



Anwendungshinweise - APPLIKATION Note - AN-01

DMS-APPLIKATIONEN AUF FASERVERBUNDWERKSTOFFEN

DMS-Applikationen für allgemeine Dehnungs/Spannungsanalyse an Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen

PROBLEMSTELLUNGEN

1. Welche Oberflächenvorbereitung ist zu empfehlen?
2. Was kann passieren, wenn Partikel, die bei der Oberflächenvorbereitung abgearbeitet sind, nicht entfernt werden?
3. Welcher Kleber wird bei Oberflächen mit großer Rauigkeit empfohlen?
4. Was muß getan werden, wenn eine Ein-Schritt-Klebertechnik nicht durchführbar ist?
5. Können dicke Kleberschichten bei Dehnungsmessungen Probleme hervorrufen?
6. Wie können rauhe Oberflächen gefüllt werden, wenn sie geneigt oder vertikal vorliegen?
7. Welche Kleber werden bei kryogenen Umgebungstemperaturen empfohlen?
8. Welcher Kleber wird für Temperaturen über 370 °C empfohlen?
9. Welcher DMS-Typ wird für statische Messungen auf Composite-Werkstoffen empfohlen?
10. Ist der Einsatz von 1000 Ω -DMS trotz höherer Kosten gerechtfertigt?
11. Welche Nachteile hätten 1000 Ω -DMS?
12. Welche DMS werden für Ermüdungsmessungen bei Compositen empfohlen?
13. Mit welchem Ermüdungsverhalten ist bei MM-Klebern zu rechnen?
14. Welche Kleber und DMS werden bei Hochdehnungsmessungen eingesetzt?
15. Welche Temperatur-Kompensation (S-T-C-Nummer) gilt für glasfaser- und kohlefaserverstärkte Werkstoffe?
16. Welcher Kleber wird für "grüne" Composite zur Erlangung von Initialdehnungswerten bei Temperaturen bis 150 °C empfohlen?
17. Können kommerziell erhältliche "Hochtemperatur"-Zyanoacrylate bei Messungen auf "grünen" Compositen eingesetzt werden?
18. Welche DMS-Typen werden normalerweise beim Test "grüner" Composite bis 150 °C eingesetzt?

MEASUREMENTS GROUP MESSTECHNIK GmbH
Lochhamer Schlag 6 - D-82166 Lochham

VORBEMERKUNG

Diese Anwendungshinweise sind von unserem Application Engineering Department zusammengestellt worden und basieren auf den Erfahrungen vieler vertrauenswürdiger Anwender und auf zahllosen Diskussionen mit meßtechnisch und materialkundlich versierten Einzelpersonen, sowohl von der Measurements Group, als auch von anderen Organisationen. Allen jenen, die mit ihrem Wissen und ihrem praktischen Know-how zur Zusammenstellung dieser Anwendungshinweise beigetragen haben, sei hiermit Dank gesagt.

Es ist uns wohl bewußt, daß andere und weitere Lösungen für die in den Anwendungshinweisen angeführten Problemstellungen existieren. Davon ausgehend, daß eine Anwendung der gegebenen Empfehlungen nicht automatisch zum Erfolg führen muß, sollten sie doch brauchbar und zielführend sein, wenn man die große Anzahl veränderlicher Einflußgrößen beim Umgang mit Faserverbundwerkstoffen, ihre Zusammensetzung, die Erfahrung und das Geschick des Meßtechnikers und schließlich die jeweils bestehenden Versuchsanforderungen gebührend berücksichtigt. Bei den meisten DMS-Anwendungen ist es gewöhnlich die sorgfältige Beachtung wichtiger Details, welche den Unterschied zwischen Erfolg und mißlungenem Versuch ausmacht.

EINFÜHRUNG

Der folgende Abschnitt ist begrenzt auf die Diskussion von DMS-Anwendungen auf Strukturen und Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen. DMS-Anwendungen auf anderen heterogenen Materialien wie Beton, Asphalt oder gummierte Gewebe sind hier nicht berücksichtigt.

DMS-Applikationen auf Faserverbundwerkstoffen (Compositen) sind im allgemeinen von komplexerer Natur als es bei metallischen Werkstoffen der Fall ist. Das liegt in der Regel an den zahlreichen variablen Einflußgrößen, die gewöhnlich berücksichtigt werden müssen. Stark richtungsabhängige Materialkennwerte, wie z.B. Festigkeit, Elastizitäts-Modul, Poisson'sche Zahl, thermischer Ausdehnungskoeffizient und unterschiedliche Absorptionsfähigkeiten für Feuchtigkeit sowie werkstoff-eigenartige Ermüdungscharakteristika beeinflussen das Einsatzverhalten dieser Werkstoffe entscheidend. Materialoberflächen, auf die DMS zu kleben sind, unterscheiden sich in Rauigkeit und Textur oft stark. Relativ grobe Glasfaser- oder Kevlarstrukturen bei Behälter oder Druckbehälterkonstruktionen, feinere Faser-Gewebestrukturen - alle mehr oder weniger an der Oberfläche freiliegend - , reine Matrixoberflächen, also eine mehr oder weniger dicke Kunststoffschicht mit erst weiter darunter liegender Faserstruktur -, alles das kommt vor und hat Einfluß auf die Art und Weise der DMS-Applikation.

Die folgenden Fragen sind typisch für DMS-Applikationen bei der allgemeinen Dehnungs- oder Spannungsanalyse an Compositen. In den Antworten wird davon ausgegangen, daß ausschließlich Präzisionsmeßmittel und geprüftes, dem DMS und der Meßaufgabe adäquates Zubehör der Measurements Group oder von ihr empfohlene Materialien zum Einsatz kommen.

1. WELCHE OBERFLÄCHENVORBEREITUNG IST ZU EMPFEHLEN?

Das Ziel der Oberflächenvorbereitung bei DMS-Applikationen ist es, eine gleichförmige, praktisch glatte Oberfläche zu schaffen, die frei von Verunreinigungen und mit Klebern und DMS hoher Qualität kompatibel ist. Die prinzipiellen Arbeitsschritte der Oberflächenvorbereitung sind Entfetten, Aufräumen und Reinigen. Das Entfetten geschieht mit einem geeigneten Lösungsmittel, bei dem darauf geachtet werden muß, daß der Composite-Werkstoff selbst und seine Komponenten (Matrix und Faser) gegen das Lösungsmittel unempfindlich sind. Gewöhnlich wird dazu eine Auswahl unter den Entfettungsmitteln CSM-1A oder GC-6 (Isopropyl-Alkohol) getroffen.

Hinreichend saubere Oberflächen zu schaffen ist im allgemeinen einfach, wobei die beachtenswerteste Ausnahme Bauteile aus Compositen darstellen, deren Oberflächen während der Herstellung mit Silikonfetten als Trennmittel in Berührung gekommen sind oder solche, die während des Einsatzes mit Silikonölen- oder fetten verschmutzt worden sind. Leichte Oberflächenkontaminationen dieser Art mögen sich durch mehrmaliges Abwaschen und Trocknen mit heißem (90 -95 °C) M-Prep Conditioner A entfernen lassen. Ansonsten ist für das Entfernen dieser Verunreinigungen den Anweisungen des Herstellers der Silikonöl/Fett-Produkte zu folgen. Auf jeden Fall aber sollte das Entfernen von Silikonöl/Fett-Kontaminationen nicht in der Nähe des Bereichs geschehen, in dem die DMS-Applikationen vorgenommen werden sollen. Das gilt für Labor und Meßfeld gleichermaßen.

DMS-Schutzabdeckmittel auf der Basis von Silikon-Kautschuk (Silikon-Dichtmasse) sollten nicht mit den o.g. Verunreinigungen verwechselt werden. Es sind die freien Silikone in Silikonölen und -fetten, die das Problem darstellen. Einige Klebetechniken betreffende Vorschriften im Bereich Luft- und Raumfahrt verbieten die Anwendung von RTV Silikongummi wegen der genannten Silikon-Problematik. Die Argumentation für ein solches Verbot kann, was unsere Abdeckmittel **M-Coat C**, **3140-RTV** und **3145-RTV** anbelangt (alle auf Silikon-Kautschuk-Basis), leicht durch einen einfachen Test widerlegt werden. Man benetze ein Metallprobe mit dem Abdeckmittel, kratze es danach ab und installiere auf die vorher benetzte Fläche einen DMS unter Einsatz der normalen Oberflächenvorbereitungstechnik. Wäre die Oberfläche danach noch mit freien Silikonen verunreinigt, würde das in einer sehr schlechten Klebefestigkeit resultieren. Unter Zugdehnung würde der DMS ein sich rasch und erheblich verringerndes Ausgangssignal zeigen.

Composite, bei denen gewickeltes Fasermaterial oder grobes Gewebe direkt an der Oberfläche liegt und nicht durch genügend Matrixmaterial bedeckt ist, bereiten die meisten Schwierigkeiten, wenn es gilt, das für eine DMS-Applikation matt-glatte Oberflächenfinish zu schaffen. Versucht man mit dem üblichen Schmirgelpapier zu schmirgeln, ergibt sich die Gefahr durch die dünne Lage Matrixmaterial) durchzuschmirgeln und die darunter liegenden Fasern zu verletzen. Außerdem wird man in der Regel bei rauen Oberflächen die Rauigkeits“täler“ ungeschmirgelt lassen. In solchen Fällen z. B. bei richtungsorientierten Faserwicklungen, haben sich feingekörntes Bimssteinpulver oder Aluminapulver, aufgenommen mit feuchten Gazetupfern als hilfreich erwiesen obwohl der Abreibprozess mit diesen Mitteln relativ langwierig ist. Haushaltsschwämme (z.B. Scotch-Brite) sind auf solchen und ähnlichen Oberflächen erfolgreich angewandt worden. Schließlich haben sich Abstrahlvorrichtungen als für diese Zwecke besonders gut funktionierend herausgestellt.

Die dabei eingesetzten Vorrichtungen kommen meistens aus der Dentaltechnik. Kleine Hand-Strahldüsen fassen ein sehr gezieltes und feinfühliges Abstrahlen zu. Dabei ist wichtig daß mit sauberer und trockener Preßluft (Öl- und Kondenswasserfilter!) oder Treibmittel wie Kohlendioxyd oder Stickstoff gearbeitet wird. Das Strahlgut ist Alumina-Pulver mit einer Körnung von 50 µm oder kleiner. Es ist ein nur sehr niedriger Strahlendruck notwendig, die Strahldüse sollte unter einem Winkel von 45° bis 69° auf die Oberfläche zeigen und es sollte aus einem Abstand von 25 - 50 mm gestrahlt werden. Um übermäßige lokale Erosion auf der Oberfläche zu vermeiden, sollte die Strahldüse ähnlich wie eine Farbspraydüse beim Lackieren geführt werden. Danach wird die Oberfläche mit einer steifborstigen Bürste von Staub und Partikeln gereinigt damit durch Augenschein festgestellt werden kann, ob das gewünschte matte Oberflächenfinish erzielt worden ist. Mittels Klebebandmasken können scharf begrenzte Oberflächenbereiche für die derartige Behandlung definiert werden.

Bei bereits glatten Oberflächen, also solchen mit dicken, glatten Matrixschichten oder bei im Strangzugverfahren hergestellten Bauteilen, ist einfaches Schmirgeln mit Schmirgelpapier der einfachste Weg. Meistens wird dazu Schmirgelpapier mit 400er Körnung ausgewählt, aber dieses fängt durch den Kunststoffabrieb sehr schnell an zu schmieren und wird damit uneffektiv. Besser ist es daher gröbere Körnungen zu wählen (220 oder 320), aber selbst diese Papiere müssen für einen Schmirgelvorgang häufiger ausgewechselt und durch frische ersetzt werden.

An dieser Stelle scheint es wichtig eine Bemerkung bezüglich eines möglichen Sonderfalls einzuschalten. Es gibt gelegentlich Vorschriften, die ein wie immer geartetes reibendes oder schleifendes Bearbeiten der Oberfläche verbieten. Es ist dies für Glas oder hochpolierte, hochdichte Aluminiumoxyd-Werkstoffe eine durchaus realistische Forderung, aber solche Materialien können leicht chemisch so gereinigt werden, daß in der Folge eine hinreichend feste Klebeverbindung für DMS entsteht, besonders unter Berücksichtigung der Tatsache, daß in solchen Fällen die zu messenden Dehnungspegel eher niedrig liegen. Solche Vorschriften ergeben aber dann ein Problem, wenn die Bauteiloberfläche aus glatt-glänzendem, lichtreflektierendem, konventionellem Harz besteht.

Wird eine solche Oberfläche nicht abrasiv behandelt, der Oberflächenglanz nicht gebrochen, wird sie nicht chemisch angeätzt (oder z. B. flamm-satiniert, was bei Polyäthylen-Oberflächen möglich ist), führt das zu nur sehr oberflächlichen Klebeverbindungen, und der DMS wird sich wahrscheinlich von der Oberfläche lösen, bevor die Dehnungsmessung beendet ist. Um den Kompromiß einer leichten Abraslon mit Aluminapulver oder Bimsstein-Pulver mit 600er Körnung (GC-5) wird man also kaum herkommen.

Im Measurements Group Instruktions-Bulletin B-129 "Oberflächenvorbereitung für DMS-Klebungen" wird ein letzter Reinigungsschritt mit wäßrigen Lösungen wie M-Prep Conditioner A (MCA-1A) oder M-Prep Neutralizer 5 (MN5A-1) empfohlen. Diese können natürlich bei Compositen grundsätzlich eingesetzt werden, aber es besteht ein generelles Bestreben, Wasser auf Materialien zu vermeiden, die eine gewisse Affinität dafür zeigen. Glasfaserverstärkte Epoxide sind für eine solche Affinität notorisch. Allerdings stellt sich die Besorgnis hinsichtlich der Anwendung der genannten und ähnlicher Reagenzien wohl als etwas übertrieben dar, wenn man bedenkt, daß diese in der Regel nur sehr kurze Zeit mit der Oberfläche in Kontakt bleiben, dann sorgfältig abgewischt werden und dem Abwischen noch eine Warmlufttrocknung folgt, wie es gute Praxis ist.

Für Lösungsmittel, die zur Oberflächenvorbereitung herangezogen werden, muß sichergestellt sein, daß sie nicht mit der Werkstoffoberfläche reagieren. Isopropyl-Alkohol erfüllt in vielen Fällen diese Forderung. Bei vielen Composite-Oberflächen reicht eine sorgfältige abrasive Oberflächenbearbeitung (Schmirgeln, Abstrahlen) aus, gefolgt von einem peniblen Sauberbürsten. Wird danach nicht gleich die DMS-Klebung vorgenommen, sollte die Oberfläche durch entsprechende Zwischenlagerung des Bauteils oder durch Abdecken der Oberfläche vor erneuter Verschmutzung geschützt werden, bis der DMS geklebt wird.

2. WAS KANN PASSIEREN, WENN PARTIKEL, DIE BEI DER OBERFLÄCHENVORBEREITUNG ABGEARBEITET WURDEN, NICHT ENTFERNT WERDEN?

Trotz sorgfältigen Abbürstens der Oberfläche sind Partikel des Schmirgel-, Schleif- oder Strahlmittels und Harz(Matrix)-Partikel als verbleibende Rückstände auf der Oberfläche nichts Ungewöhnliches, was in vielen Fällen kein Problem darstellt. Das gilt besonders für lösungsmittel-verdünnte Kleber wie M-Bond 600 oder M-Bond 610 mit ihrer sehr guten Benetzungsfähigkeit, die auch in feine Riefen eindringen, wo solche Partikel angehäuft sein können. Diese Bemerkung sollte allerdings keinen Freibrief darstellen für eine nachlässiges Entfernen von Schmirgel- oder Strahlstaub oder sonstiger Partikel. Das Pinselchen, mit dem der Kleber aufgetragen wird, kann auf der Oberfläche verbliebene Partikel rasch „zusammenkehren“, welche dann, besonders mit dem Verdampfen des im Kleber enthaltenen Lösungsmittels, rasch verklumpen. Die Anwesenheit solcher Klumpen unter dem DMS wäre fatal. Der Kleberpinsel sollte vor jeder neuen Kleberaufnahme aus dem Fläschchen mit einem Gazetupfer oder einem geeigneten Papiertuch (Kosmetik-Papiertuch) gereinigt werden, damit eventuell koagulierte Partikel so nicht in das Kleberfläschchen oder zurück auf die Applikationsfläche gelangen. Epoxid-Kleber, gefüllt oder ungefüllt oder Zyanoacrylate (M-Bond AE-10, M-Bond AE-15, M-Bond GA-2 M-Bond GA-6I, M-Bond 200) verhalten sich u.U. nicht so günstig; über besondere Probleme ist bis jetzt jedoch nicht berichtet worden.

3. WELCHER KLEBER WIRD BEI OBERFLÄCHEN MIT GROSSER RAUHIGKEIT EMPFOHLEN?

Einen DMS auf eine sehr raue Oberfläche zu kleben, ohne die Rauigkeiten vorher auszufüllen, ist normalerweise nicht üblich. Ungefüllte oder teilgefüllte Epoxid-Kleber wie M-Bond AE-10, M-Bond AE-15 oder M-Bond GA-2 können bei Oberflächenrauigkeiten zwischen 0,05 und 0,02 mm für direkte DMS-Klebungen eingesetzt werden, ohne vorheriges Ausfüllen der Unebenheiten. M-Bond GA-61 kann in dieser Weise auch bei noch rauheren Oberflächen benutzt werden; allerdings benötigt er eine Aushärtung bei 125 °C in 2 Stunden, wodurch sich die Anwendungsmöglichkeiten einschränken.

Die bekannten und populären DMS-Schnellklebstoffe auf der Basis von Zyanoacrylat, z.B. M-Bond 200, erfordern dünne Kleberschichten im Bereich von 0,015 bis 0,02 mm um ordnungsgemäß zu polymerisieren. Daraus ergibt sich von vornherein die Forderung nach wesentlich feineren Oberflächenrauigkeiten, als sie für die erstgenannten Kleber hinreichend wären. DMS-Kleber wie M-Bond 600 oder M-Bond 610 formen noch dünnere Schichten im Bereich zwischen 2,5 bis 5 µm. Diese Kleber enthalten Lösungsmittel, welche vor Aufbringen des Anpreßdrucks und vor dem Temperatúraushärten sehr gut ablüften müssen, weil sich sonst in der Kleberschicht Blasen bilden können. Bei rauhen Oberflächen wird eine Verlängerung der Abluftzeit oder werden dickere Kleberschichten keine Abhilfe schaffen, obwohl man meinen könnte, daß eine hinreichend dicke, feste Kleberschicht entstanden ist, die die Rauigkeiten zufriedenstellend ausfüllt, wenn alle Lösungsmittel nach dem Ablüften verdampft sind. Wird der Kleber aber der Aushärtetemperatur ausgesetzt, um zu Polymerisieren, verflüssigt er sich wieder vollkommen und würde so in den „Tälern“ auf der Oberfläche versacken und verlaufen.

Die folgende praktische Richtlinie hat sich bei solchen DMS-Applikationen als erfolgreich herausgestellt: Ist bei Anwendung von DMS mit Polyimid-Träger (Serien EA, ED oder EK) die Oberflächentextur durch den Träger gut sichtbar, sollte die gewohnte Klebtechnik, nennen wir sie Ein-Schritt-Klebtechnik, definitiv nicht angewandt werden. Entweder kommt es zu schlechter Klebefestigkeit, oder es entstehen erhebliche Probleme aus der Tatsache, daß sich im Bereich der „Oberflächengipfel“ beim Klebeanpressen des DMS immense Anpreßdrücke ergeben, die leicht um den Faktor 10 größer sein können, als es für eine gute DMS-Installation empfohlen ist.

4. WAS MUSS GETAN WERDEN, WENN EINE EIN-SCHRITT-KLEBTECHNIK NICHT DURCHFÜHRBAR IST?

Am einfachsten wäre es, die Oberfläche mit Matrix-Harz auffüllend zu glätten. Ansonsten können zu diesem Zweck komplett auspolymerisierende Epoxide, je nach Bauteilmaterial ungefüllt oder gefüllt, verwendet werden. Nach Aushärten des Auffüll-Materials kann die erforderliche Oberflächenvorbereitung durchgeführt und der DMS dann auf diese Oberfläche geklebt werden. (Siehe auch Abschnitt 6.)

5. KÖNNEN DICKE KLEBERSCHICHTEN BEI DEHNUNGMESSUNGEN PROBLEME HERVORRUFEN?

Sicher ist eine dicke Kleberschicht zwischen DMS und jeder Art von Bauteiloberfläche immer alles andere als ideal; ist sie unumgänglich, kann sie bestenfalls als Kompromiß toleriert werden. Der Effekt einer dicken, zu dicken Kleberschicht wird sich am ehesten bemerkbar machen, wenn am Bauteil eine Belastung konstanter Größe anliegt, besonders bei erhöhter Versuchstemperatur. Signalabfall als Ergebnis konventionellen DMS-Kriechens wird beobachtbar sein, obwohl dieses durch das viskoelastische Verhalten des Klebers bis zu einem gewissen Grad maskiert werden wird. Andererseits kann das Composite-Material des Bauteils sogar um einen höheren Betrag kriechen und zwar in Richtung einer Kompensation des DMS-Kriechens.

6. WIE KÖNNEN RAUHE OBERFLÄCHEN GEFÜLLT WERDEN, WENN SIE GENEIGT ODER VERTIKAL VORLIEGEN?

Es liegt auf der Hand, daß je schräger eine Oberfläche vorliegt, es um so schwieriger ist, eine flüssige Füllmasse zur Glättung der Oberfläche aufzubringen. Die wahrscheinlich einfachste Lösung wäre es, den Hersteller des Composite-Werkstoffs zu kontaktieren, um festzustellen, ob er eventuell das Matrix-Material oder ein anderes matrix-kompatibles Harzsystem mit möglichst hoher Viskosität oder mit pastöser Konsistenz bereitstellen könnte. Aber auch diese Möglichkeit muß nicht unbedingt die Problemlösung darstellen.

VORSICHT: Füllmittel für raue Oberflächen müssen auch hinsichtlich des Weichmacheranteils, den sie enthalten, beurteilt werden. Materialien mit hohem Weichmacheranteil können schließlich gummiartige, bestenfalls hartgummiartige Oberflächen für die DMS-Installation darstellen, wenn sie als Mittel zum Ausfüllen von Oberflächenrauigkeiten verwandt werden. Eine schlechte Dehnungsübertragung vom Bauteil in den DMS ist das unausweichliche Resultat.

Ist es bei einem Füllmittel notwendig zum Zeitpunkt des Auftragens einen Härter oder Katalysator zuzugeben, mag es schwierig werden, die Masse durch Rühren hinreichend durchzumischen, um schließlich die gewünschte Materialhomogenität zu erreichen. Manche dieser Mittel benötigen sogar eine Heißaushärtung, was zu einer weitgehenden Verflüssigung des aufgetragenen Materials führen kann, mit den für schräge oder vertikale Flächen daraus resultierenden Schwierigkeiten. Hin und wieder ist vom Einsatz sog. „Plastik-Eisens“ berichtet worden, wie es Installateure benutzen und mit welchem die Oberflächenrauigkeiten verspachtelt werden können. Man sollte allerdings die Gefahr von hohen Versteifungseffekten und erforderliche Dehnfähigkeit in Betracht ziehen, bevor man derartiges Material benutzt. Die Zugabe von Füllmitteln zu DMS-Klebern mit kurzen Topfzeiten (z.B. M-Bond AE-10 oder M-Bond GA-2), um sich Oberflächenfüllmaterial herzustellen kann insofern riskant sein, als sie bereits polymerisieren können, bevor die Oberflächenfüllung vollendet ist.

Eine andere bewährte Technik zur erforderlichen Glättung von Composite-Oberflächentexturen besteht darin, mit dem Kleber M-Bond AE-10 Kapton-Film (PLY-001) auf die Oberfläche zu kleben. Der Kleber wird auf die matte Seite des Films aufgetragen, und das Ganze kann selbst bei stark geneigten oder vertikalen Flächen mit Klebeband fixiert werden, bis der Kleber ausgehärtet ist. Das Aufbringen eines leichten Anpreßdrucks kann von Vorteil sein, wobei ein Druckkissen aus Silikongummi (SGP-2) und einem entsprechend der Oberflächenform konturiertes Aluminiumplättchen aufgebracht wird. Selbst wenn man jetzt zur Beschleunigung der Polymerisation etwas Temperatur aufbringt, wird mit dem Anpreßdruck die Kapton-Film-Klebung gut am Platz und unter Kontrolle gehalten.

Bei Composite-Werkstoffen mit guter Wärmeleitfähigkeit (z. B. Graphit) ist das Arbeiten mit Füllmaterialien, die eine kurze Topfzeit haben, einfacher, weil die exotherme Reaktion verzögert wird. Kleber die bei Raumtemperatur aushärten,

sollten nach Entfernen des Anpreßdruckkissens und aller eventuell vorhandener Fixier Klebebänder nachgehärtet werden und zwar bei einer Temperatur, die um mindestens 20 K über einer erhöhten Einsatztemperatur liegt. Die nach oben zeigende glatt-glänzende Kaptonfilm-Oberfläche muß mit 400er Schmirgelpapier aufgeraut und mit Isopropyl-Alkohol abgewaschen werden, bevor der DMS geklebt wird und Schutzabdeckmittel aufgebracht werden.

Ein besonderes Problem in Bezug auf Oberflächenfüllmittel kann auftreten, wenn bei niedrigen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt gemessen werden soll. Wird die Füllung von Oberflächenrauigkeiten mit DMS-Klebern vorgenommen, kann es zu Temperaturreissen im Füllmaterial kommen, was auf die große Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen dem Füllmaterial und dem Composite-Werkstoff zurückzuführen ist. M-Bond GA-61 z.B., ein gefüllter Epoxidkleber, hat einen niedrigeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als M-Bond AE-10; aber er muß bei höherer Temperatur ausgehärtet werden, wo er zur festen Masse auspolymerisiert. Aufgebracht auf ein Composite mit niedrigem Ausdehnungskoeffizienten, befindet er sich somit bei Raumtemperatur in einem Zugspannungszustand, der bedenkliche Größen annehmen kann. Folgendes Beispiel mag das verdeutlichen: Typische Epoxide haben einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von 50 - 60 ppm/K, während bei Kohlefaser-Compositen mit etwa 0 ppm/K gerechnet werden muß. Geht man näherungsweise von einem über die Temperatur konstanten thermischen Ausdehnungskoeffizienten aus, würde diese Differenz der Ausdehnungskoeffizienten zwischen dem Füllmaterial M-Bond GA-61 und dem Kohlefaser-Composite bei Flüssig-Stickstoff-Temperatur (-195 °C) eine Zugdehnung von mehr als 10000 µm/m hervorrufen. Diese Dehnung geht über den möglichen Dehnungsbereich von M-Bond GA-61 hinaus, wenn er in dickeren Schichten aufgetragen wird, und man muß bedenken, daß bis dahin noch keine von außen aufgetragene Dehnung hinzugekommen ist. Liegen Meßaufgaben für kryogene Temperaturbereich vor, sind einige Polyurethane hinsichtlich ihrer Eignung als Oberflächenfüller eine Untersuchung wert.

7. WELCHER KLEBER WIRD BEI KRYOGENEN UMGEBUNGSTEMPERATUREN EMPFOHLEN?

Will man bei kryogenen Temperaturen Temperaturreisse im Kleber oder seine Delamination von der Oberfläche vermeiden, muß auf das Erzielen sehr dünner Kleberschichten geachtet werden. Deswegen empfiehlt sich ein Installations-Anpreßdruck, der ein wenig über den normalerweise gewohnten Werten liegt. Bis hinunter zur Flüssig-Stickstoff-Temperatur von -195 °C wird gewöhnlich M-Bond AE-10 oder M-Bond AE-15 eingesetzt. Besteht die Möglichkeit der Warmaushärtung, sollte M-Bond AE-15 vorgezogen werden. Geht es bis zu Flüssig-Wasserstoff- oder Flüssig-Helium-Temperaturen (-253 °C, -269 °C), wären M-Bond 438, M-Bond 600 oder M-Bond 610 die auszuwählenden Kleber.

8. WELCHER KLEBER WIRD BEI TEMPERATUREN ÜBER 370 °C EMPFOHLEN?

Ist man bei DMS-Dehnungsmessungen mit Temperaturen über 370 °C konfrontiert, wird man rasch eine überproportionale Vergrößerung der Problemstellung erkennen. Bei Composite-Werkstoffen, die für solche Temperatur Einsatzbereiche geeignet sind, muß häufig mit einer gewissen Oberflächenporosität gerechnet werden. Einige Forschungsinstitute berichten, daß deswegen die für diese Temperaturen in Frage kommenden Keramik-Zemente nicht in Betracht kommen, da sich der Flüssiganteil der Kleber (im unausgehärteten Zustand) in die Poren der Composite-Oberfläche hineinzieht und so die Materialeigenschaften unter dem DMS geändert werden. Diese Institute berichten weiter von relativ erfolgreichen Anwendungen des Rokide Flammspray-Verfahrens und relativieren den Erfolg der Messungen in Bezug auf die allgemeine schwerwiegende Problematik, mit der man bei Hochtemperaturmessungen sowieso konfrontiert ist und die durch rasche Temperaturanstiege von mehr als 75 K/s noch erschwert wird.

Die Anwendung des Rokide Flammspray-Verfahrens ist relativ komplex und sollte von Anfängern in der DMS-Meßtechnik gar nicht erst versucht werden. Selbst erfahrenen Spezialisten muß nicht notwendigerweise beim ersten Anwendungsversuch Erfolg beschieden sein, und mit einer gewissen Übungsphase muß gerechnet werden. Die für das Verfahren erforderlichen Freigitter-DMS und die Vorrichtung für das Rokide Flammspray-Verfahren werden von der Fa. HITEC, Westford, Ma./USA geliefert.

9. WELCHER DMS-TYP WIRD FÜR STATISCHE MESSUNGEN AUF COMPOSITE-WERKSTOFFEN EMPFOHLEN?

Aus der von der MEASUREMENTS GROUP publizierten bekannten TechNote-Serie sollten die folgenden Titel zu Rate gezogen werden, bevor man DMS-Applikationen auf Composite-Werkstoffen unternimmt:

TN 502: „Zur Optimierung der elektrischen Speisung von DMS“

TN-504: „Temperatur-Ausgangssignal aus DMS und Änderung des K-Faktors mit der Temperatur“

TN-505: „DMS-Auswahl - Kriterien, Vorgehensweise, Empfehlungen“

Des weiteren sollten die folgenden zusätzlichen Informationen bei der Auswahl von DMS für Dehnungsmessungen auf Composite-Werkstoffen hilfreich sein.

Viele Probleme hinsichtlich der DMS-Auswahl ergeben sich aus einem im Vergleich zu homogenen Metallen unterschiedlichen Werkstoffverhalten von Composite-Werkstoffen. Einige der Kohlefaser-Composite, wie sie in der Luft- und Raumfahrttechnik häufiger eingesetzt werden, zeigen z. B. an ihrer Oberfläche hochgradig lokalisierte, extrem steile Dehnungsgradienten aufgrund von Faserbruch, schlechte Faserbenetzung durch Matrixmaterial oder kleine und kleinste Einschlüsse oder Blasen. Daraus können sich Dehnungsspitzen ergeben und sind häufig genug nachgewiesen worden, deren Breite kleiner als der Faserdurchmesser sein kann und die eine erhebliche absolute Größe erreichen können. Da der DMS nun den Mittelwert der Dehnung unter seinem Meßgitter anzeigt, können solche extremen Dehnungsspitzen nicht auffällig werden, außer durch einen vorzeitigen und natürlich unerwarteten Ausfall des DMS. „Der DMS ist gerissen, obwohl wir erst bei 5000 $\mu\text{m}/\text{m}$ waren!“ ist eine Aussage, die man in diesem Zusammenhang hören kann. Nebenbei gesagt, erlebt man solche Vorkommnisse häufiger bei glasfaserverstärkten Compositen und bei solchen mit unidirektionalem, hochfestem Fasermaterial. Hochleistungs-DMS wie solche der Serien WA und WK, direkt auf solche Werkstoffe geklebt, können so bereits bei relativ niedrigen angezeigten Dehnungswerten ausfallen. Sie sind für einen Dehnungsbereich von $+I-1,5$ bis ± 2 % ausgelegt und ihr Trägermaterial ist absichtlich relativ spröde gehalten, um - besonders bei höheren Temperaturen - bestmögliche Stabilität zu erreichen. Genau wie das die Fasern umschließende Matrixmaterial des Composites die Dehnungen im Werkstoff gleichförmig übertragen soll, soll das Trägermaterial dieser vollgekapselten DMS die Dehnung möglichst perfekt in die Gitterfolie übertragen.

Gehen also die stark lokalisierten Dehnungsspitzen in ihrer absoluten Größe nicht über die Dehnungsmöglichkeiten von DMS sowieso hinaus, sind DMS mit Polyimid-Trägerfolie (Trägerfolie E) die bevorzugte Wahl. Dieses Trägermaterial mit seinem niedrigeren E-Modul überbrückt Diskontinuitäten leichter und „schluckt“ Dehnungsspitzen effektiver, als das bei Trägerfolien mit höherem E-Modul der Fall sein kann. Gekapselte DMS der Serien EA, CEA oder EK haben sich bei Anwendungen auf Compositen als robust, leistungsstark und zuverlässig herausgestellt. Gefährliche Dehnungen im Polyimid-Träger haben so bei weitem nicht den einschränkenden Charakter, wie dies bei DMS mit W-Trägerfolie der Fall ist.

Danach müssen konsequenterweise die Dehnungsbereiche der Gitterlegierungen und ihre Grenzen in Betracht gezogen werden. Der Dehnungsbereich unserer Gitterlegierung A (Konstantan) liegt bei 3 - 5 %, abhängig von der Gitterlänge. Modifizierte Karma-Legierung (Gitterfolie K) läßt Dehnungen von 2 bis 3 % zu und die speziell behandelte Konstantan (Gitterlegierung P) macht Dehnungen von 10 - 20 % und höher mit. Auf den ersten Blick wäre also der gegebene DMS ein solcher mit der Gitterlegierung P aus der Serie EP also, wenn sich diese Legierung nicht mit jedem Dehnungszyklus, dem sie ausgesetzt wird, kaltverfestigen würde, was zu ernsthafter Nullpunktdrift führt.

Die nächstbeste Wahl sind DMS der Serie EA und ihre Variante, die Serie CEA, wobei bemerkt werden muß, daß sich eine steigende Anzahl von Anwendern für DMS der Serien EK und S2K entscheiden; darüber ist später noch zu diskutieren. Die Anwendung von DMS mit glasfaserverstärkten Trägerfolien bleibt normalerweise Messungen in extremen Temperaturbereichen, bei hohen Luftfeuchtigkeiten oder Ermüdungstests vorbehalten.

Obwohl nun DMS der Serie EA (oder CEA) aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften (großer Dehnungsbereich, Träger hochflexibel) für eine Vielzahl von Anwendungen mit Composite-Werkstoffen als geeignet befunden werden können, muß man feststellen, daß auch sie einige Standardversuche nicht in der gewünschten Weise überleben werden. Hierzu zählen z.B. Composite-Druckbehälter mit gewickelter Glasfaserstruktur, die einem Berstdruckversuch unterworfen werden. Ab einem bestimmten Belastungsbereich werden sich Matrixrisse ausbilden, Fasern in der äußeren Windungsschichten werden reißen und können peitschenartig durch den DMS „schneiden“. Bei Composite-Schutzschilden und dergl. sowie Behältern für Explosivstoffe mit Kevlarfasern bestehen derartige Gefahren für den DMS erfahrungsgemäß nicht, allerdings ergeben sich extrem eng lokalisierte Dehnungsspitzen (siehe oben) und öfter sehr hohe Gesamtdehnungen.

Um den hier geschilderten Problemen erfolgreich beizukommen, klebt man vor der eigentlichen DMS-Applikation ein Stück Kapton-Film auf die Meßstelle und darauf dann den DMS. Dazu kann man entweder den von der MEASUREMENTS GROUP erhältlichen Kapton-Film PLY-001 nehmen oder, wenn andere Filmdicken erforderlich sind, liefert solche die Firma Dupont, mit Dicken von 0,05, 0,13 und 0,25 mm. Dabei müssen mögliche Versteifungseffekte im Auge behalten werden, obwohl es bei diesen Versuchen meist um dickwandige Konstruktionen aus Compositen hohen E-Moduls geht und demzufolge entstehende Versteifungseffekte im allgemeinen gering sind.

Bei DMS-Messungen auf Composite-Werkstoffen mit niedriger Wärmeleitfähigkeit, kann beim Verdrahten die vom Lötkolben ausgehende Temperatur negative Folgen für das darunterliegende Matrixmaterial haben, oder es kann zur Delamination von DMS-Anschlußfahne und DMS-Trägerfolie kommen. Deshalb ist es sinnvoll, entweder DMS mit Anschlußdrähtchen einzusetzen oder solche, bei denen der Anwender selbst eine Vorverdrahtung problemlos durchführen kann. (Siehe dazu MEASUREMENTS GROUP TechTip TT-608 „Techniken zur Befestigung von Anschlußdrähten an nicht geklebte DMS“). Die DMS-Serie CEA mit ihren großen, kupferplattierten Anschlußfahnen oder Serie EA mit Option W (integrierte Lötstützpunkte) sind dazu besonders gut geeignet. Ist ein direktes Löten auf geklebten DMS unvermeidlich, muß ein besonders niedrig schmelzendes Lötzinn (z.B. Zinn/Indium) mit einem temperaturgesteuerten

LötKolben verwendet werden. Besteht das Meßobjekt aus einem Composite mit guter Wärmeleitfähigkeit, bestehen gegen die Verwendung des gut zu verarbeitenden und hinreichend erprobten Lötzinns 361A-20R keine Einwände.

Für Messungen an Zugproben im Bereich der Werkstoffprüfung werden im allgemeinen DMS der Serie EA mit Option L (mit Drähtchen) eingesetzt: Ist dabei noch eine Klebung mit dem (Zyanoacrylat)-Schnellklebstoff M-Bond 200 möglich, was gewöhnlich der Fall ist, kann damit im allgemeinen eine schnelle und sichere Installation durchgeführt werden. Ist das Probenmaterial elektrisch leitend, werden die normalerweise nicht isolierten Anschlußdrähtchen einfach zwischen zwei einfache Klebebänder gepackt, deren Enden für das Anklippen des Meßkabels mittels zweier Krokodilklemmen frei bleiben. Um einen guten und reproduzierbaren Übergangswiderstand zu gewährleisten und die Anschlußdrähtchen nicht zu verletzen, ist es sinnvoll, die Krokodilklemmen mit Lötzinn auszugießen.

Weiter oben ist bereits die Möglichkeit des Einsatzes von DMS der Serien EK oder S2K erwähnt worden. DMS dieser Serien erfreuen sich bei den Anwendern rasch steigender Beliebtheit. Sie bestehen aus modifizierter Karma-Gitterfolie hohen spezifischen Widerstands auf hochfestem, flexiblem Polyimid-Träger. Ihr hoher elektrischer Widerstand (in den meisten Fällen 1000 S2) macht sie insofern besonders interessant, als bei ihnen mit wesentlich höheren Brückenspeisespannungen gearbeitet werden kann, ohne daß es bei Compositen mit schlechter Wärmeleitfähigkeit zu Selbsterwärmungseffekten (die der Funktion I^2R folgen) kommt. Bei einem 1000 Ω -DMS wird der Brückenstrom gegenüber einem 350 Ω -DMS schließlich um ca. 35 % reduziert. Höhere Speisespannungen ergeben natürlich wesentlich verbesserte Signal/Rausch-Verhältnisse. So werden durch den Einsatz dieser hochohmigen DMS sozusagen zwei Fliegen mit einer Klappe geschlagen: Selbsterwärmungseffekte werden weitgehend vermieden und das Verhalten von DMS-Brückenschaltungen wird durch die Möglichkeit höherer Speisespannungen verbessert, wenn in „elektrisch unsauberer“ Umgebung (Rauschen) gemessen werden muß.

Aus dem hier Gesagten ist auf jeden Fall der Schluß zu ziehen, daß wegen der Gefahr von Selbsterwärmungseffekten der Einsatz von 120 Ω -DMS vermieden werden sollte, jedenfalls wenn man es mit Composite-Werkstoffen mit niedriger Wärmeleitfähigkeit zu tun hat. 350 Ω -DMS sollten als Minimal-Standard gelten, und 1000 Ω -DMS oder sogar solche höheren Widerstands sind vorzuziehen.

10. IST DER EINSATZ VON 1000 Ω -DMS TROTZ HÖHERER KOSTEN GERECHTFERTIGT?

Werden Messungen an kleinen Bauteilen oder an standardisierten Proben im Labor durchgeführt und man hat die Möglichkeit, die Speisespannung auf ein hinsichtlich gefährlicher Selbsterwärmungseffekte sicheres t -Niveau einzustellen oder man kann gepulste Netzteile benutzen, bestehen gegen den Einsatz von 350 Ω -DMS überhaupt keine Bedenken, und ein 1000 Ω -DMS würde keinerlei zusätzliche Vorteile bringen. Allerdings ist hier die Einschaltung einer allgemeinen Bemerkung über DMS-Kosten sinnvoll.

Bei Messungen auf Composite-Werkstoffen sinnvolle Meßdaten zu erarbeiten und daraus brauchbare technische Informationen abzuleiten, ist schwierig genug. Meßdatengenauigkeit zu opfern oder aus Kostengründen Kompromisse einzugehen, deren Konsequenzen kaum überschaubar sind, ist hier noch weniger angebracht, als das bei „normalen“ Messungen (auf Metallen oder generell isotropen Werkstoffen) der Fall ist. Schließlich ist selten etwas teurer, als ein falscher Meßwert, besonders, wenn man bei der experimentellen Dehnungs- und Spannungsanalyse die sich aus falschen Meßwerten ergebenden Konsequenzen für die Konstruktion und das Einsatzverhalten von Bauteilen in Betracht zieht. Dazu kommt, daß innerhalb einer vorhandenen Meßkette die DMS-Kosten im allgemeinen fast vernachlässigbar klein sind, wenn man sie mit den Installationskosten (einschließlich Personalkosten), den Kosten für Meßinstrumente sowie denen für Datenerfassung und Auswertung vergleicht. Selbst bei großen Bauteilen oder Konstruktionen, die den Einsatz einer großen Anzahl von DMS erfordern und unter schwierigen Meßfeldbedingungen, liegen die direkten DMS-Kosten meist weit unter 5 % der Gesamtkosten der Messung. Insofern ist die Frage der Anwendung mehr oder weniger „teurer“ DMS eigentlich von untergeordneter Bedeutung.

Geht es um zusätzliche Vorteile in Bezug auf den Einsatz von DMS mit höherem Widerstand, sind besonders zwei Aspekte eine nähere Untersuchung wert. Bei der Messung mit einer Viertelbrückenschaltung ist der in Serie mit dem DMS liegende Kabelwiderstand um so größer, je länger das Kabel oder je kleiner sein Querschnitt ist. Aus der praxisgerechten Definition des K-Faktors ($K = \Delta R_{DMS} / R_{DMS} + R_K$; ΔR_{DMS} = dehnungsabhängige Widerstandsänderung; R_{DMS} = Initialwiderstand des DMS; R_K = Kabelwiderstand) ergibt sich, daß der Kabelwiderstand zu einer Desensibilisierung des DMS führt, mit anderen Worten, je größer R_K , um so kleiner K . Konsequenterweise wird man niedrigohmige Kabel verwenden wollen. Bei gegebener notwendiger Kabellänge läßt sich das nur mit großen Kabelquerschnitten realisieren, und das hat natürlicher Weise seine Grenzen, speziell bei dynamischen Messungen, bei denen die beschleunigten Massen der Messmittel, also auch der Kabel, niedrig gehalten werden müssen. Es ist klar, daß der Einsatz von 1000 Ω -DMS diese Effekte im Vergleich zum 350 Ω -DMS um ca. 65 % reduziert. Auch temperaturbedingte Änderungen des Kabelwiderstands schlagen bei der Anwendung von 1000 Ω -DMS wesentlich weniger zu Buche, als das bei 350 Ω -DMS der

Fall ist, wenn man bedenkt, daß der Widerstands-Temperaturkoeffizient von Kupfer (also des Kabelmaterials) bei etwa 0,4 %/K liegt.

11. WELCHE NACHTEILE HÄTTEN 1000 Ω -DMS?

Die Antwort auf diese Frage lautet, daß bei 1000 Ω -DMS mit Gitterlängen < 3 mm mit einem schlechteren Ermüdungsverhalten gerechnet werden muß.

12. WELCHE DMS WERDEN FÜR ERMÜDUNGSMESSUNGEN BEI COMPOSITEN EMPFOHLEN?

Vor vielen Jahren ist das Ermüdungsverhalten von DMS von den Herstellern auf speziellen Proben aus hochfesten metallischen Werkstoffen bestimmt worden. Die dafür erforderlichen Dehnungspegel und Lastwechselzahlen haben diese Proben häufig viel früher zerstört, als die definierten Ermüdungsgrenzen der DMS erreicht waren. Um diesem Problem beizukommen, sind wir schließlich dazu übergegangen, entsprechende Proben aus hochfestem, glasfaserverstärktem Kunststoff für diese Tests zu benutzen. Damit ist in etwa das Problem beschrieben: Daß nämlich viele Composite-Werkstoffe ein besseres Ermüdungsverhalten als DMS zeigen, immer bezogen auf die für DMS nach Übereinkunft gezogenen oder technisch sinnvollen Ermüdungsgrenzen. Unsere TechNote TN-508 „Ermüdungsverhalten von Micro-Measurements DMS“ beschreibt das Ermüdungsverhalten der meisten DMS-Typen und definiert die zugrunde liegenden Ausfallkriterien. Vor diesem Hintergrund können jetzt Empfehlungen zur DMS-Auswahl für Ermüdungsmessungen an Compositen erarbeitet werden.

Zuerst muß klargestellt werden, ob die Messung wirklich zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens des in Frage stehenden Composite-Werkstoffs gedacht ist oder ob es sich einfach darum handelt, die Dehnungsamplituden an einem dynamisch belasteten Bauteil zu messen. Für den letzteren Fall werden die meisten unserer DMS mit Gitterlängen von 3 mm und darüber den Anforderungen entsprechen, wobei die Serie WD das beste Ermüdungsverhalten zeigen wird. Allerdings bestehen solche Messungen häufig aus statischen und dynamischen Signalanteilen, wobei die statischen Anteile mitgemessen werden müssen. In solchen Fällen ist die Serie WD wegen ihres hohen thermischen Ausgangssignals (die Gitterfolie D kann nicht temperaturselbstkompensierend hergestellt werden) nicht empfehlenswert, und man sollte dann auf DMS der Serie WK zurückgreifen. Bei diesen Messungen ist besonders auf adäquate Verdrahtungstechniken zu achten. DMS der Serie WK mit integrierten Lötstützpunkten (Option W) sind zwar besonders bequem zu verdrahten, ihre Ermüdungsverhalten wird sich jedoch sehr verschlechtern, wenn sich der integrierte Lötstützpunkt noch im Bereich hoher Dehnung befindet. Unser TechTip TT-604 „DMS-Verdrahtungstechniken für hohe Ermüdungsfestigkeiten“ sollte zu Rate gezogen werden.

Zusätzlich zum bereits Gesagten können weitere spezielle Maßnahmen die Meßsicherheit erhöhen, wenn Ermüdungsmessungen an Compositen mit DMS durchgeführt werden sollen. Man sollte, wann immer es geht, einen Kapton-Film (z.B. PLY-001 oder dicker) auf das Bauteil kleben und dann darauf den DMS. Damit wird das Risiko, daß vorhandene oder während der Messung entstehende Diskontinuitäten im Bereich des DMS zu seinem vorzeitigen Ausfall führen. Solche Diskontinuitäten können z.B. aus Blasen in der Bauteiloberfläche bestehen, die im DMS an den entsprechenden Stellen zu "Hitzequellen" führen, weil an diesen Stellen Wärmeisolation besteht; das wiederum kann zu frühzeitigem Ausfällen von Meßgittern führen. Also muß man von vornherein mit niedrigstmöglichen Speisespannungen arbeiten, um das Ermüdungsverhalten der DMS nicht unnötig zu beeinträchtigen. Je schlechter die Wärmeleitfähigkeit des Composite-Werkstoffs ist, um so schwieriger wird diese Problematik werden.

Die Grenzen der Ermüdungsfestigkeit von Compositen sind häufig durch das Auftreten erster Delaminationserscheinungen im Werkstoff definiert. Das können sowohl Delaminationen zwischen Matrixmaterial und Einzelfasern sein, als auch solche zwischen Materiallagen oder -schichten. Der Meßtechniker muß sich immer darüber im klaren sein, daß diesbezüglich repräsentative Meßergebnisse kaum existieren können und jedes Bauteil letztendlich individuell beurteilt werden muß. Speziell unter mehrachsigen Belastungsbedingungen können hochkomplizierte Dehnungs/Spannungsverhältnisse entstehen, die selbst bei relativ nahe beieinanderliegenden Materialbereichen unterschiedlichstes Ermüdungsverhalten hervorrufen, womit die Interpretation von DMS-Messungen in solchen Bereichen schwierig wird. Eines der besten Mittel hinreichendes Verständnis für Material- oder Bauteilverhalten zu erlangen und dann entsprechende DMS-Ermüdungsmessresultate richtig zu interpretieren, ist eine quantitative Bestimmung der Dehnungsverteilung im interessierenden Bereich mittels der PhotoStress[®]-Methode.

13. MIT WELCHEM ERMÜDUNGSVERHALTEN IST BEI MM-KLEBERN ZU RECHNEN?

Es kann mit großer Sicherheit gesagt werden, daß das Ermüdungsverhalten aller unserer häufiger eingesetzten DMS-Klebertypen (M-Bond 200, M-Bond AE-10, M-Bond AE-15, M-Bond 600, M-Bond 610 und M-Bond 43B) absolut unproblematisch ist und die Ermüdungsgrenzen von DMS lange erreicht sind, bevor die Kleber irgendein Anzeichen ermüdungsbedingten Fehlverhaltens zeigen wurden. Diese Aussage beruht auf der Voraussetzung, daß die Kleber nur als

DMS-Kleber mit den entsprechenden Standard-Schichtdicken zum Einsatz kommen und daß, im Fall von M-Bond 200, die Kleberschicht keine Feuchtigkeit absorbiert hat.

Die Scherspannungen in der Kleberschicht sind im Bereich der Gitter-Umkehrschlaufen des DMS am größten und sehr niedrig im Bereich der gerade verlaufenden Meßgitterhalme. Delaminationserscheinungen zwischen DMS und Bauteiloberfläche bei dynamischen Messungen treten daher am ehesten im Bereich hoher Scherspannungen auf und sind in der Regel und mit großer Sicherheit auf schlechte Installations-, d.h. Klebetechniken, zurückzuführen. Die Ursachen liegen entweder in schlechter Oberflächenvorbereitung, nicht hinreichend sorgfältigem Mischen der Kleberkomponenten oder in einem dann folgenden inadäquaten Klebevorgang. Oft hat der Meßtechniker einfach zu wenig Informationen über den chemischen oder mechanischen Zustand der Klebefläche des Bauteils. Die Oberfläche kann mit Ölen oder Fetten verunreinigt sein, die freie Silikone enthalten oder Trennmittel aus Bauteilformen, die an der Bauteiloberfläche haften, sind nicht hinreichend entfernt worden. Besondere Schwierigkeiten treten ab und an bei Composite-Werkstoffen mit Graphitmatrix auf. Bei delaminierten DMS kann man häufig beobachten, daß die Kleberschicht komplett am DMS haftet und an ihr eine wenige μm dünne Schicht des Graphitmatrixmaterials. Das gilt für sehr glatte Materialoberflächen. Bei DMS-Delaminationen von rauhen Graphitoberflächen verhält es sich oft ähnlich, nämlich derart, daß die Rauheitspitzen sowie lose Partikel aus Rauheitstälern in der am DMS anhaftenden Kleberschicht zu beobachten sind. Eine Ursachenerforschung für die Delamination ist oft ohne mikroskopische Untersuchung kaum möglich: Dabei muß bei mikroskopischer Betrachtung der Klebeflächen, welche delaminiert sind, mit dem Beleuchtungswinkel ein wenig gespielt werden, bis man wirklich sieht, was die Ursache für das Aufgehen der Klebung gewesen sein mag. Eine Ursache, die häufiger auftritt, sind in die Oberfläche eingeschlossene Feuchtigkeit, Lösungsmittel oder Luft, welche sich bei Erwärmung überproportional ausdehnen und den DMS sozusagen wegsprengen. Bei der Anwendung von M-Bond 200 als Kleber ist besonders darauf zu achten, daß der Katalysator wirklich auf die Klebefläche des DMS aufgebracht wird und keinesfalls auf die Bauteiloberfläche kommt! Dringen Lösungsmittel aus dem Katalysator in die Bauteiloberfläche ein, werden sie nur sehr schwer wegzubringen sein, besonders dann, wenn die Installation bei Temperaturen unter $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und hoher relativer Luftfeuchtigkeit erfolgt. Kompatibilitätsprobleme, d.h. Klebprobleme zwischen DMS und Kleber, sind bei unseren DMS nicht zu befürchten, es sei denn, daß die DMS beim Anwender kontaminiert worden sind, oder der Kleber während des Installationsprozesses irgendwie falsch behandelt worden ist.

14. WELCHE KLEBER UND DMS WERDEN BEI HOCHDEHNUNGS-MESSUNGEN EINGESETZT?

Zuerst muß festgestellt werden, welche Dehnungsgrößen für den vorgesehenen Meßfall als „hohe Dehnungen“ angesehen werden. Es kann vorkommen, daß Dehnungen zwischen 1 % und 5 % (10000 bis 50000 $\mu\text{m}/\text{m}$) bereits als Hochdehnung definiert werden. In solchen Fällen mögen DMS der Serien EA oder CEA (mit Gitterlängen über 3 mm) zusammen mit den Klebern M-Bond 200, M-Bond AE-10 oder M-Bond AE-15 als aufgabengerecht ausgewählt werden. Allerdings wurden Dehnungen zwischen 5 % und 20 % (50000 bis 200000 $\mu\text{m}/\text{m}$) dem Begriff Hochdehnung eher entsprechen, und für solche Dehnungsgrößen sind DMS der Serie EP die logische Wahl. Dazu passen dann die Kleber M-Bond AE-10 (für Dehnungen zwischen 6 und 10 %), M-Bond AE-15 (10 - 15 %) und M-Bond A-12 (15 - 20 %). Werden gekapselte DMS eingesetzt (Serie EA mit Option E oder Serie CEA), ist die Dehnfähigkeit der Kleber eher am unteren Ende der angegebenen Bereiche zu suchen, weil die Scherspannungen in der Kleberschicht dann hoher sind. Obwohl die Option W (integrierte Lötstützpunkte am DMS) einen hohen Verdrahtungskomfort bedeutet, ist bei Hochdehnungsmessungen Vorsicht geboten; die interne Verbindung zwischen DMS und integriertem Lötstützpunkt kann brechen, wenn sie sich auch im Bereich der Hochdehnung beendet. Wie oben schon gesagt worden ist, muß an den DMS-Enden, im Bereich der Gitter Umkehrschlaufen, mit hohen Scherspannungen in der Kleberschicht gerechnet werden. Die Gefahr von Delamination in diesem Bereich ist bei Hochdehnungsmessungen dann natürlich vorhanden, und selbst kleinste Delaminationen werden die Scherspannungskonzentrationen rasch in Richtung DMS-Meßgitter propagieren lassen.

Bei Hochdehnungsmessungen mit DMS der Serien EA oder EP sollten sich Meßstellenausfälle idealer Weise in Gitterbrüchen, also dem Zerreißen von Gitterhalmen manifestieren. Zu beachten ist, daß DMS der Serie EP, die speziell für Hochdehnungsmessungen gefertigt werden, unter zyklischer Belastung nach relativ wenigen Lastwechseln eine hohe Nullpunktdrift zeigen. Es ist dies jedoch nur eine scheinbare Einschränkung ihrer Einsatzmöglichkeiten, da hohe zyklische Belastungen mit vielen Lastwechseln nur selten mit hohen Dehnungen einher gehen. Die Dehnungsgrenzen der einzelnen MM-Klebertypen sind der entsprechenden Literatur und den Datenblättern und Katalogen zu entnehmen.

Sind Dehnungen zu messen, die in ihrer Größe die Möglichkeiten geklebter Folien-DMS überschreiten, muß nach anderen Meßmöglichkeiten gesucht werden. Häufig sind sogenannte „Clip-Gages“ oder mechanische Dehnungstransformatoren auf DMS-Basis und dergl. funktionierende Problemlösungen. Allerdings sind solche Vorrichtungen in der Regel nur bei reiner Zugdehnung einsetzbar. Schon leichte Biegung im Bauteil kann zu groben Meßfehlern führen. Clip-Gages und Dehnungstransformatoren verhalten sich in der Regel unlinear und sollten vor dem Einsatz diesbezüglich kalibriert werden, wenn die Genauigkeitsspezifikationen einer gegebenen Messung dies erfordern.

15. WELCHE TEMPERATUR-KOMPENSATION (S-T-C-NUMMER) GILT FÜR GLASFASER- UND KOHLEFASERVERSTÄRKTE WERKSTOFFE?

Die S-T C-Nummer, wie sie in einer DMS-Typenbezeichnung enthalten ist, gibt an, für welchen Proben- oder Bauteilwerkstoff ein DMS temperaturselbstkompensierend wirkt. Temperatur selbstkompensation bedeutet bei DMS, daß ihr Temperatursignal (früher „scheinbare Dehnung“ genannt) minimiert ist, wenn der DMS auf das Material geklebt wird, welches durch die S-T-C-Nummer spezifiziert ist. Dabei ist die in unseren DMS-Typenbezeichnungen erscheinende S-T C-Nummer weiter nichts als der nominelle thermische Ausdehnungskoeffizient ($10^{-6}/^{\circ}\text{F}$) des Proben- oder Bauteilwerkstoffs, auf das der DMS geklebt werden soll. Eine einfache Multiplikation dieser Zahl mit dem Faktor 1,8 ergibt den entsprechenden Wert in $10^{-6}/\text{K}$. Unsere TechNote TN-504 „Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderungen mit der Temperatur“ gibt eine detaillierte Darstellung, des gesamten Sachverhalts.

Werden Dehnungsmessungen bei konstanter Temperatur nahe Raumtemperatur durchgeführt, ist die Frage der S-T-C-Nummer von sekundärer Bedeutung. Das gleiche gilt für Messungen mit ausschließlich dynamischen Signalen. Muß mit Temperaturänderungen während der Messung gerechnet werden, wird die Frage allerdings kritisch, und die S-T-C-Nummer sollte so gut wie möglich mit dem tatsächlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Proben- oder Bauteilmaterials übereinstimmen. Je größer die Differenz zwischen beiden ist, um so größer wird das unerwünschte thermische Ausgangssignal des DMS sein, wobei selbst bei guter Übereinstimmung zwischen S-T-C-Nummer und thermischem Ausdehnungskoeffizienten für die Bereiche der unteren (kryogenen) und oberen Temperaturextreme mit relativ hohen Fehlersignalen gerechnet werden muß.

Kommen also bei einer Messung Temperaturänderungen in mehr oder weniger breiten Bereichen vor, sind verlässliche Empfehlungen hinsichtlich spezifischer S-T-C-Nummern für gegebene Composite-Werkstoffe problematisch. Das gilt sogar für schon lang im Gebrauch befindliche glasfaserverstärkte Composite, für die eigentlich hinreichende Erfahrungen vorliegen sollten. Die Schwierigkeiten ergeben sich aus der Variationsbreite des Materialaufbaus und den sich daraus ableitenden Materialparametern. Im Sinne der hier behandelten Problematik sind folgende Materialparameter von größter Bedeutung, wobei einmal lediglich, wie schon gesagt, nur von glasfaserverstärkten Compositen die Rede sein soll: 1. Die mögliche Variationsbreite der Prozentanteile von Matrix- und Fasermaterial; 2. die Art des Faser (Glas)-Materials und des Matrixmaterials; 3. Gehäckselte, nicht richtungsorientierte Faserfüllung oder streng richtungsorientierter, kontinuierlicher Faserlauf; 4. die Herstellungsart des Bauteils: Druckguß, Autoklavenherstellung, Lagenherstellung oder Faserwicklung. Die Problematik gestaltet sich bei anderen Compositen analog der, wie sae hier für glasfaserverstärkte Werkstoffe dargestellt ist.

Bei glasfaserverstärkten Compositen sollte man am besten mit der S-T-C-Nummer 06 beginnen, wenn man mit Vorversuchen die für ein gegebenes Material richtige Temperatur Selbst-Kompensation des DMS herausfinden will. S-T-C-Nummer 06 entspricht einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Probenmaterials von $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ oder $10,8 \times 10^{-6}/\text{K}$. Die Probe selbst sollte genügend groß dimensioniert sein, daß sie für eine hinreichende Anzahl von DMS Platz hat, um die Streuung des thermischen Ausgangssignals sowohl in einer Richtung als auch in variierenden Richtungen bestimmen zu können. Wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs und des damit verbundenen sich nur langsam einstellenden Temperaturgleichgewichts in der Probe, sollte mit sehr niedrigen Temperaturänderungsraten, etwa 1 K/min, gearbeitet werden. Nach dem ersten Temperaturzyklus kann es zu hohem Nullpunkt-Versatz kommen, weil sich Eigenspannungszustände geändert haben. Eine Kompensation des thermischen Ausgangssignals mittels der bekannten Methode einer Halbbrückenschaltung aus aktivem DMS und sog. Temperaturkompensations-DMS wird bei Composite-Werkstoffen nur höchst selten zufriedenstellend funktionieren, außer vielleicht bei Materialien mit gehäckselter Faserfüllung. Im allgemeinen und basierend auf statistisch hinreichend gesicherten Erfahrungswerten kann gesagt werden, daß die Streuung der Funktion des thermischen Ausgangssignals aus DMS auf Composite-Werkstoffen um ca. eine Größenordnung über der von DMS auf metallischen Werkstoffen liegt.

Hat man es mit kohlefaserverstärkten Compositen zu tun, liegen die anzuwendenden S-T-C-Nummern in der Regel bei 00 bis 03 (0 bis $5,4 \times 10^{-6}/\text{K}$). Dabei ist zu beachten, daß einige Graphit-Kohlefaser-Werkstoffe, die in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden, von den Anwendern als isotrop betrachtet werden, jedenfalls in X/Y-Richtung, wenn nicht sogar auch in Z-Richtung. Es ist in diesem Zusammenhang von Compositen berichtet worden, die sogar einen leicht negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zeigen. Außerdem sind in der Werkstofftechnologie der Luft- und Raumfahrt in der Tat Analogien zwischen Compositen und metallischen Werkstoffen zu verzeichnen, wenn es um den thermischen Ausdehnungskoeffizienten geht. Die häufig eingesetzte Titan-Legierung Ti6Al4V z.B. zeigt richtungsabhängige thermische Ausdehnungskoeffizienten. Bei dieser Legierung differiert der Ausdehnungskoeffizient bei einer Temperatur von 250 °C um $0,25 \times 10^{-6}/\text{K}$ zwischen der Walzrichtung des Materials und quer dazu.

Der Einsatz von DMS mit unterschiedlichen S-T-C-Nummern auf ein und derselben Composite-Probe oder ein und demselben Bauteil ist durchaus nicht ungewöhnlich, wenn man richtungsabhängig die beste Temperatur selbstkompensation erzielen will. Die MEASUREMENTS GROUP kann sogar gekreuzte Rosetten mit unterschiedlichen S-T-C-Nummern pro Gitter herstellen und liefern. Allerdings ist die Anwendung von gekreuzten Rosetten bei Dehnungsmessungen auf Composite-Werkstoffen nur in den seltensten Fällen ratsam. Diese Rosetten ergeben häufig einen intolerabel

hohen Versteifungseffekt, und außerdem muß mit schwierigen thermischen Problemen gerechnet werden. Der Temperaturtransfer innerhalb der gekreuzten Rosette ist wegen der zwischen den Einzelgittern liegenden Isolations-(Träger)-Folien schlecht, und dazu kommt noch die schlechte Wärmeleitfähigkeit des vorliegenden Composite-Probenwerkstoffs. Es ergibt sich dann aufgrund von Selbsterwärmungseffekten in der Rosette häufig eine Situation, bei der die Rosetten-Gittertemperaturen nicht unwesentlich über denen des Bauteilmaterials liegen.

Bei Raumfahrtanwendungen in Zusammenhang mit Graphit-Kohlefaser Werkstoffen werden häufig in der gleichen Richtung DMS mit unterschiedlichen S-T-C-Nummern angewandt. Z.B. werden auf die „Sonnenseite“ (hohe Temperatur) des Bauteils DMS mit der S-T-C-Nummer 00 installiert, während die „Schattenseite“ (niedrige Temperatur) den gleichen DMS in der gleichen Richtung mit der S-T-C-Nummer 03 ($5,4 \times 10^{-6}/K$) trägt. Man kann also mit S-T-C-Fehlanspassungen das thermische Ausgangssignal für ein gegebenes, abseits von Raumtemperatur liegendes Temperaturintervall weiter minimieren. Allerdings kommen für solche Anwendungen, wie überhaupt bei Anwendungen im Bereich von Temperaturextremen, DMS mit Konstantan-Gitter kaum in Frage, was am Funktionsverlauf des thermischen Ausgangssignals liegt. Damit engt sich die DMS-Auswahl auf die DMS-Serien EK, S2K, SK und WK ein.

Die gesamte hier diskutierte Frage der Temperaturselbstkompensation, der „richtigen“ S-T-C-Nummer des DMS für eine gegebene Anwendung also, läuft auf eine möglichst präzise Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Probenmaterials (abhängig von der erforderlichen Meßgitterrichtung des DMS) hinaus. Und eine hinreichend präzise Bestimmung des Koeffizienten ist in der Regel, jedenfalls mit DMS, nur relativ zu einem Referenzwerkstoff möglich. Die MEASUREMENTS GROUP TechNote TN-513 „Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten mit DMS“ diskutiert die dafür vorliegenden und erprobten Möglichkeiten in ausführlicher Weise.

16. WELCHER KLEBER WIRD FÜR "GRÜNE" COMPOSITE ZUR ERLANGUNG VON INITIAL-DEHNUNGSWERTEN BEI TEMPERATUREN BIS 150 °C EMPFOHLEN?

Unter einem „grünen“ Composite wird ein Werkstoff verstanden, welcher außer seinen Herstellungsprozess keinerlei weitergehende individuelle Geschichte hat.

Für solche Messungen verbietet sich die Anwendung heißhärtender Kleber von vornherein. Würde ein heißhärtender Kleber angewandt, wäre das Material nicht mehr „grün“, da mit der Kleberheißhärtung bereits ein weiteres Kapitel in der Geschichte des Werkstoffs aufgeschlagen wäre, nämlich eine „Wärmebehandlung“. Der für solche Fälle zu empfehlende DMS-Kleber ist M-Bond 300, ein Polyester Kleber.

M-Bond 300 ist nicht ganz so einfach zu verarbeiten wie die gebräuchlicheren DMS-Kleber. Der Kleber, bestehend aus zwei zu vermischenden Komponenten, hat eine Topfzeit von nur 5 bis 8 min bei Raumtemperatur. Er zeigt eine hohe Scherfestigkeit (die wichtigste Anforderung an einen guten DMS-Kleber), hat allerdings nur eine relativ geringe Abschälfestigkeit. Deswegen muß man nach dem Kleben benutzte Applikations-Klebebänder mit größter Vorsicht entfernen, d.h. das den DMS bedeckende Klebeband muß über sich selbst, parallel zur Oberfläche, langsam und vorsichtig, eventuell unter Zuhilfenahme eines geeigneten Lösungsmittels (Rosin Solvent), abgezogen werden, damit der DMS nicht mitgenommen wird. Keinesfalls darf das Klebeband senkrecht zur DMS-Fläche abgezogen werden. Es ist bekannt geworden, daß das Mastix einiger Klebebandsorten mit dem unausgehärteten Polyester des Klebers M-Bond 300 reagiert. Deswegen ist es wichtig, nur von uns empfohlene Applikations-Klebebänder zu benutzen.

Von einigen Anwendern ist berichtet worden, daß sie bei DMS-Installationen mit M-Bond 300 auf ebenen, horizontalen Flächen den DMS einfach mit der Pinzette in Position legen, dann das Druckkissen-Sandwich (Teflon-Film, Silikon-gummi-Plättchen, Aluminium-Plättchen) aufbringen und das Ganze mit einer geeigneten Anpreßdruckvorrichtung fixieren. Damit ist ohne Applikations-Klebeband gearbeitet worden. Diese Technik sollte nur angewandt werden, wenn der DMS, so wie er aus der Packung kommt, wirklich vollkommen flach aufliegt. Das ist bei DMS mit offenem Meßgitter und Polyimidträger in der Regel nicht der Fall; sie sind aufgrund des Produktionsprozesses leicht gekrümmt, und wird die oben geschilderte Technik eingesetzt, kann es zu ungewollten Positionsverschiebungen des DMS kommen. Es sollte also auf jeden Fall ein Applikations-Klebeband zum Fixieren des DMS angewandt werden. Die geschilderte Technik kann jedoch bei gekapselten DMS fast immer angewandt werden, da diese in der Regel wirklich flach aufliegen. Obwohl M-Bond 300 also in der Installationstechnik nicht so einfach ist, wie das bei konventionellen DMS-Klebern der Fall ist, liegt der Vorteil dieses Klebers eben in der Tatsache, daß er bei niedrigen Temperaturen aushärtet (z.B. 24 h bei +5 °C, 12 h bei 24 °C) und trotzdem bei höheren Temperaturen, bis in die Gegend von 150 °C, gemessen werden kann. Allerdings ist noch ein Hinweis wichtig. Wird M-Bond 300 bei Temperaturen unter 15 °C ausgehärtet, bleibt er gegen längeres Einwirken von vielen Lösungsmitteln empfindlich. Rosin Solvent, welches zum Entfernen von Lötflußmittelresten eingesetzt wird, muß dann sofort nach der Anwendung sorgfältig entfernt werden. Schutzabdeckmittel, die Lösungsmittel enthalten, sollten vermieden werden.

Einige Anwender haben über den erfolgreichen Einsatz von M-Bond 300 bei Temperaturen bis zu +180 °C berichtet. Der Kleber kann jedoch bezüglich dieser oberen Temperaturgrenze von Charge zu Charge inkonsistent sein, was vom Hersteller mit wirtschaftlich vernünftigen Mitteln kaum zu kontrollieren ist. Deswegen reichen unsere Spezifikationen

nur bis +150 °C. Soll etwa doch bis +180 °C gemessen werden, sind Vorversuche mit der vorliegenden Kleber-Charge empfohlen.

17. KÖNNEN KOMMERZIELL ERHÄLTlich "HOCHTEMPERATUR"-ZYANO-ACRYLATE BEI MESSUNGEN AUF "GRÜNEN" COMPOSITEN EINGESETZT WERDEN?

Unser Zyanoacrylat-Kleber M-Bond Z00 wird für eine Einsatztemperatur bis max. +95 °C spezifiziert. Es kann dies unter gewissen Gesichtspunkten als eine relativ zurückhaltende Spezifikation angesehen werden, und es sind Einsatzfälle denkbar, bei denen mit M-Bond 200 über diese Temperaturgrenze hinaus gegangen werden kann. Allerdings sollte ein befriedigendes Verhalten des Klebers dann durch Vorversuche sichergestellt werden. Andere industrielle Zyanoacrylat-Kleber sind, so sie als DMS-Kleber eingesetzt werden sollen, mit großer Skepsis zu betrachten. Diejenigen, die unserer Versuchs- und Entwicklungsabteilung zugänglich waren, haben sich in ihrem Verhalten in Zusammenhang mit DMS als durchweg unbefriedigend gezeigt.

18. WELCHE DMS-TYPEN WERDEN NORMALERWEISE BEIM TEST "GRÜNER" COMPOSITE BIS 150 °C EINGESETZT?

Die meisten Versuche an „grünen“ Compositen bestehen aus Kurzzeitmessungen, so daß Drift (Gitterlegierung) und Kriechen im allgemeinen unkritische Faktoren sind. Dieses vorausgesetzt, liegt man mit der Wahl von Konstantan-DMS (Legierung A) mit Polyimid-Trägerfolie im allgemeinen richtig. Bei eventuell rauheren Umgebungsbedingungen und im Sinne vereinfachter Installationsprozeduren sind DMS der Serie CEA oder solche der Serie EA mit Option W (integrierte Lötstützpunkte) empfehlenswert. Dies gilt besonders für die Anwendung auf Composite-Werkstoffen mit besserer Wärmeleitfähigkeit (Graphit-Epoxide). Liegen Werkstoffe mit niedriger Wärmeleitfähigkeit vor, wird man im allgemeinen zu DMS der Serie EA mit Option W (integrierte Lötstützpunkte) oder Option LE (gekapselt und mit Anschlußdrähtchen) greifen. Ansonsten muß von Fall zu Fall entschieden werden, ob es die Anwendung erfordert, daß eine Vorverdrahtung vom Anwender vorgenommen wird (dynamische Anwendungsfälle), und man sollte dann TechTip TT-608 zu Rate ziehen.

Das ernsthafteste zu behandelnde DMS-Auswahlkriterium ist sicher die Bestimmung der richtigen Temperatur Kompensation (S-T-C-Nummer), wobei sich die schwierigsten Bedingungen aus stark anisotropem Werkstoffverhalten ergeben. Graphit-Epoxide mit unidirektionaler Faserausrichtung sind dafür sehr illustrative Beispiele. Die richtungsabhängigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten können leicht um eine Größenordnung differieren ($0 - 3 \times 10^{-6}/K$ gegen $20 - 30 \times 10^{-6}/K$) und im Funktionsverlauf unlinear sein. Damit ist die Notwendigkeit verschiedener S-T-C-Nummern für DMS verschiedener Installationsrichtung gegeben, und Vorversuche, eventuell auch um durch absichtliche Fehlanpassungen der S-T C-Nummern die Funktionssteigungen des thermischen Ausgangssignals zu verbessern (in einem Temperaturintervall $\Delta T = 125$ K), sind angezeigt. Da die relative Streuung der Funktion des thermischen Ausgangssignals über den dargestellten Temperaturbereich des DMS gleich ist, ergeben sich um so höhere Absolutstreuwerte, je steiler der Funktionsverlauf ist (also im Bereich der oberen und unteren Extreme). In diesem Zusammenhang ist ein sorgfältiges Studium unserer TechNotes TN-504 und TN-513 dringend anzuraten.

Mit dem Entstehen sehr ungewöhnlicher Funktionsformen des thermischen Ausgangssignals aus DMS, die auf Composite installiert sind, muß gerechnet werden, jedenfalls wenn man diese Funktionsverläufe mit solchen aus DMS auf Metallen vergleicht. Bei Composite-Werkstoffen mit unidirektionalen Faserstrukturen entwickeln sich aufgrund des natürlichen Produktionsprozesses in der Materialmatrix hohe Zugeigenspannungen, resultierend aus den stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Faser und Matrixmaterial. Mit steigender Versuchstemperatur während der Dehnungsmessung gehen die Eigenspannungen gegen Null, und diese temperaturbedingten Eigenspannungsänderungen haben selbstverständlich einen großen Einfluß auf den aktuellen Funktionsverlauf des thermischen Ausgangssignals von DMS, welche auf solche Werkstoffe installiert sind. So kann es geschehen, daß sich zwischen zwei DMS, genau Rücken an Rücken auf die gegenüberliegenden Seiten einer dünnen Composite-Platte geklebt, sehr verschiedene Funktionsformen des thermischen Ausgangssignals ergeben.

Ist das thermische Verhalten einer mechanisch unbelasteten DMS-Installation (keine Dehnung aufgrund äußerer Belastungen) definiert und verstanden, kann mit den normalen Belastungsversuchen identischer Proben begonnen werden, indem eine konstante Last bei Raumtemperatur aufgebracht und dann die Temperatur bis zu den gewünschten Grenzen geändert wird. Um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, ist die Anwendung der Kompensations-DMS-Methode hier angebracht, derart, daß der aktive DMS auf der Zugprobe mit einem Kompensations-DMS, der sich in gleicher Richtung auf einer identischen unbelasteten Probe befindet, zur Halbbrücke verschaltet ist. Ist in den oben beschriebenen Vorversuchen einigermaßen befriedigende Temperaturkompensation mit befriedigender Streubreite erzielt worden, sollte das Ausgangssignal aus dieser Halbbrücke der auf den aktiven DMS wirkenden Dehnung direkt entsprechen (natürlich unter der Voraussetzung das aktiver DMS und Kompensations-DMS auf gleichem Temperaturniveau liegen). Arbeitet man mit einer Biegebelastvorrichtung mit 4-Punkt-Lasteinleitung kann man den DMS in der Zugdehnungsebene direkt mit

dem in der äquivalenten Druckdehnungsebene zur Halbbrücke verschalten, um die gleiche befriedigenden Temperaturkompensation zu erzielen. Natürlich zeigt die Dehnungsmeßbrücke dann den doppelten Dehnungswert an, aber man kann die wirkliche, am DMS anliegende Dehnung wieder zur Anzeige bringen, indem man am Instrument den doppelten Wert des vom Hersteller für die benutzten DMS angegebenen K-Faktor einstellt.

Als Schlußfolgerung soll festgehalten werden, daß es aufgrund des Gesagten sicher einfacher ist, für multidirektionale Faserstrukturen, also quasi-isotrope Werkstoffe, die „richtige“ S-T-C-Nummer zu finden, als das für unidirektionale der Fall ist.

Außerdem ist zu beachten, daß das Materialverhalten von Composite-Werkstoffen und Dehnungssignale aus DMS interpretationsbedürftig werden, wenn gewisse Temperaturen (Glas-Umschlagphasen) für Faser und Matrixmaterial überschritten werden.