

Messen hoher Dehnungen

Einführung

Die experimentelle Analyse von Spannungen in Konstruktionswerkstoffen nötigt manchmal zur Versuchsführung bis zum Totalausfall des Bauteils. In solchen Fällen, besonders wenn es sich um duktile Materialien handelt, gehen dem Bruch häufig große lokale Dehnungen voraus, deren Größe für den Versuchsingenieur von besonderem Interesse ist.

Hochdehnungsmessungen stellen an die DMS-Installation außergewöhnliche Anforderungen und erfordern spezielle DMS/Kleber-Kombinationen sowie besondere Maßnahmen zur Oberflächenvorbereitung. Dieses Instruktions Bulletin gibt Empfehlungen für die Wahl von DMS und Kleber, der Oberflächenvorbereitung, der DMS-Klebung und Verdrahtung und der Auswahl der Schutzabdeckung für die Messung hoher Dehnungen.

Die Größen hoher Dehnungen werden üblicherweise in Prozent ausgedrückt: 1% Dehnung entspricht $10000\mu\text{m/m}$ und 5% Dehnung entspricht $50000\mu\text{m/m}$. Die Angabe für die maximale Dehnung, die ein DMS messen kann, basiert auf einer einmaligen Zugbelastung. Bei hohen zyklischen Dehnungen muss von einem wesentlich niedrigeren Wert als dieser Maximaldehnung ausgegangen werden, da hier die Ermüdungsgrenzen der DMS-Gitterfolie eine Rolle spielen. Entsprechende Angaben finden sich in dem Instruktions Bulletin TN-508 "Ermüdungsverhalten von Micro-Measurements-DMS" von Vishay Micro-Measurements.

DMS-Auswahl

Die Auswahl eines entsprechenden DMS für die Anwendung bei Hochdehnungsmessungen basiert auf den zu erwartenden Dehnungspegeln und der Versuchstemperatur. Normalerweise werden für solche Messungen DMS mit Polyimidträger (E) ausgesucht, da dieser überlegene Dehnfähigkeiten zeigt und sein Temperatureinsatzbereich den Anforderungen der meisten Hochdehnungsmessungen entspricht. Der E-Träger ist lieferbar mit Konstantan-DMS (Gitterlegierung A) und mit DMS aus der Gitterlegierung P (Konstantan getempert).

DMS der Serie EA

Richtig installierte und verdrahtete EA-DMS (Konstantan-Gitter auf Polyimidträger) sind geeignet zur Messung von Dehnungsgrößen von 3% bis 5%. Während DMS mit aktiven Gitterlängen von 3mm oder länger bis zu 5% Deh-

nung mitmachen, werden solche mit kürzeren Gitterlängen auf Dehnungen bis zu 3% begrenzt bleiben. Da die meisten Konstruktionswerkstoffe (z. B. Metalle) bereits bei wesentlich niedrigeren Dehnungen plastische Verformungen zeigen werden, sind DMS der Serie EA eine populäre Wahl, wenn es darum geht, Informationen über die Streckgrenze solcher Materialien zu gewinnen.

DMS der Serie EP

Diese DMS sind empfohlen, wenn die zu messenden Dehnungen über die bei der EA-Serie genannten 3% oder 5% gehen. Die Gitterfolie P ist Konstantan, das zum Erlangen einer sehr hohen Duktilität speziell wärmebehandelt wird. Solche DMS, wenn richtig installiert und verdrahtet, können für Dehnungen von 20% ($200000\mu\text{m/m}$) und mehr herangezogen werden. Ebenso wie bei EA-DMS, werden kürzere Gitterlängen niedrigere Dehnungsgrenzen zeigen.

Optionen

Jedwede Verdrahtungsoption, also z. B. Option W (gekapselte DMS mit integrierten Lötstützpunkten) oder Option LE (gekapselte DMS mit integrierten Anschlussdrähtchen), wird den maximalen Dehnungsbereich der EP-DMS einschränken. Da aber die Dehnungsgrenzen der EA-DMS sowieso moderater sind und die Optionen in deren unteren Bereichen kaum Probleme darstellen, sind sie für die Wahl von EA-DMS selten ein Hindernisgrund.

Auswahl des Klebers

Hochdehnungsmessungen bedeuten für das angewandte Klebersystem erhebliche Anforderungen. Der Kleber muss eine hinreichende Steifigkeit besitzen, um DMS-Relaxation (Kriechen) zu verhindern, andererseits aber flexibel genug sein, dass er hohen Dehnungen standhält, ohne Risse zu bilden. Empfohlene Kleber sind in der folgenden Auswahltafel aufgelistet.

Oberflächenvorbereitung

Die Wahl und Durchführung einer aufgabengerechten Oberflächenvorbereitung ist ebenso wichtig, wie die der Einsatz des richtigen Klebers und DMS. Hochdehnungsmessungen fordern ein noch genaueres Befolgen der empfohlenen Vorgehensweisen, als es bei normalen Dehnungsmessungen in elastischen Werkstoffbereichen ohnehin erforderlich ist.

Im Instruction Bulletin B-129 "Oberflächenvorbereitung

Messen hoher Dehnungen

zur DMS-Klebung" von Vishay Micro-Measurements sind Verfahren zur Oberflächenvorbereitung für eine Vielzahl von Bauteilwerkstoffen dargestellt. Diese Verfahren ergeben eine glatte, saubere Oberfläche, die bei der Vorbereitung gewöhnlich in einer Richtung abgeschmirgelt ist. Wegen der bei Hochdehnungsmessungen größeren Kräfte, die auf die Kleberschicht einwirken, muss die Oberfläche im Sinne der folgenden Punkte weiter bearbeitet werden, um eine noch verbesserte Klebefestigkeit zu erreichen:

1. Die Oberfläche des Messobjekts vorbereiten wie in Bulletin B-129 beschrieben.
2. Die Oberfläche unter 45° zur Dehnungsrichtung schmirgeln. Bei weichen Werkstoffen (z. B. Aluminium) mit Schmirgelpapier der Körnung 320, bei härteren Werkstoffen (z.B. Stahl) Körnung 100.
3. Mit dem Schmirgelpapier unter 90° zum ersten Schmir-

gelvorgang (Punkt 2) leicht schmirgeln. Es ergibt sich ein kreuzweises Schmirgelmuster. Die gewünschte effektive Rautiefe sollte ca. 6,5µm sein.

4. Den in Bulletin B-129 beschriebenen Entfettungsvorgang wiederholen.
5. Die Oberfläche mit M-Prep Conditioner A von Vishay Micro-Measurements behandeln (wenn mit Werkstoff kompatibel, siehe Bulletin B-129), mit Wattestäbchen verreiben und mit Gazetupfer oder Reinigungspapier trocken reiben.
6. Behandelte Oberfläche mit M-Prep Neutralizer 5A von Vishay Micro-Measurements chemisch neutralisieren (wenn mit Werkstoff kompatibel, siehe Bulletin B-129), mit Wattestäbchen verteilen und mit Gazetupfer oder Reinigungspapier trocken reiben.

Kleber-Typ	Allgemeine Beschreibung	Empfohlene Aushärtung	Dehnfähigkeit		
			-195°C	+24°C	+95°C
M-Bond 200	Speziell getestete Art von Zyanoacrylat, zertifiziert für DMS-Anwendung. Schnell raumtemperaturhärtend.	3 Min. bei 24°C	Entfällt	6% bis zu 15% bei Installationen, die nicht älter als 15 Min. sind	Entfällt
M-Bond AE-10	2-Komponenten Epoxy-System, 100% Festbestandteile. Raumtemperaturhärtend. Transparent. Mittlere Viskosität	6 Std. bei 24°C	1%	6 - 10%	10 - 15%
M-Bond AE-15	2-Komponenten Epoxy-System, 100% Festbestandteile. Aushärtend bei leicht erhöhten Temperaturen. Mittlere Viskosität	2 Std. bei 65°C	2%	15%	15%
M-Bond GA-2	2-Komponenten teilgefülltes Epoxy-System. 100% Festbestandteile. Kann bei Raumtemperatur ausgehärtet werden. Höhere Viskosität als die AE-Systeme.	6 Min. bei 24°C. Danach 1 Std. bei 50°C.	4%	10 - 15%	15 - 20%
M-Bond A-12	2-Komponenten gefülltes Epoxy-System. 100% Festbestandteile. Pastöse Konsistenz. Speziell für Dehnungen über 10%.	2 Std. bei 75°C	Entfällt	15 - 20%	15 - 20%

Viele Materialien oxidieren in der Umgebungsluft rasch. Wird Oxidation zugelassen, wird das die Klebefestigkeit und die Dehnfähigkeit stark beeinträchtigen. Die DMS-Klebung sollte daher so schnell wie möglich nach Beendigung der Oberflächenvorbereitung geschehen.

DMS-Klebung

Den Standardprozeduren zur DMS-Klebung, wie sie in den Anweisungen für den gewählten Kleber beschrieben sind, ist zu folgen.

DMS-Verdrahtung

Da hohe Dehnungen relativ hohe Verschiebungswege mit sich bringen, empfiehlt sich die Anwendung separater Lötstützpunkte. Der DMS sollte zum Lötstützpunkt mit dünnen Einzelleiterdrähtchen verdrahtet werden, mit einem Durchmesser von nicht mehr als 0,25mm (AWG 30), wie in Abb. 1 gezeigt. Der DMS sollte während des Lötens mit Klebeband abgedeckt werden (PDT-1 von Vishay Micro-Measurements), um das Weiterfließen des Lots in Richtung der Lötflächenenden zu vermeiden.

Adäquate Zugentlastungsschlaufen, wie in Abb. 1 illustriert, sind bei Hochdehnungsmessungen besonders wichtig. Die Verbindungsdrähtchen sollten unter einem Winkel von 90° zur Gitterrichtung (Richtung der maximalen Hauptdehnung) aus den Lötflächen des DMS herausgeführt werden.

Messen hoher Dehnungen

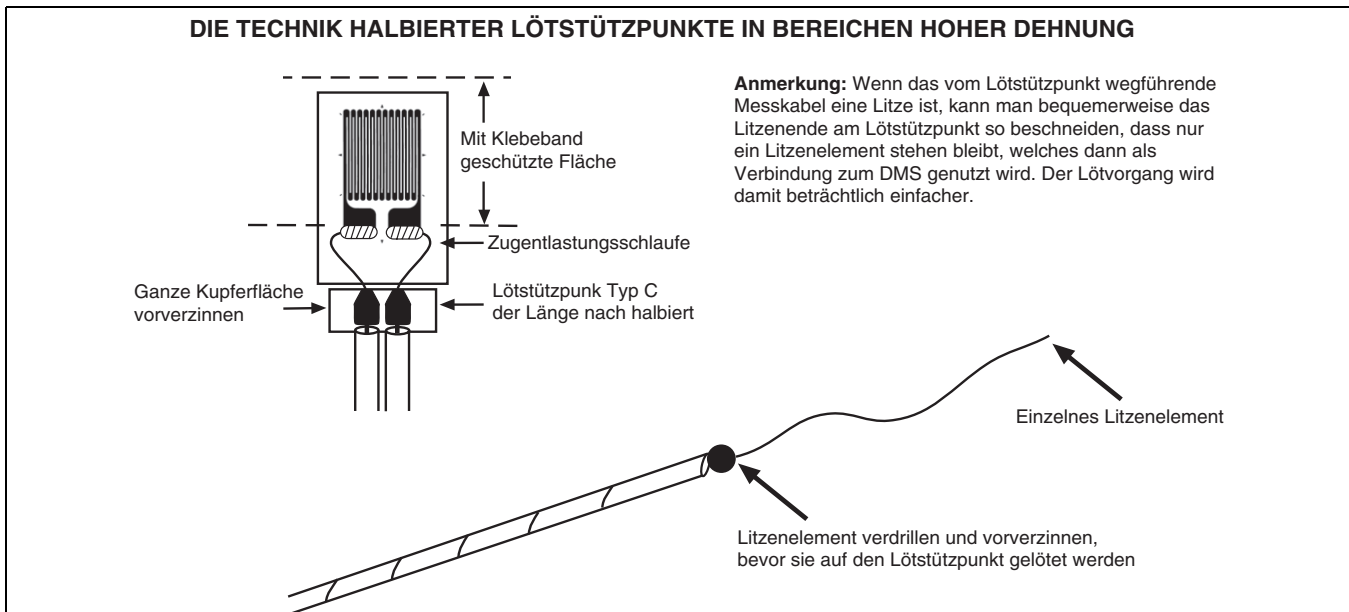


Abb.1

Nach dem Löten sollten Klebebänder und Flussmittelreste durch großzügiges Abwaschen mit Rosin Solvent (Flussmittellösungsmittel) entfernt werden (RSK-1 von Vishay Micro-Measurements).

Linearität der DMS

Die Diskussion von Hochdehnungsmessungen mit DMS wäre nicht komplett, würde man die Frage ihres Linearitätsverhaltens unter plastischen Verformungen nicht einbeziehen.

Obwohl Konstantan eine der sich am linearsten verhaltenen Gitterlegierungen ist, zeigt es doch bei hohen Dehnungen kleine Änderungen des K-Faktors.

Ohne hier ins Detail zu gehen kann theoretisch gezeigt werden, dass der K-Faktor sich einem Wert von $2 + \epsilon$ nähert, wenn die Gitterlegierung über ihren elastischen Bereich hinaus gedehnt wird. Der Elastizitätsgrenze von Konstantan liegt in etwa bei einer Dehnung von 0,5% ($5000\mu\text{m}/\text{m}$).

Folgt man der oben genannten $2 + \epsilon$ Gesetzmäßigkeit für den K-Faktor und setzt man eine Dehnung von 10% voraus, läge dieser bei nahe 2,1 im Falle einer Zugdehnung und bei nahe 1,9 für die gleiche Druckdehnung. 20% Dehnung vorausgesetzt, läge der K-Faktor für den Zugdehnungsfall bei ca. 2,2 und bei Druckdehnung wäre er ca. 1,8.

Diese Werte können als theoretisch richtig betrachtet werden. Nach unserem besten Wissen sind sie allerdings noch nicht experimentell belegt worden.

Messinstrumente

In der Regel werden für Dehnungsmessungen mit DMS Wheatstone'sche Brückenschaltungen eingesetzt. Solchen Schaltungen ist bei großen Widerstandsänderungen eine

bestimmte Nichtlinearität eigen. Korrekturverfahren dafür werden in dem Instruktions Bulletin TN-507 "Fehler aufgrund der Nicht-Linearitäten von Wheatstone-Brückenschaltungen" von Vishay Micro-Measurements gegeben.

Mögliche Installationsprobleme

Ablösen des geklebten DMS

Unter der Voraussetzung, dass der richtige Kleber eingesetzt wurde, ist das Ablösen von DMS vor Erreichen der Maximaldehnung gewöhnlich auf eine verschmutzte Oberfläche oder auf unzureichende Oberflächenvorbereitung zurückzuführen. Eine visuelle Untersuchung der Klebefläche wird das in der Regel bestätigen. Ausgehärteter Kleber am DMS und nicht auf der Bauteiloberfläche deutet im Allgemeinen auf nicht regelgerechte Oberflächenvorbereitung hin.

Man muss sich bewusst sein, dass Klebeverbindungen mit manchen Werkstoffen, z. B. Polyäthylen, schwierig sind und das Erreichen der maximalen Dehnung vor dem Versagen der Klebung nicht möglich ist.

Delaminierung der DMS-Anschlussfahnen

Delaminierung der DMS-Anschlussfahnen hat seinen Grund meistens in zu großen Lötmassen. Diese rufen einen großen Versteifungseffekt hervor, der zu hoher lokaler Inflexibilität und zur Delaminierung führt. Eingrenzung der Lötmassen mittels Klebeband ist hier hilfreich (siehe **DMS-Verdrahtung**).

Zu hohe Löttemperatur oder Lötstützpunkte, die sich zu nahe bei den DMS-Anschlussfahnen befinden, können ebenso zu diesem Problem beitragen.

Messen hoher Dehnungen

Gitterbruch (Offener Stromkreis)

Angenommen, die gemessenen Dehnungswerte bewegen sich innerhalb der Dehnungsgrenzen des DMS, und die Klebung hat nicht versagt, dann sind vorzeitige Gitterbrüche oft das Resultat lokaler Dehnungsspitzen innerhalb der vom DMS bedeckten Fläche. Da der DMS ein mittelwertbildender Sensor ist, wird die angezeigte Dehnung immer der Mittelwert der vom Messgitter überdeckten Dehnung sein. Steile Dehnungsgradienten können lokalisierte Dehnungsschäden hervorrufen, obwohl die angezeigte Dehnung gut innerhalb der Dehnungsgrenzen des DMS geblieben war.

Gitterschäden können auch aus Dehnungskonzentrationen resultieren, die von Einschlüssen in der Kleberschicht hervorgerufen werden, z.B. von ungemischten Kleberpartikel, Schmutzpartikeln, etc. Das gilt auch für unebene Kleberschichten aufgrund von irregulären Bauteiloberflächen oder ungleichmäßigem Anpressdruck.

Dehnungen über 20%

Dehnungsmessungen, besonders solche auf Plastik- oder Gummiwerkstoffen, können die Dehnfähigkeit von DMS der Serie EP übersteigen. Solche Messungen können aber mit einfachen Biegevorrichtungen, oft Dehnungstransformator genannt, durchgeführt werden. Deren Prinzip ist es, die Dehnung am DMS zu reduzieren, herunter zu transformieren. Diese Vorrichtungen sind in den Abb. 2A und 2B dargestellt. Auf der Ober- und Unterseite der Vorrichtung werden DMS installiert, und sie wird dann auf das Bauteil aufgeklebt oder punktgeschweißt, je nachdem welches Bauteilmaterial vorliegt. Der Weg, den die "Füße" des Dehnungstransformators gegeneinander zurücklegen, ruft dann in den DMS entsprechende Widerstandsänderungen hervor. Sind die DMS in Wheatstone'sche Halbbrücken oder Vollbrücken verschaltet, werden die Widerstandsänderungen additiv sein und das verfügbare Dehnungssignal vergrößern. Wann immer die Platzverhältnisse es gestatten, sollten Vollbrückenschaltungen bevorzugt werden, weil das effektive Brückenausgangssignal doppelt so groß wie bei der Halbbrücke ist, für den gleichen Weg der Vorrichtungsfüße.

Der Dehnungstransformator verhält sich normalerweise unlinear, und es ist daher sinnvoll, ihn vor der Installation anhand eines bekannten Weges zu kalibrieren. Während der Kalibrierung wird der DMS-Nullpunkt überwacht; ein dauernder Nullpunktversatz kann gewöhnlich auf lokale plastische Verformungen im Blech des Dehnungstransformators zurückgeführt werden. Sollte derartiges beobachtet werden, muss die Kalibrierung mehrmals wiederholt werden, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen.

Einen Dehnungstransformator anzuwenden ist dann besonders sinnvoll, wenn in einem Bauteil sehr hohe Dehnungen gemessen werden sollen oder wenn es eigentlich schon um Wegmessungen geht, wie z.B. bei Dehnungsfugen zwi-

schen Bauteilkomponenten oder bei Öffnungsbewegungen von Rissen.

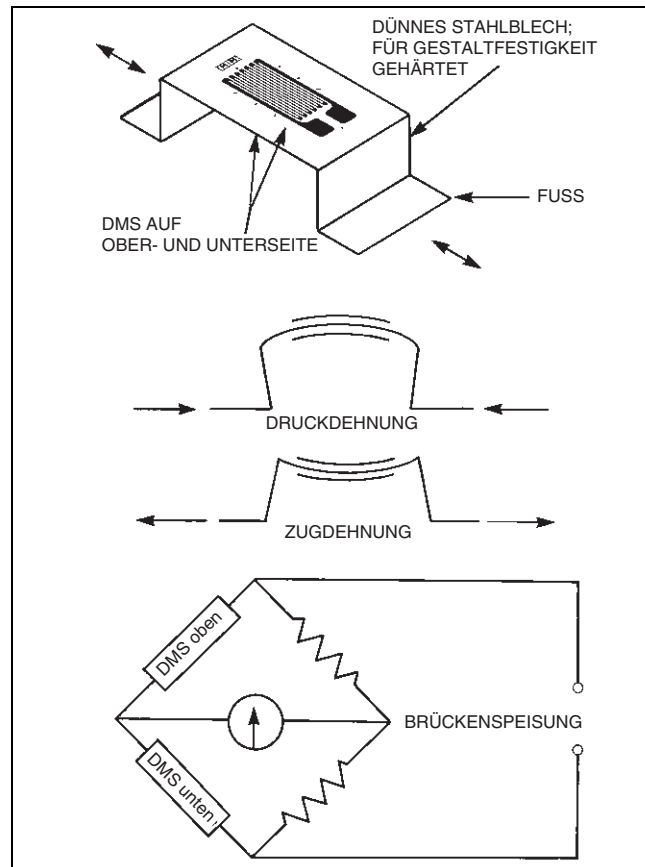


Abb. 2A - Dehnungstransformator (Halbbrücke)

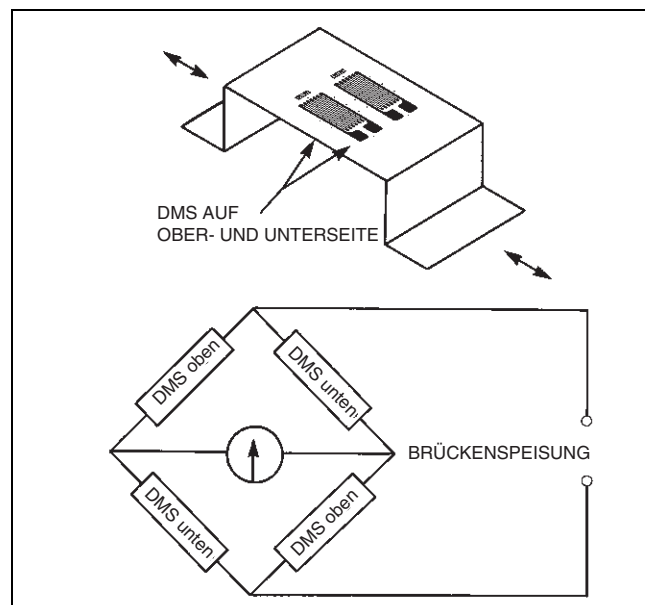


Abb. 2B - Dehnungstransformator (Vollbrücke)