Differenz der Ausdehnung der beiden Proben (in $\mu\text{m/m}$). Neben der Tatsache, dass diese Methode grundsätzlich unkompliziert und äußerst einfach in der Anwendung ist, zeichnet sie sich dadurch weiter aus, dass außer den Geräten, die sowieso im Spannungsanalyse-Labor vorhanden sind, keinerlei spezielle Instrumente benötigt werden. Sie kann außerdem für die normalerweise nicht so einfache Aufgabe der Bestimmung von richtungsabhängigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei anisotropen Werkstoffen angewandt werden.

Da typische thermische Ausdehnungskoeffizienten in der Größenordnung von nur wenigen Millionstel Teilen ($\text{ppm} = \text{parts per million} = 10^{-6}$) pro Grad (K) ausgedrückt werden, ist der messtechnischen Vorgehensweise allgemein größte Sorgfalt zu widmen, um hinreichend genaue Resultate zu erreichen, und die DMS-Messmethode bildet dabei keine Ausnahme. Diese TechNote ist als Hilfe für den DMS-Anwender zusammengestellt worden, damit er die volle Genauigkeit moderner Folien-DMS bei der Bestimmung thermischer Ausdehnungskoeffizienten ausnutzen kann. Der nächste Abschnitt beschreibt in einiger Ausführlichkeit die DMS-relevanten Grundlagen und Vorgehensweisen zur Durchführung der Messung, wobei Letztere grundsätzlich die gleichen sind wie bei jeder DMS-Messung, die unter variablen Temperaturbedingungen durchgeführt werden muss. Im folgenden Abschnitt werden dann Verfeinerungen vorgeschlagen, um die maximal mögliche Genauigkeit zu erreichen. Schließlich werden die grundsätzlichen Grenzen der Methode diskutiert.

Grundlagen der Messmethode

Wenn ein Widerstands-DMS auf einer spannungsfreien Probe installiert ist und die Temperatur der Probe ändert sich, dann geht damit eine Änderung des DMS-Ausgangssignals einher. Dieser Effekt ergibt sich bei allen Widerstands-DMS, wurde früher "temperaturbedingte scheinbare

Bestimmung von thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten mittels DMS

Dehnung" genannt und heute als **Thermischer Ausgangssignal** bezeichnet³. Es wird durch das Zusammenwirken von zwei Faktoren hervorgerufen. Zuerst einmal zeigt die Gitterlegierung, wie die meisten elektrischen Leiter, eine Änderung des spezifischen Widerstands mit der Temperatur. Eine weitere Widerstandsänderung ergibt sich aus der Tatsache, dass der thermische Ausdehnungskoeffizient der Gitterlegierung sich gewöhnlich von dem des Probenmaterials, auf das der DMS geklebt ist, unterscheidet. Mit jeder Temperaturänderung wird das Gitter also mechanisch belastet, gedehnt, und zwar um einen Betrag, welcher der genannten Differenz der Ausdehnungskoeffizienten entspricht. Da das DMS-Messgitter nun aus einem dehnungsempfindlichen Material besteht, zeigt es eine Widerstandsänderung proportional zur thermisch hervorgerufenen Dehnung. Das thermische Ausgangssignal des DMS ist also der kombinierte Effekt aus den beiden beschriebenen Ursachen für die thermisch bedingte Widerstandsänderung des DMS-Messgitters. Die resultierende Netto-Widerstandsänderung kann wie folgt ausgedrückt werden als die Summe der Effekte aus dem Widerstands-Temperaturkoeffizienten und der Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten.

$$\frac{\Delta R}{R} = [\beta_G + (\alpha_S - \alpha_G)F_G]\Delta T \quad (1)$$

Es sind: $\Delta R/R$ = Widerstandsänderungseinheit

β_G = Widerstands-Temperaturkoeffizient des DMS-Gittermaterials

$\alpha_S - \alpha_G$ = Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Probenmaterial und DMS-Gittermaterial

F_G = K-Faktor des DMS

ΔT = Temperaturdifferenz zu einer beliebigen initialen Referenztemperatur.

Die angezeigte Dehnung aus einer Widerstandsänderung des DMS ist:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta R/R}{F_I} \quad (2)$$

Es ist: F_I = K-Faktoreinstellung am Messinstrument
Das thermische Ausgangssignal in Dehnungseinheiten kann also so ausgedrückt werden:

$$\varepsilon_{T/O(G/S)} = \frac{[\beta_G + (\alpha_S - \alpha_G)F_G]\Delta T}{F_I} \quad (3)$$

wobei: $\varepsilon_{T/O(G/S)}$ = Thermisches Ausgangssignal aus Gitterlegierung G auf Probenmaterial S

Oder aber, für den Normalfall, bei dem die K-Faktoreinstellung am Instrument dem wirklichen K-Faktor des DMS

entspricht, also $F_I = F_G$ kann geschrieben werden:

$$\varepsilon_{T/O(G/S)} = \left[\frac{\beta_G}{F_G} + (\alpha_S - \alpha_G) \right] \Delta T \quad (4)$$

Aus Gleichung (4) kann nicht auf Linearität des thermischen Ausgangssignals mit der Temperatur geschlossen werden, da alle Koeffizienten innerhalb der Klammern selbst temperaturabhängig sind. Der Funktionsverlauf des thermischen Ausgangssignals von temperatur-selbstkompensierenden Konstantan-DMS der Vishay Micro-Measurements, geklebt auf Stahl, zeigt z. B. die durchgezogene Kurve in *Abb. 1*. Das Folien-Produktionslos, identifiziert durch die Angabe in der oberen rechten Ecke der Grafik, wurde speziell behandelt, um das thermische Ausgangssignal in einem Temperaturbereich von ungefähr -45°C bis $+150^\circ\text{C}$ zu minimieren. DMS, die aus diesem Folienlos hergestellt wurden, sind nur zur Installation auf Stahl gedacht, mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $11 \times 10^{-6}/\text{K}$. Werden diese DMS auf einen anderen Werkstoff mit unterschiedlichem thermischen Ausdehnungskoeffizienten geklebt, bewirkt das eine Rotation der Kurve um den Referenzpunkt bei $+24^\circ\text{C}$ ($+75^\circ\text{F}$) Raumtemperatur.

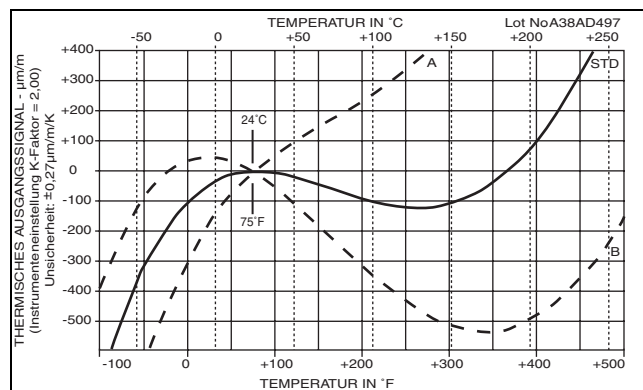


Abb. 1 - Rotation der Kurve des thermischen Ausgangssignals aus einem DMS, installiert auf Werkstoffen mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten

Ist der DMS auf ein Material mit höherem thermischen Ausdehnungskoeffizienten installiert, ergibt sich eine Drehung gegen den Uhrzeigersinn, während die Kurve bei einem Material mit niedrigerem Ausdehnungskoeffizienten im Uhrzeigersinn gedreht wird. Die gestrichelte Kurve A in *Abb. 1* zeigt den Effekt, der sich ergibt, wenn ein DMS aus dem obigen Folienlos auf eine Probe aus Beryllium-Kupfer geklebt wird, dessen thermischer Ausdehnungskoeffizient bei $16 \times 10^{-6}/\text{K}$ liegt. Wird ein solcher DMS auf eine Titanlegierung installiert, deren Ausdehnungskoeffizient etwas unter dem von Stahl liegt, würde sich eine Funktion des thermischen Ausgangssignals

Bestimmung von thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten mittels DMS

ergeben, wie sie in *Abb. 1* durch die gestrichelte Kurve **B** gezeigt wird.

Somit geht das Prinzip der Messung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten mittels DMS aus *Abb. 1* klar hervor, denn die Rotation der Funktionskurven des thermischen Ausgangssignals von einer Position zur anderen hängt nur von den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe ab, die von den beiden Kurven repräsentiert werden. Eine algebraische Darstellung des Prinzips erhält man unter Benutzung von Gleichung (4), einmal für eine DMS-Installation auf den Werkstoff mit unbekanntem (also zu bestimmenden) thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_S und noch einmal, indem man sie mit dem genau bekannten Ausdehnungskoeffizienten α_R eines Referenzmaterials schreibt:

$$\varepsilon_{T/O(G/S)} = \left[\frac{\beta_G}{F_G} + (\alpha_S - \alpha_G) \right] \Delta T \quad (5a)$$

$$\varepsilon_{T/O(G/R)} = \left[\frac{\beta_G}{F_G} + (\alpha_R - \alpha_G) \right] \Delta T \quad (5b)$$

Subtrahiert man Gleichung (5b) von Gleichung (5a) ergibt sich:

$$\alpha_S - \alpha_R = \frac{(\varepsilon_{T/O(G/S)} - \varepsilon_{T/O(G/R)})}{\Delta T} \quad (6)$$

Die Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zweier Werkstoffe, bezogen auf einen bestimmten Temperaturbereich, ist also gleich der Differenz der thermischen Ausgangssignale aus den DMS für den gleichen Temperaturbereich. Obwohl diese Messtechnik zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Werkstoffen ein großes Anwendungsfeld finden kann und häufig von vornherein die praktischste messtechnische Lösung ist, findet man darüber in der einschlägigen Literatur nur wenig Information. Repräsentative Anwendungsfälle werden in der am Ende dieser TechNote aufgelisteten Referenzliteratur angeführt^{4,5}.

Messtechnische Vorgehensweise

Referenzwerkstoff

Der Wahl des Referenzwerkstoffs kommt natürlich für die Genauigkeit der Methode große Bedeutung zu, was für jede Form der Differenzial-Dilatometrie gilt. Im Prinzip kann jedes beliebige Material gewählt werden, solange dessen thermische Ausdehnungseigenschaften über den interessierenden Temperaturbereich genau bekannt sind. In der Praxis ist es jedoch häufig vorteilhaft, ein Material zu wählen, dessen Ausdehnungskoeffizienten so nahe wie möglich bei Null liegen. Auf diese Weise wird das DMS-Ausgangssignal bereits in recht guter Weise

mit dem "absoluten" Ausdehnungskoeffizienten des Probenmaterials korrespondieren, und es ergibt sich eine unkompliziertere Versuchstechnik. Das thermische Ausdehnungsverhalten des Referenzmaterials sollte außerdem sehr gut reproduzierbar sein und bei jeder gegebenen konstanten Temperatur hohe Zeitstabilität aufweisen. Sein Elastizitätsmodul sollte hoch genug sein, dass Versteifungseffekte durch den installierten DMS vernachlässigbar bleiben.

Bezüglich der genannten Anforderungen und auch hinsichtlich anderer Eigenschaften stellt sich der Werkstoff ULE™-Titan-Silikat Code 7971 von Corning Glass Company, Corning, NY 14831 /USA heraus*. Wie in *Abb. 2* dargestellt, zeigt dieses Glasmaterial einen extrem niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, besonders über den Temperaturbereich von -45°C bis +175°C. Allerdings muss beachtet werden, dass es eine niedrige Wärmeleitfähigkeit hat, wodurch sich nur langsam ein thermisches Gleichgewicht im Probenkörper einstellt. Um optimale Ergebnisse zu erreichen, sollte man für jede Temperaturstufe vor der jeweiligen Datenerfassung mindestens 45 Minuten Haltezeit ansetzen. Ein anderer eventueller Nachteil des Titan-Silikats könnte seine Sprödigkeit sein, die es beim Fallen auf einen harten Untergrund sofort zersplittern lässt. Eine Alternative zu diesem Glaswerkstoff wäre daher Invar, eine Eisen-Nickel-Legierung, die ebenfalls einen niedrigen Ausdehnungskoeffizienten aufweist, der über den interessierenden Temperaturbereich hinreichend genau bekannt und reproduzierbar ist.

DMS-Auswahl

Der DMS-Typ, der für die Bestimmung von thermischen Ausdehnungskoeffizienten ausgesucht wird, ist, ebenso wie bei der Auswahl von DMS für Präzisions-Messwertaufnehmer, von großer Bedeutung. Die DMS-Auswahl verlangt in der Regel ein Abwägen einer Vielzahl von Faktoren gegeneinander, die direkt oder indirekt die Brauchbarkeit eines DMS-Typs für eine gegebene Messaufgabe beeinflussen können. Um DMS-Anwender dabei zu unterstützen, stellt die Vishay Micro-Measurements TechNote TN-505 umfangreiche Hintergrunddaten und Auswahlprozeduren dar, gibt entsprechende Empfehlungen und zeigt Anwendungsbeispiele⁶. Diese TechNote sollte zuerst als Referenz für die DMS-Auswahl zu Rate gezogen werden, ergänzt durch die hier folgenden speziellen Überlegungen, welche für den Einsatz bei Messungen von thermischen Ausdehnungskoeffizienten gelten.

*Von der Vishay Micro-Measurements erhältlich unter der Bezeichnung TSB-1. Probenabmessungen siehe Anhang.

Bestimmung von thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten mittels DMS

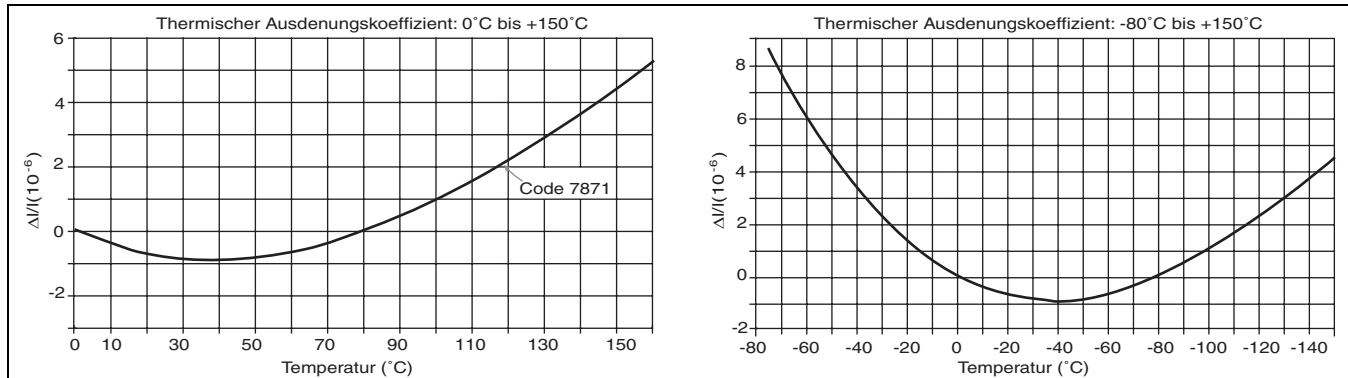


Abb. 2 - Thermisches Ausdehnungsverhalten des Referenzmaterials Titansilikat (Quelle: Corning Glass Company)

Für gute Genauigkeit, kombiniert mit unkomplizierten Installationsprozeduren, ist die DMS-Serie CEA von der Vishay Micro-Measurements gewöhnlich die passende Wahl. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Temperaturextreme bei der Messung innerhalb des Bereichs größter Stabilität und Präzision liegen, die für die Konstantan-Gitterfolie dieser DMS-Serie (ca. -45°C bis +65°C) gelten. Handelt es sich um einen größeren Temperaturbereich, ist die DMS-Serie WK vorzuziehen. DMS dieser Serie sind etwas steifer, weniger flexibel als die der Serie CEA, sodass bei Proben- oder Referenzwerkstoffen niedrigeren Elastizitätsmoduls oder kleinen Querschnitts Versteifungseffekte in Betracht gezogen werden müssen.

Auf jeden Fall aber ist ein DMS-Widerstand von 350Ω vorzuziehen, um Selbsterwärmungseffekte durch den Speisestrom zu vermeiden. 350Ω sind auch insofern besser, als damit die Effekte kleinerer Brückenverstimmungen reduziert werden, die sich aus temperaturabhängigen asymmetrischen Widerstandsänderungen in der Verdrahtung ergeben können. Weiterhin ist es gute Praxis, wann immer möglich, eine mittlere Gitterlänge zu wählen, 3mm oder 6mm, um so durch gute Wärmeabgabe die Stabilität weiter zu verbessern.

Eine andere zu spezifizierende DMS-Kenngröße ist die S-T-C-Nr. (s. DMS-Katalog), welche die Temperatur-Selbstkompensation definiert. Wie in Gleichung (6) angedeutet, sollte es im Prinzip gleichgültig sein, welche S-T-C-Nr. gewählt wird. Nur die **Differenz** der Ausgangssignale des gleichen DMS-Typs auf zwei verschiedenen Werkstoffen ist schließlich ausschlaggebend für die Berechnung des Ausdehnungskoeffizienten. Allerdings gibt es weitere praktische Überlegungen, die Einfluss auf die Wahl der S-T-C-Nr. haben können. Eine wäre die Frage der Verfügbarkeit des gewählten DMS innerhalb der gewünschten DMS-Serie, DMS-Geometrie und hinsichtlich des Widerstands. In der Regel besteht die größte Auswahlbreite innerhalb der S-T-C-Nummern 06 (Stahl) und 13 (Aluminium), weil diese die am meisten vorkommenden Kompensationen in der experimentellen Spannungsanalyse und im Auf-

nehmerbau sind. Es ist deshalb häufig angebracht, die Auswahl zwischen diesen beiden S-T-C-Nummern zu treffen.

Sollen thermische Ausdehnungen für einen erweiterten Temperaturbereich oder bei niedrigen oder hohen Temperaturextremen gemessen werden, muss die S-T-C-Nummer sorgfältig gewählt werden, um bestmögliche Genauigkeiten zu erreichen. Aus *Abb. 1* wird evident, dass aus einer großen Fehlanpassung zwischen der S-T-C-Nr. und dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Probenmaterials ein sehr steiler Funktionsverlauf des thermischen Ausgangssignals an einem oder an beiden Temperaturextremen resultieren kann. Unter solchen Umständen würde ein kleiner Fehler bei der Temperaturmessung (oder eine kleine Temperaturdifferenz zwischen Referenz- und Probenmaterial) große Fehler beim thermischen Ausgangssignal hervorrufen. Durch bewusste sinnvolle Fehlanpassung kann allerdings die Funktionssteigung des thermischen Ausgangssignals sowohl für das Probenmaterial als auch für den Referenzwerkstoff im Bereich des interessierenden Temperaturbereichs gut gesteuert werden.

Für die Messung thermischer Ausdehnungskoeffizienten kann so gut wie jede "lineare" DMS-Geometrie herangezogen werden. Wie jedoch bereits erwähnt, müssen beide DMS - der auf der Probe und der andere auf dem Referenzmaterial - immer sehr gut einander angepasst sein. Das bedeutet, beide DMS müssen total typenidentisch sein und aus dem gleichen Produktionslos stammen, um sicherzustellen, dass die Charakteristika ihrer thermischen Ausgangssignale so gut wie möglich übereinstimmen. Diesen beiden Anforderungen kann man einfach dadurch gerecht werden, dass man zwei DMS als Paar aus der gleichen Packung nimmt. DMS identischen Typs aus unterschiedlichen Packungen des gleichen Produktionsloses werden gewöhnlich auch gut zueinanderpassen. Wenn jedoch eine noch bessere Anpassung der beiden DMS aneinander zum Erzielen noch besserer Genauigkeit gewünscht wird, nimmt man am besten einen Doppelgitter-DMS wie die Geometrie 125MG (*Abb. 3*) und trennt die beiden Gitter voneinander,

Bestimmung von thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten mittels DMS

um so zwei individuelle DMS nahezu idealer Identität zu erhalten. Die beiden DMS, die man so bekommt, sind sozusagen eineiige Zwillinge mit nahestmöglichster Anpassung aneinander im Hinblick auf die thermischen Ausgangssignale und die sonstigen Eigenschaften.

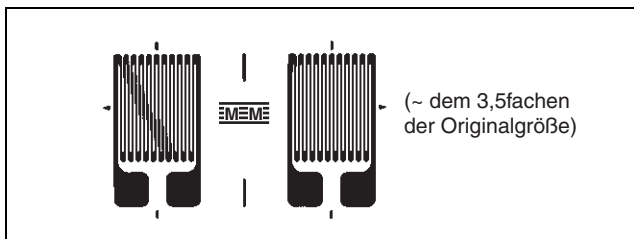


Abb. 3 - Doppelgitter-DMS der Geometrie 125MG von der Vishay Micro-Measurements

DMS-Installation

Wie bereits bemerkt, liegt eine der angenehmen Eigenschaften der Methode darin, dass Probenform und Probengröße beliebig sein können, solange sie mit den eingesetzten Heiz- und Kühlvorrichtungen kompatibel sind. Tatsächlich können die beiden Proben in der Gestalt sogar verschieden sein, wenn die Umstände es erfordern. Im Allgemeinen sollten die Proben jedoch über ihre Länge und Breite querschnittsgleich sein, damit beim Aufheizen und Abkühlen möglichst kleine Temperaturgradienten entstehen. Wenn sie außerdem noch ebene Oberflächen haben, wird das die Installation von DMS und Temperatursensor natürlich erleichtern. Weiter ist ein hinreichend großer Probenquerschnitt erwünscht, um die Steifigkeit des DMS vernachlässigbar klein zu halten im Vergleich zur Steifigkeit der Probe an der Installationsstelle. Über diese Empfehlungen hinaus ist die Wahl der Probenabmessungen so vorzunehmen, dass beide Proben möglichst die gleiche thermische Trägheit aufweisen, um so beim Aufheizen und Abkühlen auf schnellstem Wege thermisches Gleichgewicht der beiden Proben zu erzielen.

Die Probenoberfläche muss sorgfältig gereinigt und für die DMS-Klebung vorbereitet werden. Dafür folgt man am besten genau der Vorgehensweise, wie sie im Instruktions-Bulletin B-129 der Vishay Micro-Measurements für ein großes Sortiment unterschiedlicher Probenwerkstoffe beschrieben ist⁷. Um beste Genauigkeit zu erreichen, sollte man einen Hochleistungskleber wie etwa M-Bond 600 oder M-Bond 610 benutzen. Mit beiden Klebern ist man in der Lage, sehr dünne, harte Kleberschichten zu erzielen, womit in höchstem Maße gewährleistet ist, dass eine optimale Dehnungsübertragung von der Probenoberfläche in den DMS geschieht. Beide Kleber sind für die Anwendung auf relativ glatten, unporösen Oberflächen gedacht und sollten nicht zum Einsatz kommen, wenn es gilt, Irregularitäten der Oberfläche auszufüllen oder Poren zu schließen. Für letztere Oberflächenzustände sind die Kleber M-Bond AE-10 oder M-Bond AE-15 geeigneter. In allen Fällen sind in den

Klebepackungen komplette Gebrauchsanweisungen enthalten.

Besondere Beachtung muss der Frage der Kabel und Verdrahtungstechnik geschenkt werden, um beste Messresultate zu erhalten. Widerstandsänderungen in der Verdrahtung aufgrund von Temperatureinflüssen werden Signale hervorrufen, die von den eigentlichen Messsignalen also den thermischen Ausgangssignalen aus den DMS, nicht trennbar sind. Wenn unterschiedliche thermisch bedingte Kabelwiderstandsänderungen beim DMS auf dem Referenzmaterial und dem auf dem Probenmaterial auftreten, wird das die thermischen Ausgangssignale aus den beiden DMS in entsprechender Weise mit Fehlern belasten. Um solche Effekte nun zu minimieren, sollte der Messkabelwiderstand so niedrig wie möglich gehalten werden. Die Verkabelung für beide DMS (Referenz- und Probenmaterial) muss total widerstandssymmetrisch sein, d. h. alle Kabellängen, Kabelquerschnitte und auch die Kabelführung müssen gleich sein. Werden die Messungen unter der Bedingung durchgeführt, dass sich beide Proben in der gleichen Temperaturkammer oder im gleichen Temperaturbad befinden, sollten alle Kabel über eine möglichst große Länge physisch direkt nebeneinander geführt werden. Die Kabelisolation muss selbstverständlich unter Gesichtspunkten der Verträglichkeit mit dem Temperaturbereich ausgesucht werden, innerhalb dessen die Messung stattfindet.

Beim Anbringen der Kabel an die DMS-Lötflächen oder an Lötstützpunkte ist darauf zu achten, dass Lötunkte produziert werden, die glatt, glänzend, massesymmetrisch und frei von Spikes und überschüssigem Lötzinn sind. Nach den Lötarbeiten sollten alle Lötstellenbereiche mittels Rosin Solvent sorgfältig von allen Flussmittelrückständen gereinigt werden.

Als Letztes wird die Installation mit einer dem zu erwartenden Umfeld gemäßen Schutzabdeckung versehen werden. Da es sich hier in der Regel um Labormessungen handelt, ist ein Standardabdeckmittel auszuwählen, welches guten allgemeinen Schutz gegen Feuchtigkeit und Taupunktcondensation bei Kälte gewährleistet und ansonsten kompatibel mit minimalen und maximalen Temperaturen ist, die während der Messung auftreten. Die Abdeckungsempfehlungen in der folgenden Tabelle ziehen auch die Forderung nach Vermeidung von Versteifungseffekten an der Probe in Betracht. Weitere Einzelheiten über Abdeckmittel können dem DMS-Zubehörcatalog der Vishay Micro-Measurements entnommen werden.

Der Prozess der DMS-Installation wird in anderen Publikationen der Vishay Micro-Measurements in allen Einzelheiten beschrieben, sodass die hier gegebene kurze Zusammenfassung genügen soll. Es sollte allerdings verstanden werden, dass für genaue Messungen von thermischen Ausdehnungskoeffizienten eine sachgerechte DMS-Installation eine prinzipielle Voraussetzung und von

Bestimmung von thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten mittels DMS

grundsätzlicher Bedeutung ist. Die Installation muss im Allgemeinen also höchsten Qualitätsansprüchen genügen, vergleichbar etwa mit denen, die bei der Herstellung von Präzisionsmesswertaufnehmern gefordert werden. Es muss auch angestrebt werden, beide DMS-Installationen, die eine auf dem Probenwerkstoff, und die andere auf dem Referenzmaterial, untereinander so gleich wie möglich auszuführen, um damit auch physische Unterschiede zu minimieren, welche die Differenz der thermischen Ausgangssignale aus den beiden DMS in unerwünschter Weise beeinflussen können. Sollten sich hinsichtlich der DMS-Installation Fragen ergeben, sollte auf jeden Fall die nächste für den Anwender zuständige Beratungsstelle der Vishay Micro-Measurements konsultiert werden. *Abb. 4* zeigt einen vorschriftsmäßig installierten DMS zusammen mit einem aufklebbaren Temperatursensor (*Abb. 6*) auf einer Probe zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Das Bild zeigt die fertige Installation vor Aufbringen des Schutzabdeckmittels über DMS und Temperatursensor.

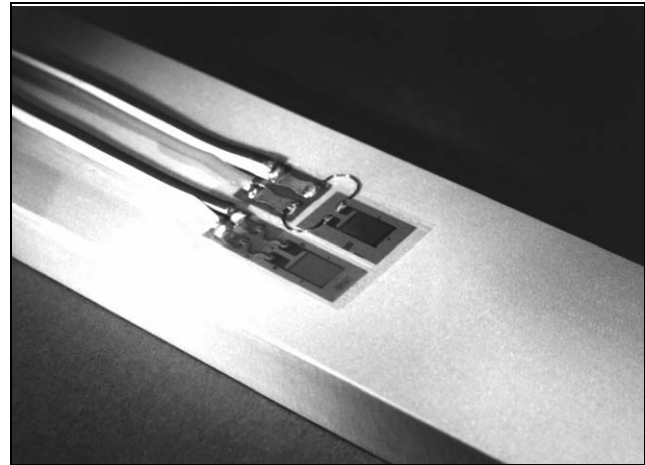


Abb. 4 - DMS (eine Hälfte des 125MG-Doppelgitter-DMS oben) und Temperatursensor, nebeneinander installiert auf einer Testmaterial-Probe

Schutzabdeckmittel	
Temperaturbereich (°C)	Abdeckmittel
+15 bis +120	M-Coat A oder M-Coat C
-20 bis +65	M-Coat W-1
-75 bis +260	3140-RTV oder 3145-RTV
-269 bis +200	2 Schichten M-Bond 43B

Instrumente zur Dehnungs- und Temperaturmessung.

Grundsätzlich kann jede genaue und stabile Dehnungsmessbrücke für Dehnungsmessungen bei den hier beschriebenen Prozeduren eingesetzt werden, und die Dehnungsmessbrücke Modell P-3 der Vishay Micro-Measurements ist dafür bestens geeignet. Über die Notwendigkeit von hinreichender Genauigkeit und Stabilität hinaus, ist es wichtig, dass die vom Gerät verfügbare Brückenspeisespannung niedrig genug ist, damit keine Selbsterwärmungseffekte an den DMS auftreten. Das genannte Gerät erfüllt diese Forderung, und ihre Brückenspeisespannung wird bei DMS der Geometrie 125MG, installiert auf Metallen mit guter Wärmeableitung, nicht zu Selbsterwärmungsproblemen führen. Bei Instrumenten, die mit höheren Brückenspeisungsspannungen arbeiten, oder wenn die DMS auf Werkstoffe schlechter Wärmeleitfähigkeit installiert sind, kann erhebliche Selbsterwärmung der DMS entstehen, und es müssen Maßnahmen zur Erniedrigung der Brückenspeisespannung getroffen werden. Umfangreiche Hintergrundinformationen zu dieser Problematik sind in der TechNote TN-508 der Vishay Micro-Measurements zu finden⁸.

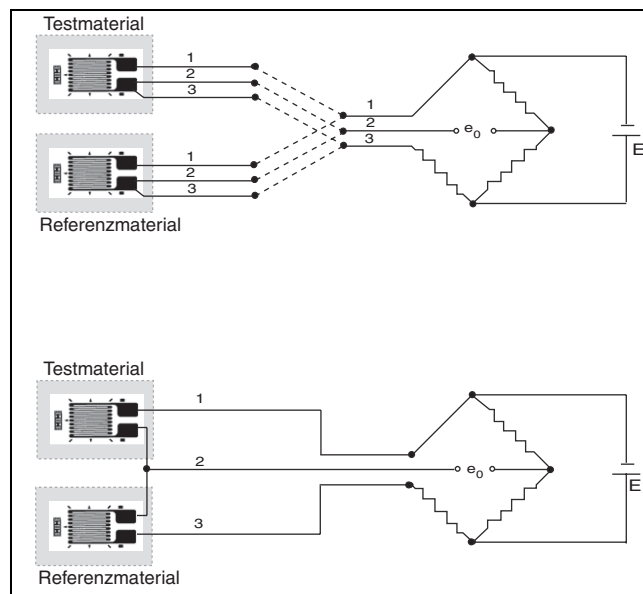


Abb. 5 - DMS-Brückenschaltungen zur Messung thermischer Ausdehnungskoeffizienten:
 a) Getrennte Viertelbrückenschaltung,
 b) Halbbrückenschaltung

Bezüglich der sinnvollerweise zu benutzenden DMS-Brückenschaltungen stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Die Erste, in *Abb. 5a* dargestellt, besteht in zwei separaten Viertelbrückenschaltungen, natürlich in 3-Leiterverdrahtung, deren Messdaten individuell erfasst und in Gleichung (6) zur Berechnung der Differenz der beiden thermischen Ausgangssignale eingesetzt werden. Da es sich dabei um total unabhängig voneinander operierende Schaltungen handelt, ist es relativ einfach, die Ursache eventuell

Bestimmung von thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten mittels DMS

auftretender falscher oder unplausibler Messwerte herauszufinden. Ein Nachteil dieser Art, die Messung durchzuführen, liegt daran, dass die beiden Viertelbrückenschaltungen entweder über eine mehrkanalige Umschalt- und Abgleichseinheit an die Dehnungsmessbrücke angeschlossen werden müssen, oder dass von vornherein eine zweikanalige Messbrücke eingesetzt werden muss.

Die zweite Möglichkeit ist durch *Abb. 5b* illustriert. Hier werden die Eigenschaften einer Halbbrückenschaltung ausgenutzt, um die im vorhergehenden Fall mit Gleichung (6) durchgeführte Subtraktion diesmal elektrisch durchzuführen. Werden die beiden DMS nämlich in benachbarte Zweige der Brücke geschaltet, entspricht der am Instrument abgelesene Messwert der Differenz der thermischen Ausgangssignale der beiden DMS. Diese Vorgehensweise ist im Hinblick auf Verdrahtung und Instrumentation offensichtlich einfacher als die vorher beschriebene, hat jedoch den Nachteil, dass bei falschen oder Misstrauen erweckenden Messergebnissen schwierig herauszufinden ist, bei welchem der beiden DMS die Ursache liegt.

Bei beiden Schaltungen sollten die Messkabel so kurz wie möglich gehalten werden, und sie sollten von gleicher Länge und gleichem Querschnitt sein. Da die Kabel 1 und 3 (*Abb. 5*) in beiden Fällen innerhalb der benachbarten Brückenzweige liegen, sollte zwischen ihnen eine besonders gute Widerstandssymmetrie bestehen, und sie sollten so weit wie überhaupt möglich parallel in physischem Kontakt miteinander geführt werden, um so unterschiedliche Widerstandsänderungen zu minimieren, wenn nicht sogar ganz zu vermeiden. Bei der Halbbrückenschaltung (*Abb. 5b*) ist es außerdem notwendig, dass Kabel 2 genau in der Mitte des Verbindungsdrahts zwischen beiden DMS abgreift. Damit liegt jeweils die Hälfte des Verbindungsdrahts in Serie mit dem DMS-Widerstand, und unerwünschte Signale aufgrund von unterschiedlichen thermischen Widerstandsänderungen im Verbindungsdraht werden somit vermieden. In diesem Zusammenhang ist es interessant, sich vor Augen zu führen, dass eine Verdrahtungsasymmetrie von ca. 150mm, ob in den Leitungen 1 und 3 oder im DMS-Verbindungsdraht, bei einem Leiterquerschnitt von $0,05\text{mm}^2$ (AWG 30, $\varnothing 0,25\text{mm}$) ein Fehler-signal - in Dehnung ausgedrückt - von ca. $17\mu\text{m/m}$ pro 50K hervorrufen würde.

Auch die Temperaturmessung erfordert besondere Aufmerksamkeit und Sorgfalt, wenn man genaue Resultate bei der Messung thermischer Ausdehnungskoeffizienten mittels DMS erzielen will. Typischerweise wird dabei ein Temperatursensor direkt neben den DMS platziert (*Abb. 4*), in innigem Kontakt mit der Probenoberfläche, damit man jederzeit verlässliche Daten der Proben/DMS-Temperatur zur Verfügung hat. Dabei wird die Notwendigkeit mehrmaliger Temperaturmessungen an der Probe vorausgesetzt, um sicherzustellen, dass unter der Bedingung thermischen

Gleichgewichts in Heiz- und Kühlkammer die Probe selbst stets gleichförmig temperiert ist. Da bei den Werkstoffen der Versuchsprobe und der Referenzprobe normalerweise von unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärme ausgegangen werden muss, ist eine Temperaturmessung bei beiden DMS auf jeden Fall notwendig. Natürlich müssen zu jedem Messzeitpunkt beide DMS auf gleichem Temperaturniveau sein.

Abhängig von persönlichen Vorlieben und den verfügbaren Messinstrumenten kann die Temperatur entweder mit Thermoelementen oder mit Widerstands-Temperatursensoren gemessen werden. Erhalten Thermoelemente den Vorzug zur Messung an den beiden Proben, ist der Typ J (Eisen/Konstantan) empfehlenswert, vorausgesetzt, er entspricht dem vorliegenden Temperaturbereich. Der Thermoelement-Sensorknoten (die Verbindung der beiden Elementdrähte) sollte klein sein, ebenso sollten Elementdrähte lediglich die Größenordnung AWG 26 bis AWG 30 ($\varnothing 0,25$ oder $0,4\text{mm}$) haben, und nur Thermoelementdraht erster Qualität sollte eingesetzt werden. Die Temperaturübertragung von der Probe auf den Thermoelement-Sensorknoten kann verbessert werden, indem man die Thermoelementdrähte über eine gewisse Länge (50 - 75mm) auf der Probenoberfläche z. B. mittels Klebeband befestigt.

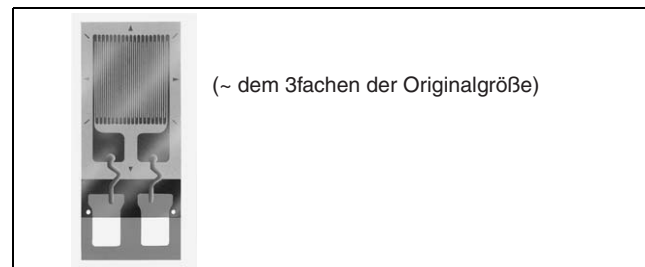


Abb. 6 - Aufklebbarer Widerstandstempersensor der Vishay Micro-Measurements, Typ ETG-50B, Option W

Eine Alternative zum Thermoelement stellt der Widerstands-Temperatursensor dar, wie er z. B. durch die Sensor-Serie TG (*Abb. 6*) der Vishay Micro-Measurements gegeben ist. Dieser Sensor sieht genauso wie ein DMS aus, ist auch so aufgebaut, außer, dass das Messgitter hier aus einer hochreinen Nickelfolie besteht. Die Installationsprozeduren sind die gleichen wie beim DMS, und er sollte direkt neben den DMS auf die Probenoberfläche geklebt werden. Da seine physischen Eigenschaften denen des DMS entsprechen und er in gleicher Weise installiert ist, kann man mit den gleichen Temperaturübertragungsdaten rechnen. Über ein spezielles passives Widerstandsnetzwerk (LST-Netzwerk von der Vishay Micro-Measurements) zur Anpassung und Linearisierung, kann er direkt an jede konventionelle Dehnungsmessbrücke angeschlossen werden, die dann zur Temperaturmessung dient. Die geringe Größe und niedrige Steifigkeit des Sensors wird die freie Wärme-dehnung der Proben nicht behindern.

Bestimmung von thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten mittels DMS

Ausführung der Messung

Bei jeder Art dilatometrischer Messung sollten die Referenz- und Testproben zur Messung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten mindestens zwei unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt werden. Die Art und Weise, wie man diese Temperaturen erhält, hängt vom gewünschten Temperaturbereich ab und von den zur Verfügung stehenden Ausrüstungen. Das können Öfen sein oder Flüssigkeitsbäder oder vielerlei andere Formen von Klimakammern und dergleichen. Die DMS-Methode legt der Art und der Konstruktionsweise dieser Kammern keine besonderen Einschränkungen auf, im Gegenteil, die Probenformen und Probenabmessungen können ohne Weiteres den vorhandenen Vorrichtungen angepasst werden. Da die Art solcher Ausrüstungen von Anwender zu Anwender sehr verschieden sein kann, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf die generellen Anforderungen, die an dilatometrische Temperaturkammern zu stellen sind.

Zwei der wünschenswertesten Merkmale einer Temperaturkammer zur Messung von thermischen Ausdehnungskoeffizienten sind die Stabilität der eingestellten Temperatur und die Gleichförmigkeit der Temperaturverteilung in der Kammer. Um Fehler zu vermeiden, die sich aus in der Probe entstehenden thermischen Spannungen ergeben, sollte zum Zeitpunkt der Messung in der gesamten Probe gleiche Temperatur herrschen. Diese Bedingung kann eigentlich nur erfüllt werden, wenn die Temperatur in der Kammer bei Temperaturgleichgewicht überall gleich ist oder aber dieser Zustand zumindest im Bereich der Probe gegeben ist. Dass diese Temperatur dann über eine gewisse Zeit gut stabil gehalten werden kann ist ebenso notwendig, damit die Temperatur an der Probe und die Wärmedehnung in Ruhe unter konstanten Bedingungen gemessen werden kann.

Thermisches Gleichgewicht der Probe kann erreicht werden, indem man eine Kammer benutzt, die mit einer Zwangskonvektionsheizung ausgestattet ist, die das Heizmedium lebhaft um die Probenoberfläche zirkulieren lässt. Aufheizen und Abkühlen sollte langsam erfolgen, um in der Probe Temperaturgradienten senkrecht zur Oberfläche zu vermeiden. Die Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung in der Probe ist jedoch schwer zu beurteilen, und gleichmäßige Temperatur an verschiedenen Punkten der Oberfläche deutet nicht notwendigerweise auf diesen gewünschten Zustand hin. Der wirksamste Weg, die Temperaturgleichmäßigkeit über die gesamte Probe und ihren Querschnitt zu kontrollieren, dazu in Aufheiz- und in Abkühlrichtung, besteht darin, einen kontinuierlichen Schrieb des DMS-Ausgangssignals als Funktion der Temperatur zu erstellen. Die Temperatur wird stufenweise verändert, und Temperatur- und Dehnungswert werden dann dem Schreiber zugeführt, wenn die Probe zweifelsfrei Temperaturgleichgewicht erreicht hat. Hat zu jedem Messzeitpunkt in der Probe wirkliche Temperaturgleichheit

geherrscht, sollten Aufheiz- und Abkühlkurven sehr gut übereinander liegen. Ist dies nicht der Fall, und die beiden Kurventeile formen eine Hysteresisschleife, deutet das auf ungleichmäßige Temperaturverteilung über den Probenquerschnitt hin. Im letzteren Fall müssen die Aufheiz- und Abkühlraten erniedrigt werden, die thermische Stabilisationszeit verlängert oder andere Maßnahmen ergriffen werden, um Temperaturgradienten wirksam zu eliminieren.

Die Proben müssen während der Messung so gelagert sein, dass Ausdehnung und Kontraktion durch Reibung nicht behindert werden. In manchen Fällen kann das einfach dadurch erreicht werden, dass man die Probe an einem Ende aufhängt. Natürlich ergibt sich dadurch eine kleine Dehnung durch das Eigengewicht. Aber diese Dehnung bleibt konstant (solange der Elastizitätsmodul des Werkstoffs gleich bleibt), und sie hat keinen Einfluss auf die Änderung des thermischen Ausgangssignals bei Temperaturänderung. Ändert sich jedoch der Elastizitätsmodul über den Temperaturmessbereich in größerem Maße, muss eine Fehlerbetrachtung durchgeführt werden, um beurteilen zu können, ob das Hängen der Probe sinnvoll ist. Eine andere Möglichkeit, die Proben in der Temperaturkammer zu lagern, besteht darin, sie auf ein Stück Glasfasergewebe oder irgendein anderes reibungsarmes Material zu legen. Wird so verfahren, sollte die gewünschte Abwesenheit von Reibung anhand des Datenschiebs beurteilt werden. Ergeben sich erratische Kurvenformen, Hysteresis oder mangelnde Reproduzierbarkeit, kann das auf Reibung hindeuten, die zwischen Probenoberfläche und Auflage bei der Wärmedehnung aufgetreten ist.

Vor Durchführung der wirklichen Messung zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten sollte das gesamte Messsystem, einschließlich der beiden Proben, stabilisiert werden, indem man es mehrmals durch den geplanten Temperaturbereich fährt und dabei die obere und untere Temperaturgrenze um mindestens 5K überschreitet. Einer der Gründe dafür sind Eigenspannungen, mit denen man in allen Komponenten des Systems rechnen muss - in den beiden Proben, in den DMS-Installationen auf den Proben, in der Brückenverdrahtung und so fort. Ein zyklisches thermisches Belasten vor der eigentlichen Messung löst entweder diese Eigenspannungen oder sorgt für ihre Umverteilung, sodass sie sich während der Messung nicht mehr ändern werden und die Messdaten in unerwünschter Weise beeinflussen. Das zyklische thermische Belasten des Messsystems sollte hinreichend langsam vor sich gehen, damit in den Proben keine thermischen Spannungen aufgrund von Temperaturgradienten entstehen. Es könnte sonst in den Proben eine addierende Überlagerung von Eigenspannungen und thermischen Spannungen hervorgerufen werden, die im ungünstigsten Fall bis zur Streckgrenze der Werkstoffe gehen kann, womit der Zweck der zyklischen thermischen Belastung ins Gegenteil verkehrt werden würde.

Bestimmung von thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten mittels DMS

Nach dem zweiten oder dritten Temperaturzyklus sollten die Ausgangssignale bei jeder gegebenen Temperatur sehr gut reproduzierbar sein. Sollten sich aber in Bezug auf die angestrebte Messgenauigkeit noch keine hinreichende Reproduzierbarkeit eingestellt haben, müssen die Ursachen dafür gesucht werden. Sie können bei verschiedenen Systemparametern liegen - der Temperatur, der Dehnung oder bei beiden, und ein Gespräch mit den Beratungsingenieuren der Vishay Micro-Measurements könnte hilfreichen Aufschluss geben.

Nach diesen Stabilisierungsmaßnahmen, deren Wirksamkeit durch reproduzierbare Messdaten über den gesamten Temperaturbereich verifiziert worden ist, kann der Anwender jetzt zur eigentlichen Messung zur Bestimmung der thermischen Ausdehnungseigenschaften des Testwerkstoffs schreiten. Ist in der zur Verfügung stehenden Temperaturkammer nur für eine Probe Platz, müssen beide Proben (Testmaterial und Referenzmaterial) nacheinander gemessen werden, wobei die Schaltung aus *Abb. 5a* herangezogen wird. Die beiden resultierenden Datensätze werden subtrahiert und die erhaltene Differenz durch den Betrag der Temperaturänderung dividiert (Gleichung [6]), womit man den differentiellen thermischen Ausdehnungskoeffizienten erhält. Kann man beide Proben gleichzeitig im Ofen oder in der Temperaturkammer platzieren, was vorzuziehen wäre, können beide Schaltungen, sowohl die aus *Abb. 5a* als auch die aus *Abb. 5b* eingesetzt werden, wobei im Fall der Schaltung aus *Abb. 5b* das Ausgangssignal schon direkt dem differentiellen Ausdehnungskoeffizienten entspricht.

Spezielle Hinweise und Möglichkeiten der Genauigkeitsverbesserung

Versucht man bei der DMS-Methode - oder jeder anderen - immer größere Messgenauigkeiten zu erzielen, wird man immer kleinere Effekte untersuchen müssen, die für Fehler verantwortlich sein können. In manchen Fällen sind die Fehler zweiter Ordnung wohl definiert, ihrer Natur nach systematisch, sowie routinemäßigen Verfahren zur Korrektur oder Eliminierung zugänglich. In anderen Fällen mögen Kausalzusammenhänge undurchschaubarer sein, und eine Fehlerverkleinerung oder -eliminierung kann nur über messtechnische Verfeinerungen erreicht werden - z. B. durch systematisches Ausschalten aller bekannten **möglichen** Fehlerquellen.

Ein Beispiel für eine bei gewissen Fällen ohne Weiteres korrigierbare Ungenauigkeit ist der Fehler aus der Querdehnungsempfindlichkeit der DMS. Dieser Fehler entsteht, weil das aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Gitterlegierung und Probenwerkstoff im Messgitter entstehende Dehnungsfeld (Gleichung [1]) anders als das ist, welches bei der K-Faktorkalibrierung auftritt⁹. Verhalten sich bei der Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten Test- und Referenzmaterial isotropisch, kann der Fehler der Querdehnungsempfindlichkeit, der in der Regel klein ist,

in einfacher Weise korrigiert werden. Von einer Ableitung der Korrekturmethode an dieser Stelle absehend, braucht man nur die Differenz der thermischen Ausgangssignale (Gleichung [6]) zu multiplizieren mit dem Faktor $(1 - 0,285k_t)/(1 + k_t)$, wobei k_t der dezimalisierte Wert der Querdehnungsempfindlichkeit des angewandten DMS ist. Dieser Korrekturfaktor ist allerdings für orthotrope Werkstoffe nicht anwendbar. Bei einem solchen Fall muss das differenzielle thermische Ausgangssignal zwischen dem DMS auf dem Referenzwerkstoff und zwei orthogonal zueinander angeordneter DMS auf dem Testmaterial bestimmt werden.

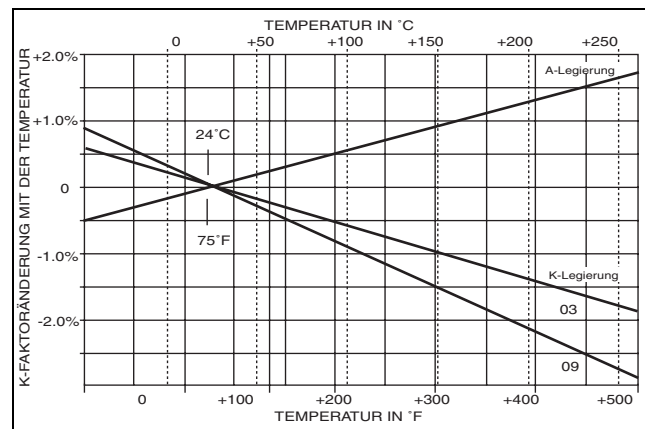


Abb. 7 - Typische K-Faktor-Änderung mit der Temperatur für A-Legierung (Konstantan) und K-Legierung (Karma)

Eine andere, wenn auch nicht sehr bedeutende Fehlerquelle ist die K-Faktoränderung mit der Temperatur. Der für DMS der Vishay Micro-Measurements spezifizierte K-Faktor wird bei Raumtemperatur (nach U.S.-Norm bei 75°F, entsprechend 24°C) gemessen, und bei anderen Temperaturen ergibt sich ein leicht unterschiedlicher K-Faktor. Bei Konstantan-DMS z. B. ist mit einer temperaturabhängigen K-Faktoränderung von etwa 0,9%/100K zu rechnen. DMS mit der Gitterlegierung K (modifizierte Karma-Legierung) zeigen ein umgekehrtes Verhalten. Die entsprechende Änderungsgröße hängt ein wenig von der S-T-C-Nummer (Temperatur-Selbstkompensation) ab, liegt aber allgemein in einem Bereich von -0,9 bis -1,8%/100K. Das Diagramm in *Abb. 7* zeigt in beispielhafter Weise die K-Faktorabhängigkeit von der Temperatur für beide DMS-Typen.

Eine komplette Eliminierung der kleinen Fehler, die durch die K-Faktoränderung mit der Temperatur entstehen, ist nicht immer machbar. Jedoch ist eine näherungsweise Korrektur, die den größten Teil des Fehlers entfernt, relativ einfach durchzuführen. Werden die Messungen zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungsverhaltens inkrementell über den gewünschten Temperaturbereich vorgenommen, kann das **differenzielle** thermische Ausgangssignal für jedes Temperaturinkrement individuell korrigiert werden. Dies geschieht derart, dass die Differenz

Bestimmung von thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten mittels DMS

der thermischen Ausgangssignale der DMS auf dem Testmaterial und dem Referenzmaterial mit dem Faktor $1/(1 + \Delta F_G)$ multipliziert wird. Dabei ist der Term ΔF_G die dezimalisierte Änderung des K-Faktors mit der Temperatur (mit Vorzeichen), die mit der Mitteltemperatur zwischen zwei inkrementellen Messungen korrespondiert. Der Wert kann dem Diagramm des DMS-Datenblatts gewöhnlich mit hinreichender Genauigkeit entnommen werden.

Es kommt vor, dass durch nur zwei Messungen bei den jeweiligen Extremen eines Temperaturbereichs der Mittelwert des differentiellen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bestimmt werden soll. In solchen Fällen kann die im vorgehenden Absatz beschriebene Korrekturmethode in gleicher Weise verwendet werden, indem man den Wert von ΔF_G für den mittleren Temperaturpunkt des Bereichs heranzieht. Allerdings muss mit einer vergleichsweise weniger wirksamen Korrektur gerechnet werden, da das Temperatureingangssignal über den Temperaturbereich unlinear ist.

Kann der Messkabelwiderstand, wie weiter oben empfohlen, niedrig gehalten werden, sollte die Signalabschwächung über den Kabelwiderstand, der in Serie mit dem DMS-Widerstand liegt, vernachlässigbar bleiben. Ist die Größe dieses Serienwiderstands jedoch $>1\%$, mag der nach größtmöglicher Genauigkeit strebende Anwender nach Korrekturmöglichkeiten suchen. Zu diesem Zweck wird das angezeigte thermische Ausgangssignal mit dem Faktor $(R_G + R_L/R_G)$ multipliziert. Es sind $R_G = \text{DMS-Widerstand}$ und $R_L = \text{Kabelwiderstand}$, der im gemeinsamen Brücken-zweig in Serie mit dem DMS liegt. Eine andere für diese Korrektur zur Verfügung stehende Möglichkeit liegt darin, am Messinstrument einen "korrigierten" K-Faktor der Größe $F_G \times R_G/(R_G+R_L)$ einzustellen. F_G ist dabei der für den angewandten DMS spezifizierte K-Faktor.

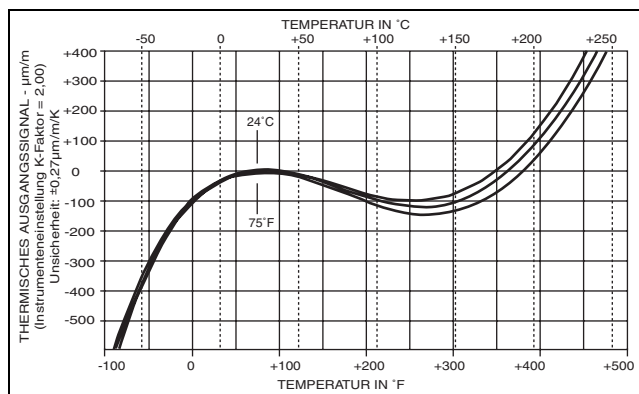


Abb. 8 - Toleranzband des thermischen Ausgangssignals von DMS mit A-Legierung, basierend auf Stichproben aus einem Herstellungslos

Die DMS-Methode zur Messung thermischer

Ausdehnungskoeffizienten beruht auf der Voraussetzung, daß bei identischem Verhalten zweier DMS (und DMS-Brückenschaltungen) jeder Unterschied des thermischen Ausgangssignals der beiden DMS nur aus dem unterschiedlichen thermischen Ausdehnungsverhalten des Testwerkstoffs und des Referenzmaterials entstehen kann. Daraus folgt offensichtlich, dass höchste Genauigkeit dann erzielt werden kann, wenn man alle Unterschiede im Verhalten der beiden DMS minimiert. Aus diesem Grund sollten, wie früher schon bemerkt, die thermischen Ausgangssignale beider DMS so identisch wie möglich sein. Es ist jedoch so, dass bei zwei identischen DMS aus dem gleichen Herstellungslos nicht speziell mit identischen thermischen Ausgangssignalen zu rechnen ist. Vielmehr, wie in Abb. 8 dargestellt, sind die thermischen Ausgangssignale aus DMS mit einer Toleranz behaftet*. Diese Toleranz kann jedoch gegen Null gebracht werden, wenn man zur Messung einen auseinandergeschnittenen Doppelgitter-DMS heranzieht (wie die DMS-Geometrie 125MG, Abb. 3), der sozusagen ein Paar "eineiiger" Zwillinge bildet. Diese Vorgehensweise ist immer dann empfehlenswert, wenn man auf höchste Messgenauigkeit abzielt. Die gleiche Argumentation gilt für die in dieser TechNote wiederholt gestellte Forderung nach Uniformität der DMS-Installation. Für beide DMS müssen identische Installationsprozeduren verwendet werden, und idealerweise sollten die Installationen beider DMS keine sichtbaren Unterschiede aufweisen.

Die übrigen Bereiche möglicher Verbesserungen, um höhere Genauigkeiten zu erreichen, sind im Wesentlichen messtechnischen Verfahrensweisen zuzuordnen. Jede Position der folgenden Auflistung kann dabei in Betracht gezogen werden, um dann eventuell entsprechende Schritte zu unternehmen:

- Stabile, genaue Instrumente zur Messung von Dehnung und Temperatur.
- Hochqualitative DMS-Installationen mit vernachlässigbarer Temperaturdrift.
- Hinreichend niedrige DMS-Speisung zur Vermeidung von DMS-Selbsterwärmung.
- Thermische Stabilisierung von Proben, DMS und Brückenverdrahtung vor jeder Messung.
- Sicherstellung des thermischen Gleichgewichts in den Proben vor jeder Messung.
- Vermeidung thermischer Spannungen in den Proben während des Aufheizens und Abkühlens.
- Sicherstellung freier Wärmedehnung der Proben durch Eliminierung von Reibungseffekten.

*Siehe TechNote TN-504-3, Seite 6 englische Ausgabe, Seiten 6 und 7 deutsche Ausgabe

Bestimmung von thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten mittels DMS

Abgesehen von der absoluten Genauigkeit der Instrumentation kann der Grad, mit dem diesen Bedingungen entsprochen wird, aus der Reproduzierbarkeit der Messdaten abgelesen werden. Gut reproduzierbare Messdaten deuten im Allgemeinen darauf hin, dass das System gut funktioniert und Zufallsfehlerquellen gut unter Kontrolle sind.

Ist also die Brauchbarkeit des Meßsystems für das Erzielen gut reproduzierbarer Messdaten sichergestellt, sollte man sich der Frage zuwenden, in welcher Weise die thermischen Ausdehnungseigenschaften eines Werkstoffs von Probe zu Probe streuen. Der übliche Zweck einer Messung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist die Bestimmung des Nominalwerts, der für den Werkstoff gilt. Aber die thermischen und andere physikalische Eigenschaften von Materialien tendieren bereits zu einer zufälligen Streuung von Probe zu Probe innerhalb eines Herstellungsloses des Werkstoffs, und noch viel mehr von Los zu Los. Da diese Variation der Werkstoffeigenschaften sich dem Einfluss des Materialanwenders entzieht, müssen statistische Methoden, basierend auf hinreichend großen Stichprobenzahlen, für adäquate Informationen über die mittleren Abweichungen und die Standardabweichungen sorgen. Mit einer besonders großen Variationsbreite der thermischen Eigenschaften muss bei Kunststoffen und Faserverbundstoffen gerechnet werden.

Die mechanischen und thermischen Eigenschaften einiger Werkstoffe (z. B. Graphit, 6Al4V Titan, Faserverbundwerkstoffe mit gerichteten Fasern) sind stark richtungsabhängig. In solchen Fällen ist die Ausrichtung der DMS auf der Probe (Gitterrichtung in Bezug auf die natürlichen Probenachsen, wie sie durch Materialwalzrichtung, Faserichtung und dergl. bestimmt sind) besonders kritisch, wenn thermische Ausdehnungskoeffizienten zu messen sind. Sind die Richtungen solcher natürlicher Achsen unbekannt, können Messungen über einen weiten Winkelbereich notwendig werden, um eine richtungsabhängige Verteilung der Ausdehnungskoeffizienten zu bestimmen, oder um einen ungefähren Mittelwert für den vorliegenden Werkstoff zu erhalten.

Methodengrenzen

Die DMS-Methode der differenzialen Dilatometrie unterliegt nur wenigen speziellen Einschränkungen. Unter diesen ist für einige Anwendungsfälle als hauptsächlichste der zulässige Temperaturbereich zu nennen. Konstantan-DMS z. B. sollten für Messungen höherer Genauigkeit lediglich in einem Temperaturbereich von etwa -45°C bis $+65^{\circ}\text{C}$ eingesetzt werden. Außerhalb dieser Grenzen wird der Einsatz von DMS mit K-Gitterfolie (modifizierte Karma-Legierung) notwendig, mit welchen höheren Genauigkeitsanforderungen unterliegende Dehnungsmessungen in einem Temperaturbereich von etwa -45°C bis $+205^{\circ}\text{C}$ durchgeführt werden können. Abhängig von den gegebenen Umständen erlaubt manchmal eine Anwendung

spezieller Techniken die Ausweitung dieser Temperaturbereiche. Eine Konsultierung der Beratungsingenieure der Vishay Micro-Measurements ist dann ratsam.

Eine mechanische Versteifung der Probe, von der DMS-Installation hervorgerufen, kann in manchen Fällen ebenfalls zu einer Anwendungseinschränkung für die DMS-Methode führen. Bei Materialien mit sehr niedrigem Elastizitätsmodul, z. B. Plastikwerkstoffen, kann die Steifigkeit des DMS mitsamt der Kleberschicht das Dehnungsfeld lokalisiert stören und zu nicht unerheblichen Fehlern führen. Bei metallischen Werkstoffen ist dieser Effekt gewöhnlich vernachlässigbar, es sei denn, die Probe wäre dünn und schmal, sodass der DMS-Querschnitt selbst in beträchtlichem Maße zum Probenquerschnitt beiträgt.

Andere Methodeneinschränkungen sind im Allgemeinen solche, die allen Messverfahren der differenzialen Dilatometrie gemein sind. So kann der thermische Ausdehnungskoeffizient des Testmaterials niemals genauer als der des Referenzmaterials bestimmt werden. Und in gleicher Weise kann die Messgenauigkeit nicht besser sein als die Genauigkeit der Instrumente, mit denen Dehnung und Temperatur gemessen und angezeigt werden.

Zusammenfassung

Diese TechNote beschreibt ein methodisch einfaches und unkompliziert anwendbares Verfahren zur Messung unbekannter thermischer Ausdehnungskoeffizienten von Werkstoffen - relativ zu bekannten Koeffizienten von Referenzmaterialien. Das Verfahren eignet sich besonders zur Anwendung in Spannungsanalyse-Laboratorien, weil keine anderen Instrumente, Techniken und Hilfsmittel benötigt werden, die dort nicht ohnehin schon verfügbar sind. Dabei ist verfahrenstechnischen Details viel Aufmerksamkeit gewidmet worden, mit dem Ziel, der Methode die größtmögliche Messgenauigkeit abzugewinnen. Allerdings sollten die empfohlenen Anwendungsverfahren sowieso den Qualitätsstandard repräsentieren, der in der DMS-Messtechnik üblich ist, wenn es gilt, Präzisionsdehnungsmessungen unter variablen Temperaturbedingungen durchzuführen. Auch unter ungünstigeren Umständen, wenn z. B. die Forderung nach schneller Verfügbarkeit von Messdaten Zeitdruck hervorruft, können mit der DMS-Methode einfach und schnell thermische Ausdehnungskoeffizienten bestimmt werden, deren Genauigkeit für viele technische Zwecke hinreichend ist.

Bestimmung von thermischen Ausdehnungs-Koeffizienten mittels DMS

Referenzen

- 1) American Society for Testing Materials, "Standard Test Method for Linear Expansion of Metals", ASTM-Standard No. B95-39.
- 2) American Society for Testing Materials, "Linear Thermal Expansion of Rigid Solids with Vitreous Silica Dilatometer", ASTM Standard No. E228-71.
- 3) Vishay Micro-Measurements, Inc., TechNote TN-504, "Strain Gage Thermal Output and Gage Factor Variation with Temperature", 1989.
- 4) Finke, T. E., and Heberling, T. G., "Determination of Thermal Expansion Characteristics of Metals Using Strain Gages", *Proceedings*, SESA (now, SEM), Vol. XXV, No. 1, 1978, pp. 155-158.
- 5) Poore, M. W., and Kesterson, K. F., "Measuring the Thermal Expansion of Solids with Strain Gages", *Journal of Testing and Evaluation*, ASTM, Vol. 6, No. 2 (March 1978), pp. 98-102.
- 6) Vishay Micro-Measurements, Inc., TechNote TN-505, "Strain Gage Selection Criteria, Procedures, Recommendations", 1989.
- 7) Vishay Micro-Measurements, Inc., Bulletin B-129, "Surface Preparation for Strain Gage Bonding", 1976.
- 8) Vishay Micro-Measurements, Inc., TechNote TN-502, "Optimizing Strain Gage Excitation Levels", 1979.
- 9) Vishay Micro-Measurements, Inc., TechNote TN-509, "Errors Due to Transverse Sensitivity in Strain Gages", 1982.

Anhang

I. Spezifikationen des thermischen Ausdehnungskoeffizienten für das Referenzmaterial Titansilikat, Code 7971 ULET™, CORNING GLASS WORKS

Kontrollgrenzen: +5°C bis +35°C 0,00 ±0,03 x 10⁻⁶/K

Typische Werte: 0°C bis +200°C 0,03 ±0,03 x 10⁻⁶/K

-100°C bis +200°C -0,03 ±0,03 x 10⁻⁶/K.

Toleranz innerhalb einer Probe des Materials, geliefert von der Vishay Micro-Measurements, Bestell-Nr. TSB-1.

+5°C bis +35°C 0,00 ±0,015 x 10⁻⁶/K

II. Streuung des thermischen Ausgangssignals von DMS der Vishay Micro-Measurements

Alle Angaben basieren auf einer Konfidenzwahrscheinlichkeit von 2σ oder 95% über einen Temperaturbereich von 0°C bis +175°C.

Linear-DMS, A-Legierung (Konstantan), Katalog für Spannungsanalyse-DMS: ±0,27µm/m/K.

Linear-DMS, K-Legierung (modifizierte Karma-Legierung), Katalog für Spannungsanalyse-DMS: ±0,45µm/m/K.

DMS-Typ EA-XX-125MG-120 mit je einem Gitter auf Referenzmaterial Code 7971 ULET™ (TSB-1) und dem Testmaterial: ±0,05µm/m/K.

DMS-Typ WK-XX-125MG-350 (Anwendung wie vorhergehender Typ): ±0,10µm/m/K.

III. Korrektur für die Querdehnungsempfindlichkeit

Man multipliziere den Klammerausdruck $[\varepsilon_{T/O(G/S)} - \varepsilon_{T/O(G/R)}]$ in Gleichung (6) mit $[1 - 0,285 k_t / (1 + k_t)]$. k_t ist die Größe der Querdehnungsempfindlichkeit des DMS, in % auf dem DMS-Datenblatt angegeben. Muss hier in dezimaler Form benutzt werden. *Diese Korrekturrechnung gilt nur für isotrope Werkstoffe.*

IV. Korrektur für die Änderung des K-Faktors mit der Temperatur

Man multipliziere für jedes Temperaturinkrement den Klammerausdruck $[\varepsilon_{T/O(G/S)} - \varepsilon_{T/O(G/R)}]$ in Gleichung (6) mit $1/(1 + \Delta F_G)$. Der Term ΔF_G korrespondiert mit dem Temperaturmittel des Temperaturinkrements, für das die Messungen des thermischen Ausgangssignals gelten.

V. Korrektur für den Kabelwiderstand (R_L , bezogen auf einen einzelnen DMS (Viertelbrücke) in 3-Leiterschaltung

R_L ist der Widerstand eines einzelnen Leiters der 3-Leiterschaltung. Um die mühsame Aufgabe, jeden einzelnen Messwert um den Faktor $(R_G + R_L)/R_G$ zu korrigieren, zu umgehen, ist es einfacher, von vornherein am Instrument einen korrigierten K-Faktor einzustellen. Der korrigierte K-Faktor berechnet sich zu: $F_I = F_G \times R_G / (R_G + R_L)$.

Zur Beurteilung der Notwendigkeit einer Korrektur hier die Kabelwiderstände einiger typischer DMS-Messkabel der

Vishay Micro-Measurements:

326-DFV, 326-DTV: 0,141Ω/m.

330-DFV, 330-FFE, 330-FJT, 330-FTE: 0,354Ω/m.

Im Anhang benutzte Formelzeichen:

k_t = Querdehnungsempfindlichkeit des eingesetzten DMS (auf DMS-Datenblatt in Prozent angegeben).

F_G = K-Faktor des eingesetzten DMS (auf DMS-Datenblatt angegeben).

F_I = Am Instrument einzustellender korrigierter K-Faktor.

R_L = Leiterwiderstand

R_G = DMS-Widerstand