

Auswahl von DMS

Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

1.0 Einführung

Der erste Schritt zur Vorbereitung einer DMS-Installation ist die Auswahl des richtigen DMS für die vorliegende Messaufgabe. Anfänglich könnte es scheinen, dass diese Auswahl einfach ist und für den Messtechniker keine großen Konsequenzen nach sich zieht; aber gerade das Gegenteil ist der Fall. Für ein optimales Verhalten der DMS unter Einsatzbedingungen, ferner, um genaue und zuverlässige Messwerte zu erzielen sowie die Installation einfach und kostengünstig zu gestalten, kann eine sorgfältige und vernünftige DMS-Auswahl von überragender Bedeutung sein.

Die Installations- und Anwendungscharakteristika eines DMS werden von den folgenden, mehr oder weniger wählbaren Parametern beeinflusst:

- Dehnungsempfindliche Gitterlegierung
- Trägermaterial (Matrix)
- Aktive Gitterlänge
- Gittergeometrie
- Temperatur-Selbstkompensationszahl
- Elektrischer Widerstand
- Optionen

Im Wesentlichen besteht der Auswahlprozess aus der Bestimmung derjenigen verfügbaren Parameter, die einerseits mit den vorliegenden Umgebungs- und Anwendungsbedingungen bestmöglich kompatibel sind und andererseits die durch Installations- und Einsatzumstände gegebenen *Einschränkungen* weitestgehend berücksichtigen. Solche Einschränkungen drücken sich in der Regel in Form etwa der folgenden Anforderungen aus:

- Messgenauigkeit
- Stabilität
- Temperatur
- Dehnungsbereich
- Versuchsdauer
- Ermüdungsverhalten unter zyklischer Last
- Installationsschwierigkeiten
- Umgebungsbedingungen

Die Kosten des DMS selbst spielen bei der Auswahl normalerweise eine untergeordnete Rolle, da die wirtschaftlich bedeutsamste Überlegung ohne Zweifel den Gesamtkosten

einer fertigen Installation gilt und der DMS-Preis nur einen kleinen Bruchteil dieser Gesamtkosten ausmacht. In vielen Fällen ist es sogar so, dass die Auswahl einer teureren DMS-Serie oder optionaler DMS-Eigenschaften die unmittelbaren DMS-Kosten zwar erhöhen, dass damit aber die Gesamtkosten bis zur Fertigstellung einer messbereiten Installation erheblich gesenkt werden.

Der Anwender muss einsehen, dass er bei der DMS-Auswahl im Allgemeinen mit Kompromissen zu rechnen hat. Das ergibt sich aus der Tatsache, dass die Befriedigung bestimmter Anwendungsbedingungen anderen Forderungen durchaus zuwiderlaufen können. Nimmt man z. B. den Fall einer Kerbe mit kleinem Radius, in die ein DMS installiert werden soll, die Platzverhältnisse also sehr eingeschränkt sind und mit steilen Dehnungsgradienten gerechnet werden muss, dann spricht das zunächst für die Auswahl eines kleinstmöglichen DMS. Gleichzeitig aber sind DMS mit Gitterlängen <3mm gewöhnlich durch niedrigere Dehnfähigkeit, reduziertem Ermüdungsverhalten, niedrigerer Stabilität und höherem Schwierigkeitsgrad der Installation gekennzeichnet. Eine andere Frage, die bei der Auswahl von DMS häufig zu Kompromissen führt, ist die Verfügbarkeit oder Lagerhaltung von DMS für alltägliche Dehnungsmessungen. Wenn also Kompromisse fast immer notwendig sind, muss sich der Messtechniker jedenfalls ihrer Konsequenzen in Bezug auf die messtechnischen Anforderungen der DMS-Installation voll bewusst sein. Dieses Verständnis ist notwendig, um den bestmöglichen Kompromiss für eine gegebene messtechnische Situation zu finden und um die Auswirkungen dieses Kompromisses auf die Messgenauigkeit und auf den Wert der Messdaten beurteilen zu können.

Die hier dargestellten Auswahlkriterien für DMS beziehen sich im Wesentlichen auf spannungsanalytische Anwendungen. Auswahlkriterien für DMS, die für Messwertaufnehmer Verwendung finden sollen, können sich, obwohl sie in vielerlei Hinsicht mit den hier dargestellten Kriterien übereinstimmen, von Anwendungsfall zu Anwendungsfall erheblich unterscheiden, weshalb sie getrennt diskutiert werden sollten. Das Transducer Application Department der Vishay Micro-Measurements kann in dieser Hinsicht behilflich sein.

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

2.0 DMS-Auswahl-Parameter

2.1 Dehnungsempfindliche Legierungen

Die hauptsächliche Komponente, die das Einsatzverhalten eines DMS bestimmt, ist die dehnungsempfindliche Legierung, aus der die Messgitterfolie besteht. Allerdings ist die Gitterlegierung nicht in jedem Fall ein unabhängig auswählbarer Parameter. Das liegt daran, dass jede DMS-Serie von Vishay Micro-Measurements (definiert durch die ersten zwei oder drei Buchstaben unseres alpha-numerischen Bezeichnungssystems [s. die Darstellung auf Seite 12] als geschlossenes System zu verstehen ist. Dieses System besteht aus einer bestimmten Gitterfolien/Träger-Kombination, die gewöhnlich weitere Konstruktionseigenschaften enthält wie Gitterabdeckung, integrierte Anschlussdrähtchen oder vorverzinnte Lötunkte, was alles spezifisch für die in Frage stehende DMS-Serie ist.

Unsere Vishay Micro-Measurements fertigt DMS mit einer Reihe von Gitterfolien-Legierungen, die durch Buchstaben gekennzeichnet sind, welche wiederum in der DMS-Bezeichnung ihren Platz haben:

A Konstantan in temperaturselbstkompensierender Form.

P: Konstantan, wärmebehandelt.

D: Isoelastic

K: Nickel-Chrom-Legierung, modifizierte Karma-Legierung in temperaturselbstkompensierender Form.

2.1.1 Konstantan-Legierung

Von allen modernen DMS-Gitterfolien-Legierungen ist Konstantan die am längsten und immer noch am meisten angewandte. Diese Situation reflektiert die Tatsache, dass Konstantan die beste Kombination von Eigenschaften zeigt, wie sie für eine große Anzahl von DMS-Anwendungen benötigt werden. Diese Legierung besitzt z. B. eine adäquat hohe Dehnungsempfindlichkeit, K-Faktor genannt, und ist gleichzeitig bezüglich des Dehnungspegels und der Temperatur vergleichsweise unempfindlich. Sein spezifischer Widerstand ist hoch genug, um auch bei sehr kleinen Gittern hinreichende Widerstandswerte erzielen zu können, und sein Temperaturkoeffizient des Widerstands ist nicht übermäßig hoch. Dazu kommt, dass Konstantan durch gute Ermüdungsdaten und relativ hohe Dehnfähigkeit gekennzeichnet ist. Es muss allerdings bemerkt werden, dass die Legierung bei Temperaturen über +65°C zu kontinuierlichem Driften tendiert. Dies muss berücksichtigt werden, wenn bei einer Dehnungsmessung die Nullpunktstabilität des DMS über Stunden oder Tage (nach Nullabgleich des Messinstruments) bedeutsam ist.

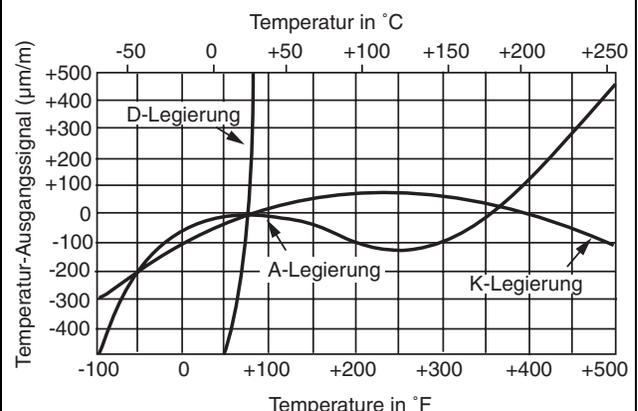
Ganz wichtig ist, dass Konstantan so behandelt werden kann, dass es temperaturselbstkompensierend wirkt für einen großen Bereich von Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe, die konstruktiv zum Einsatz kommen (s. Kasten Seite 2).

Temperatur-Selbstkompensation

Eine den Gitterlegierungen Konstantan und Karma zukommende wichtige Eigenschaft ist ihre Reaktion auf gewisse technische Behandlungsprozesse, die sie im Sinne der DMS-Anwendung temperaturselbstkompensierend macht. Der Begriff "temperaturselbstkompensierende DMS" bedeutet, dass ihre Reaktion auf Temperatureinflüsse, also die Größe des Temperatureingangssignals, welches als Dehnungssignal fehlinterpretiert werden könnte, über einen Temperaturbereich von etwa -45°C bis +200°C minimiert ist. Werden DMS mit Konstantan-Gitter (A-Legierung) oder Gitter aus modifizierter Karma-Legierung (K-Legierung) für eine Messaufgabe ausgesucht, muss ihre Temperatur-Selbstkompensationszahl (S-T-C-Nr.) bei der Bestellung spezifiziert werden. Die S-T-C-Nr. entspricht näherungsweise dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Proben- oder Bauteilwerkstoffs in ppm/°F, auf den der DMS appliziert werden soll, und auf dem er dann das gewünschte minimierte Temperatureingangssignal produziert. Die S-T-C-Nr. für DMS, die auf Baustähle installiert werden sollen, ist z. B. 06 (6ppm/°F, was 11ppm/K entspricht), für Aluminium kommt 13 in Frage (13ppm/°F, entsprechend 23ppm/K) und so fort.

Die folgende Grafik illustriert die Charakteristika der thermischen Ausgangssignale für die A-(Konstantan-)Legierung und die K-(modifizierte Karma-)Legierung. Die Funktion des thermischen Ausgangssignals für nicht selbstkompensierende wie für die D-(Isoelastic-)Legierung ist zu Vergleichszwecken in der Grafik ebenso enthalten. In der Praxis wird die S-T-C-Nr. für DMS mit A- oder K-Legierungs-Gitter so ausgesucht, dass die S-T-C-Nr. dem Ausdehnungskoeffizienten des Probenmaterials so nahe wie möglich kommt. Es ist allerdings möglich, die Funktionskurve des thermischen DMS-Ausgangssignals um den Raumtemperaturpunkt herum so zu drehen, dass sich günstige Verhältnisse, d. h. ein sehr kleines, womöglich gegen Null gehendes Temperatureingangssignal für einen bestimmten gewünschten Temperaturbereich ergibt. Das erzielt man durch bewusste Fehlanpassung der S-T-C-Nr. relativ zum thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Probenmaterials. Ist die gewählte S-T-C-Nr. niedriger als der Ausdehnungskoeffizient des Probenmaterials, dann wird die Kurve gegen den Uhrzeigersinn gedreht; ist sie höher, erfolgt eine Drehung im Uhrzeigersinn. Unter Fehlanpassungsbedingungen gilt also die auf dem DMS-Datenblatt dargestellte Grafik des Temperatureingangssignals nicht mehr, und gewöhnlich wird eine Kalibrierung notwendig sein, um die so neu erzeugte Funktion des Temperatureingangssignals zu bestimmen.

Weitere, tiefergehende Informationen über den Einfluss von Temperatur auf DMS und DMS-Installationen können der Vishay Micro-Measurements - TechNote TN-504 entnommen werden.



Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

DMS mit Gitterlegierung A, also Konstantan, werden mit Temperatur-Selbstkompensationszahlen (S-T-C-Nr.) 00, 03, 05, 06, 09, 13, 15, 18, 30, 40 und 50 geliefert. Das entspricht in gleicher Reihenfolge den Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten α ($10^{-6}/K$) = 00; 5,4; 9; 10,8; 16,2; 23,4; 27; 32,4; 54; 72 und 90. Damit ist ein weites Bereich von Werkstoffen abgedeckt, von solchen sehr niedriger Ausdehnungskoeffizienten wie spezielle Glas- oder Keramiksubstrate, bis zu den hohen ungefüllter Plastikmaterialien reichend.

Für die Messung sehr hoher Dehnungen, 5% ($50000\mu\text{m}/\text{m}$) oder mehr, wird normalerweise wärmebehandeltes Konstantan (Legierung P) als Gitterfolie ausgewählt. Konstantan in dieser Zustandsform zeichnet sich durch hohe Duktilität aus und kann bei Messgitterlängen von 3mm und darüber Dehnungen bis $>20\%$ ausgesetzt werden. Allerdings muss beachtet werden, dass die P-Legierung, ist sie hoher *zyklischer* Dehnung ausgesetzt, nach jedem Zyklus eine gewisse bleibende Widerstandsänderung erfahren wird, die sich als entsprechende Nullpunktdrift des DMS ausdrückt. Wegen dieser Eigentümlichkeit und wegen einer Tendenz zu vorzeitigen Gitterbrüchen bei wiederholter Hochdehnungsbelastung kann die P-Legierung für Messungen zyklischer Dehnungen gewöhnlich nicht empfohlen werden. Sie ist erhältlich mit den S-T-C-Nummern 08 und 40, also für Metalle, respektive Plastikmaterialien.

2.1.2 Isoelastic-Legierung

Sind rein dynamische Dehnungsmessungen durchzuführen, ist also die Erhaltung einer stabilen Nullpunktreferenz während des Versuchs nicht notwendig, bietet die Isoelastic-Legierung (D-Legierung) gewisse Vorteile. Der Hauptvorteil dabei ist ihr im Vergleich zur A-Legierung überlegenes Ermüdungsverhalten. Dazu kommt ein höherer K-Faktor (nominell 3,2), womit sich bei dynamischen Messungen ein verbessertes Signal/Rausch-Verhältnis ergibt. Die D-Legierung ist nicht temperaturselbstkompensierend. Außerdem zeigt sie, wie aus dem Diagramm im Kasten Seite 2 ersichtlich, ein so hohes Temperatureingangssignal ($145\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$), dass sie als Gitterlegierung für statische Messungen normalerweise nicht brauchbar ist. Es kann jedoch sein, dass die D-Legierung bei speziellen Aufnehmern Anwendung finden kann, die ein hohes Ausgangssignal erfordern, und bei denen dann mittels einer hinreichend gut kompensierten Vollbrückenschaltung eine akzeptable Temperaturstabilität erreicht werden kann.

Andere Eigenschaften der D-Legierung sollten ebenso beachtet werden, wenn ihre Auswahl als Gitterlegierung in Betracht kommt. Sie verhält sich z. B. magnetoresistiv, und ihr K-Faktor zeigt in Abhängigkeit von der Dehnung eine leichte Nichtlinearität, die bei Dehnungen über $\pm 5000\mu\text{m}/\text{m}$ beträchtlich wird.

2.1.3 Karma-Legierung

Modifiziertes Karma oder K-Legierung ist mit ihrem wei-

ten Anwendungsbereich ein wichtiges Mitglied der Familie der DMS-Gitterlegierungen. Diese Legierung ist gekennzeichnet durch ein gutes Ermüdungsverhalten und ausgezeichnete Stabilität. Damit ist sie die bevorzugte Wahl für genaue statische Dehnungsmessungen bei Raumtemperatur über lange Zeiten (Monate oder Jahre) oder auch für etwas kürzere Zeiten bei erhöhten Temperaturbereichen. Die K-Legierung ist zur Anwendung für Dauermessungen in einem Temperaturbereich von -269°C bis $+260^{\circ}\text{C}$ empfohlen. Für Kurzzeitmessungen können gekapselte DMS mit Karma-Gitter sogar bei Temperaturen bis 400°C eingesetzt werden. Schutzgasatmosphäre erhöht die Stabilität solcher DMS bei hohen Einsatztemperaturen und erlaubt damit unter diesen Umständen längere Messzeiten.

Neben ihren anderen Vorteilen zeigt die K-Legierung einen wesentlich flacheren Funktionsverlauf des Temperatureingangssignals als die A-Legierung (Konstantan) und erlaubt damit genauere Korrekturen der Messwerte bei Temperaturextremen. Wie Konstantan, ist die Karma-Legierung temperaturselbstkompensierend für die Anwendung auf Werkstoffen mit verschiedenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Der Bereich der thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist jedoch begrenzt auf die folgenden S-T-C-Nummern: 00, 03, 06, 09, 13 und 15. K-Legierung ist die natürliche Wahl, wenn temperaturselbstkompensierende DMS benötigt werden, deren Leistungsmerkmale über diejenigen hinausgehen, die mit Konstantan-DMS erreichbar wären.

Es ist schwierig auf K-Legierung zu löten. Deswegen sind die Lötanschlussfahnen aller Karma-DMS unserer Vishay Micro-Measurements, soweit es solche mit offenem Messgitter sind, mit einer Kupferplattierung versehen, die, je nach Größenverhältnis, eine größere quadratische Fläche (DP) oder eine kleinere runde Fläche (DD) einnimmt. Alle DMS mit K-Gitterlegierung, die nicht mit vorverzinneten Lötunkten oder Anschlussdrähtchen ausgerüstet sind, müssen also mit den Zusatzbezeichnungen DP oder DD spezifiziert werden, *zusätzlich* zu den Bezeichnungen für die gewünschten Optionen. Welche der beiden Formen der Kupferplattierung für einen bestimmten DMS anwendbar ist, erfährt man von unserer Kundenservice-Abteilung. Karma-DMS mit offenem Messgitter können auch mit vorverzinneten Lötunkten bestellt werden.

2.2 Trägermaterialien

Konventionelle Folien-DMS bestehen aus fotochemisch herausgeätzten Gittern auf einer Trägerfolie aus Plastikmaterial. Dieser Träger erfüllt mehrere wichtige Funktionen:

- Er dient zur Handhabung der DMS während der Installationsarbeiten.
- Er stellt die Klebefläche zur Verfügung, die zur Befestigung des DMS auf das Versuchsteil benötigt wird.
- Er dient als elektrische Isolation zwischen DMS-Gitter und dem Messobjekt.

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

Standard-DMS Auswahlübersicht

DMS Serie	Beschreibung und Hauptanwendungsbereich	Temperaturbereich in °C	Dehnungsbereich	Ermüdungsverhalten	
				$\frac{\Delta l}{l} \times 10^{-6}$ (µm/m)	Lastwechselzahl
EA	Konstantanfolie auf einem sehr robusten und flexiblen Polyimid-Träger. DMS der Serie EA sind in vielen Sonderausführungen (Optionen) lieferbar. Ihr Hauptanwendungsbereich liegt in der normalen statischen und dynamischen Spannungsanalyse. Für Messwertaufnehmer höchster Präzision wird diese Serie nicht empfohlen.	Normal: -75°C bis +175 °C. Spezielle Bedingungen oder kurzzeitig: -195°C bis +205°C	±3% bis 3,2mm aktiver Gitterlänge. ±5% über 3,2mm	±1800 ±1500 ±1200	10 ⁵ 10 ⁶ 10 ⁸
CEA	DMS für universelle Anwendung. Vollständig polyimidgekapseltes Konstantan-Gitter mit vergrößerten, kupferplattierten Anschlussfahnen. Hauptanwendungsbereich.: Statische und dynamische Spannungsanalyse. CEA-DMS sind im DMS Data Book der Vishay Micro-Measurements durch Farbfelder deutlich hervorgehoben.	-75°C bis +175°C Gekreuzte Rosetten bis +65°C	±3% bis 3,2mm aktiver Gitterlänge ±5% über 3,2mm	±1500 ±1500	10 ⁵ 10 ^{6*}
				*Verbessertes Ermüdungsverhalten mit Lötzinnen niedrigen E-Moduls	
N2A	Konstantanfolie auf dünnem laminierten Polyimidfilm. Hauptsächlich zur Anwendung für Präzisions-Messwertaufnehmer empfohlen. Wenig und reproduzierbares Kriechen. Ebenfalls empfohlen für die experimentelle Spannungsanalyse, wenn bei größeren DMS-Abmessungen ein extrem flach aufliegender, nicht wölbender DMS gefordert ist.	Normale statische Anwendung im Messwertaufnehmerbau -75°C bis +95°C	±3%	±1700 ±1500	10 ⁶ 10 ⁷
WA	Konstantanfolie in einem Epoxy-Phenolharz-Träger, voll ständig gekapselt mit hoch schwingfesten Anschlüssen, durch größeren Temperaturbereich und größere Resistenz gegenüber schwierigen Umgebungsbedingungen der Serie EA in vielen Fällen vorzuziehen. Option W ist lieferbar, reduziert jedoch etwas die Schwingfestigkeit.	Normal: -75°C bis +205°C. Spezielle Bedingungen oder kurzzeitig: -195°C bis +260°C	±2%	±2000 ±1800 ±1500	10 ⁵ 10 ⁶ 10 ⁷
SA	Wie Serie WA, jedoch in einem etwas dünneren Träger, gekapselt und mit vorverzinneten, durch die Kapselung hindurchgeführten, punktförmigen Anschlüssen versehen. Anwendungsbereich wie Serie WA, aber aufgrund der Anschlüsse in der max. Anwendungstemperatur etwas niedriger.	Normal: -75°C bis +205°C. Spezielle Bedingungen oder kurzzeitig: -195°C bis +230°C	±2%	±1800 ±1500	10 ⁶ 10 ⁷
EP	Speziell wärmebehandelte Konstantanfolie auf zähem, hochflexiblem Polyimidträger. Spezial-DMS-Serie zur Messung sehr hoher Dehnungen. Erhältlich mit den Optionen E, L und LE, welche jedoch den Dehnungsbereich einschränken können.	-75°C bis +205°C	±10% bis 3,2mm aktiver Gitterlänge. ±20% über 3,2mm	±1000	10 ⁴ hohe Nullpunktdrift unter zyklischer Belastung
ED	Isoelastic-Folie auf einem zähen und sehr flexiblen Polyimid-Träger. Wegen des hohen K-Faktors und der hohen Ermüdungsfestigkeit wird die Serie ED speziell für dynamische Messungen empfohlen. Aufgrund des hohen Temperatureingangssignals nicht für statische Messungen empfohlen.	-195°C bis +205°C dynamisch	±2% Nichtlinear über ±0,5%	±2500 ±2200	10 ⁶ 10 ⁷
WD	Isoelastic-Folie vollständig in einem glasfiverstärkten Epoxy-Phenolharz-Träger, gekapselt mit hoch schwingfesten Anschlüssen. Speziell für dynamische Messungen über einen großen Temperaturbereich und extrem schwierigen Umgebungsbedingungen zu empfehlen.	-195°C bis +260°C dynamisch	±1,5% Nichtlinear über ±0,5%	±3000 ±2500 ±2200	10 ⁵ 10 ⁷ 10 ⁸
SD	Wie Serie WD, gekapselt, jedoch mit vorverzinneten, punktförmigen Anschlüssen anstelle von Anschlussdrähtchen.	-195°C bis +205°C dynamisch	±1,5% Nichtlinear über ±0,5%	±2500 ±2200	10 ⁶ 10 ⁷
EK	Karma-Gitterlegierung mit zähem, flexiblem Polyimidträger. Hauptsächlich anzuwenden, wenn eine Kombination aus hohem Widerstand, Stabilität bei höherer Temperatur und größere Trägerflexibilität gefordert ist.	Normal: -195°C bis +175°C Spezielle Bedingungen oder kurzzeitig: -269°C bis +205°C	±1,5%	±1800	10 ⁷
WK	Modifizierte Karma-Folie in einem glasfiverstärkten Epoxy-Phenolharz-Träger, gekapselt mit hoch schwingfesten Anschlüssen. Unter allen temperaturselbstkompensierenden Serien diejenige mit dem größten Temperaturbereich und größter Resistenz gegen extreme Umgebungsbedingungen. Option W ist bei einigen Typen erhältlich, reduziert jedoch die Schwingfestigkeit und die maximale Anwendungstemperatur.	Normal: -269 °C bis +290 °C Spezielle Bedingungen oder kurzzeitig: -269°C bis +400°C	±1,5%	±2400 ±2200 ±2000	10 ⁶ 10 ⁷ 10 ⁸
SK	Wie Serie WK, jedoch in einem etwas dünneren Träger, vollständig gekapselt und mit vorverzinneten, durch die Kapselung hindurchgeführten, punktförmigen Anschlüssen. Aufgrund der Anschlüsse in der maximalen Anwendungstemperatur etwas niedriger.	Normal: -269 °C bis +230 °C Spezielle Bedingungen oder kurzzeitig: -269°C bis +260°C	±1,5%	±2200 ±2000	10 ⁶ 10 ⁷
S2K	Karma-Gitterlegierung, laminiert auf einen Hochleistungs-Polyimidträger von 0,025mm Dicke, mit laminierten Polyimidkapselung über Gitter und Anschlussfahnen. Spezial-Lötflächen auf den Anschlussfahnen für einfachste Verdrahtung.	Normal: -75°C bis +120°C Spezielle Bedingungen oder kurzzeitig: -185°C bis +150°C	±1,5%	±1800 ±1500	10 ⁶ 10 ⁷

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

Auswahltabelle DMS-Serien und Kleber

Versuchs- und Anwendungsart	Temperatur-Anwendungsbereich	Versuchsdauer in Stunden	Erforderte Genauigkeit**	Geforderte zykl. Dauerfestigkeit		Typische Auswahlentscheidung	
				Maximale Dehnung (µm/m)	Lastwechselzahl	DMS-Serie	M-Bond Kleber
Allgemeine Spannungsanalyse*, statisch oder dynamisch	-45°C bis +65°C	<10 ⁴	Mittel	±1300	<10 ⁶	CEA, EA	200 oder AE-10
		>10 ⁴	Mittel	±1300	<10 ⁶	CEA, EA	AE-10 oder AE-15
		>10 ⁴	Sehr hoch	±1600	>10 ⁶	WA, SA	AE-15 oder 610
		>10 ⁴	Hoch	±2000	>10 ⁶	WA, SK	AE-15 oder 610
	-45°C bis +205°C	<10 ³	Mittel	±1600	<10 ⁶	WK, SA	600 oder 610
		>10 ³	Hoch	±2000	<10 ⁶	WK, SK	600 oder 610
	-269°C bis +230°C	>10 ³	Mittel	±2000	>10 ⁶	WK, SK	610
	<315°C	<10 ²	Mittel	±1800	<10 ⁶	WK	610
<370°C	<10	Mittel	±1500	<10 ⁶	WK	610	
Hochdehnung (plastischer Bereich)	-45°C bis +65°C	<10	Mittel	±50 000	1	CEA, EA	AE-10
		>10 ³	Mittel	±100 000	1	EP	AE-15
		>10 ³	Mittel	±200 000	1	EP	A-12
	-20°C bis +260°C	<10 ²	Mittel	±15 000	1	SA, SK, WA, WK	610
	-269°C bis +260°C	<10 ³	Mittel	±10 000	1	SK, WK	600 oder 610
Dynamische Spannungsanalyse (zyklisch)	-75°C bis +65°C	<10 ⁴	Mittel	±2000	10 ⁷	ED	200 oder AE-10
		<10 ⁴	Mittel	±2400	10 ⁷	WD	AE-10 oder AE-15
	-195°C bis +260°C	<10 ⁴	Mittel	±2000	10 ⁷	WD	600 oder 610
		<10 ⁴	Mittel	±2300	<10 ⁵	WD	600 oder 610
Meßwert-aufnehmer	-45°C bis +65°C	<10 ⁴	1 bis 5%	±1300	<10 ⁶	CEA, EA	AE-10 oder AE-15
		<10 ⁶	1 bis 5%	±1300	<10 ⁶	CEA	AE-15
	-45°C bis +95°C	<10 ⁴	Besser 0,2%	±1500	10 ⁶	N2A	600, 610 oder 43-B
	-45°C bis +150°C	<10 ⁴	0,2 bis 0,5%	±1600	10 ⁶	WA, SA	610
	-195°C bis +175°C	<10 ⁴	Besser 0,5%	±1800	10 ⁶	WK, SK	610

* Diese Kategorie enthält die meisten Versuchsumstände, bei denen ein bestimmter Grad von Stabilität unter statischen Belastungsbedingungen gefordert wird. Um für Konstantan-DMS über längere Zeiträume und bei Temperaturen über +65°C absolute Stabilität erzielen zu können, kann es notwendig werden, mit Halb- oder Vollbrückenschaltungen zu arbeiten. Schutzabdeckungen können die Stabilität ebenfalls beeinflussen, außer bei Messwertaufnehmern in hermetisch abgedichteten Gehäusen.

** Es ist unangemessen, den Begriff Genauigkeit, wie er in dieser Tabelle angewandt wird, zu quantifizieren, ohne dass vielfältige Aspekte des gegebenen Versuchsprogramms und der eingesetzten Instrumente berücksichtigt werden. Im Allgemeinen bedeutet "mittel" im Zusammenhang mit Anwendungen in der Spannungsanalyse einen Bereich von 2 bis 5%, "hoch" einen Bereich von 1 bis 3%, und "sehr hoch" 1% oder besser.

Die Trägermaterialien der DMS unserer Vishay Micro-Measurements bestehen aus zwei Grundtypen: Polyimid und einem glasfaserverstärkten Epoxy-Phenol-System. Ebenso wie bei den Gitterlegierungen ist auch der DMS-Träger innerhalb von DMS-Serien kein beliebig auswählbarer Parameter. Bestimmte Träger/Gitterlegierung-Kombinationen sowie andere Konstruktionsmerkmale sind als System entworfen und ergeben die Bezeichnung für eine DMS-Serie. Hat man also den optimalen DMS-Typ für eine Messaufgabe gefunden, kann keine willkürliche Kombination von Gitterlegierung und Trägermaterial vorgenommen werden, sondern von nun an muss eine vorhandene DMS-Serie spezifiziert werden. Die DMS-Serien unserer Vishay Micro-Measurements sowie deren Eigenschaften werden im Abschnitt 2.3 beschrieben. Jede Serie hat ihre speziellen Merkmale und bevorzugten Einsatzgebiete, und diesbezügliche Auswahlempfehlungen werden in der Tabelle oben gegeben. Hier findet eine

vorläufige Diskussion zu den einzelnen Trägermaterialien statt, wie das im vorigen Abschnitt mit den Gitterlegierungen geschah. Damit wird zum besseren Verständnis der Eigenschaften von DMS-Serien beigetragen, die schließlich aus den Gitterlegierungen und Trägerwerkstoffen aufgebaut sind.

Der Polyimid-Träger E ist ein zähes, extrem flexibles Material, welches sich leicht selbst sehr kleinen Radien anpasst. Dazu kommt, dass wegen der hohen Abschleißfestigkeit zwischen Träger und Gitterfolie mit E-Trägern versehene DMS unempfindlich gegen Beschädigungen während des Installationsprozesses sind. Aufgrund der einfachen Handhabbarkeit und wegen des günstigen Temperatureinsatzbereichs (-195°C bis +175°C) erweist sich der Polyimid-Träger als ideal für allgemeine statische und dynamische Messungen in der experimentellen Spannungsanalyse. Der Werkstoff hat eine hohe Dehnfähigkeit und

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

kann für Messungen im plastischen Bereich bei bis zu 20% Dehnung eingesetzt werden. Die DMS-Serien EA, CEA, EP, EK, S2K, N2A und ED unserer Vishay Micro-Measurements sind mit Polyimid-Trägern ausgestattet.

Für bestes Verhalten über breiteste Temperaturbereiche ist das glasfaserverstärkte Epoxy-Phenol-System die gegebene Wahl. Dieser Träger kann für statische und dynamische Messungen von -269°C bis +290°C genutzt werden, wobei für Kurzzeitanwendungen sogar bis 400°C gegangen werden kann. Die maximale Dehnfähigkeit dieses Trägermaterials ist allerdings auf etwa 1% bis 2% begrenzt. Unsere DMS-Serien WA, WK, SA, SK, WD und SD sind mit dieser Trägerart ausgerüstet.

2.3 DMS-Serien

Wie in den Abschnitten 2.1 und 2.2 dargestellt, können die dehnungsempfindliche Gitterlegierung und das Trägermaterial nicht völlig unabhängig voneinander ausgesucht und beliebig kombiniert werden. Es muss vielmehr eine Auswahl unter bestehenden DMS-Systemen oder DMS-Serien getroffen werden, wobei jede Serie spezielle Konstruktionsmerkmale und eine spezifische Gitterlegierung/Trägerkombination darstellt. Der Übersichtlichkeit halber, und um die Identifikation einer DMS-Serie, die bestimmten Versuchsanforderungen genügen muss, zu erleichtern, wurden die Informationen über die Leistungsmerkmale und Auswahlsschritte zu den DMS-Serien hier in kondensierter Form in zwei Tabellen zusammengefasst.

Die Tabelle auf Seite 4 enthält eine kurze Beschreibung der DMS-Serien unserer Vishay Micro-Measurements für allgemeine Anwendungen, einschließlich der für die jeweilige Serie gültigen Gitterlegierung/Trägerkombination sowie ihre grundsätzlichen Konstruktionsmerkmale. Diese Tabelle gibt Auskunft über die Leistungsdaten der DMS-Serien in Bezug auf Temperatureinsatzbereich, Dehnungsbereich und die zyklische Belastbarkeit in Abhängigkeit vom Dehnungspegel. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich dabei um Nominalwerte handelt, die sich vorzugsweise auf DMS mit Gitterlängen von 3mm und größer beziehen.

Die Tabelle auf Seite 5 zeigt die empfohlenen DMS-Serien für bestimmte "Versuchsprofile" oder Versuchsanforderungen, die nach folgenden Kriterien zusammengestellt sind:

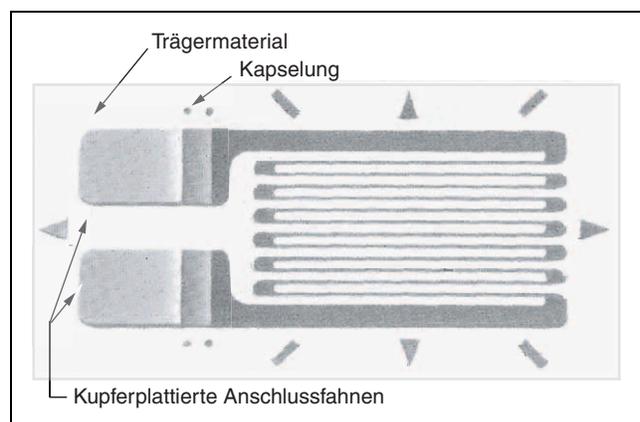
- Art der Dehnungsmessung (statisch, dynamisch, etc.)
- Anwendungstemperatur
- Versuchsdauer
- Geforderte Messgenauigkeit
- Geforderte zyklische Belastbarkeit

Diese Tabelle ist als grundsätzliche Hilfe für die Vorausswahl einer DMS-Serie für konventionelle Anwendungen zu verstehen. Sie enthält außerdem Empfehlungen für anzuwendende Kleber, da der Kleber in einer DMS-Installation zum Bestandteil des DMS-Systems wird und das Verhalten

des DMS im Einsatz entsprechend beeinflusst. Diese Auswahltablette, ergänzt durch die Informationen der vorhergehenden Tabelle, wird zusammen mit dem großen DMS Data Book, *Katalog über Präzisions-DMS*, benutzt, um schließlich zu einer endgültigen DMS-Auswahl für eine gegebene Messaufgabe zu gelangen. Die Vorgehensweise wird im Abschnitt 3.0 dieser TechNote beschrieben.

Begegnet man einem Versuchsprofil, das über die Bereiche der beiden Tabellen hinausgeht, kann man gewöhnlich annehmen, dass die Versuchsanforderungen an den Leistungsgrenzen verfügbarer DMS liegen oder diese überschreiten. Unter solchen Bedingungen wird das Zusammenspiel der einzelnen Leistungscharakteristika für eine Darstellung in Tabellenform zu komplex, und der Anwender sollte unsere Beratungsingenieure konsultieren, um mit ihnen zusammen einen tragfähigen Kompromiss auszuarbeiten.

Wie in Tabelle auf Seite 5 angezeigt, ist für alltägliche Routinemessungen die CEA-Serie die bevorzugte Wahl, wobei davon ausgegangen wird, dass keine extremen Umgebungsbedingungen vorliegen und auch nicht kleinstmögliche Gitterlängen verlangt werden. DMS der Serie CEA bestehen aus Konstantan-Gitterlegierung auf Polyimidträger und mit Polyimidkapselung. Sie haben robuste, kupferplattierte Anschlussfahnen, auf die das Messkabel einfach und direkt angelötet werden kann (s. nachstehende Abb.). Diese dünnen, flexiblen DMS können so gut wie jedem Radius angepasst werden. Die Handhabungscharakteristika in Bezug auf einfache Installationstechnik oder gegenüber der Gefahr einer Beschädigung bei der Installation sind für die CEA-Serie ganz ausgezeichnet.

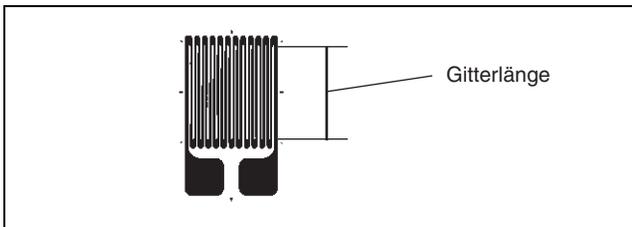


2.4 Aktive Gitterlänge

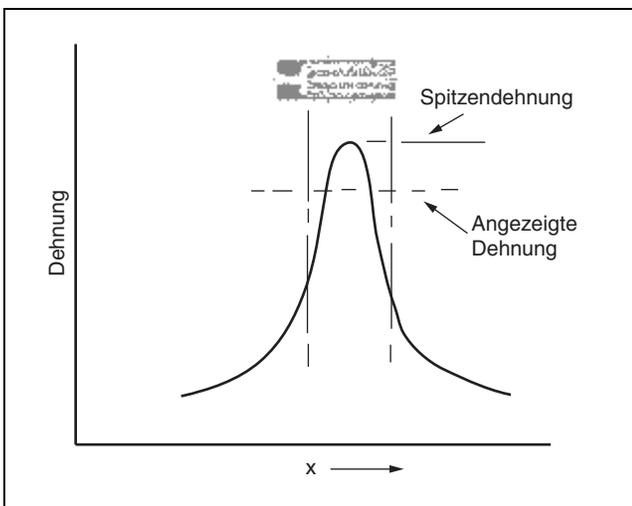
Unter aktiver Gitterlänge versteht man die Länge des Messgitters, das für die Dehnungsmessung aktiv wird, also den dehnungsempfindlichen Teil des DMS. Die Umkehrschleufe des Gitters sowie der Anschlussfahnenbereich werden wegen ihres großen Querschnitts und dem damit einhergehenden Widerstand als dehnungsunempfindlich betrachtet (s. nachstehende Abb.). Um den stark variiere-

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

renden Anforderungen von DMS-Anwendungen in der experimentellen Spannungsanalyse und beim Bau von Messwertaufnehmern gerecht zu werden, bietet unsere Vishay Micro-Measurements DMS mit aktiven Gitterlängen im Bereich von 0,2mm bis 100mm.



Die aktive Gitterlänge ist oft ein wichtiger Faktor bei der Bestimmung des DMS-Verhaltens unter gegebenen Anwendungsbedingungen. Gewöhnlich werden Dehnungsmessungen an den kritischsten Stellen eines Bauteils oder einer Konstruktion durchgeführt, also in Bereichen höchster Spannung. Und sehr häufig gehen solche Bereiche hoher Spannung mit hohen Spannungsgradienten einher, bei denen hohe Dehnungsgradienten auftreten und der Bereich der maximalen Spannung auf einen kleinen Bereich beschränkt ist. Nun hat der DMS eine integrierende oder mittelwertbildende Wirkung in Bezug auf den durch das Messgitter überdeckten Dehnungsbereich, oder anders ausgedrückt: das von ihm abgegebene Signal repräsentiert den Mittelwert der unter dem Messgitter vorliegenden Dehnung. Da aber der Mittelwert einer nicht gleichförmigen Dehnungsverteilung immer kleiner ist als die Maximaldehnung, wird ein DMS, dessen Gitterlänge merklich über den Bereich der Maximaldehnung hinausgeht, immer eine zu niedrige Dehnung anzeigen. Die folgende Skizze, welche die Dehnungsverteilung im Bereich einer Spannungskonzentration darstellt, illustriert eine solche Situation und demonstriert den entstehenden Messfehler für einen DMS, der in Bezug auf die Zone der Spitzendehnung zu lang ist.



Wann immer praktikabel, sollte folgende Faustregel zur

Anwendung kommen: Die aktive Gitterlänge sollte nicht größer als das 0,1-fache des Radius einer Bohrung, einer Kerbe oder der entsprechenden Abmessung der Ursache einer Spannungskonzentration sein, wo eine Dehnungsmessung durchgeführt werden muss. Ist ein solcher Radius oder eine sonstige Abmessung kleiner als z. B. 13mm, kann die Anwendung dieser Faustregel zu sehr kleinen aktiven Gitterlängen führen. Da aber kleine DMS wiederum andere Probleme hervorrufen können, wird oft ein Kompromiss notwendig sein.

DMS mit Gitterlängen unter 3mm tendieren zu eingeschränktem Leistungsverhalten, besonders in Bezug auf die Größe des erlaubten Dehnungsbereichs, auf die Stabilität bei statischer Dehnung und auf das Ermüdungsverhalten unter zyklischer Belastung. Wird eine der genannten Einschränkungen die Ungenauigkeit aufgrund des Effekts der Mittelwertbildung aufwiegen, kann der Einsatz eines gemessen am Dehnungsgradienten - zu großen DMS erforderlich werden.

Sind hinreichende Einsatzkriterien für einen größeren DMS gegeben, kann ein solcher Vorteile bringen, die der Beachtung wert sind. Auf nahezu alle Aspekte von Installation und Verdrahtung bezogen, sind größere DMS in der Regel einfacher zu verarbeiten (zumindest für Gitterlängen bis etwa 13mm) als Miniatur-DMS. Sie verhalten sich hinsichtlich des Selbsterwärmungseffekts wesentlich günstiger, da die elektrische Belastung pro Gitterfläche bei gleichem Widerstand niedriger ist. Das letztere Argument kann dann bedeutsam werden, wenn DMS auf Plastikwerkstoffe oder andere Materialien mit schlechter Wärmeleitfähigkeit installiert werden müssen. Nicht hinreichende Wärmeableitung führt zur Erwärmung des Messgitters, des Trägermaterials, der Kleberschicht und der Bauteiloberfläche und kann zu einem merklichen, unerwünschten Einfluss auf das DMS-Verhalten und die Messgenauigkeit führen (s. Vishay Micro-Measurements-TechNote TN-502).

Eine weitere Anwendung "langer" DMS - in diesem Fall solcher mit sehr langen Gittern - liegt im Bereich von Dehnungsmessungen auf inhomogenen Werkstoffen. Beton; eine Mischung aus Zuschlagstoffen (gewöhnlich Kies) und Sand-Zement, ist hierfür ein gutes Beispiel. Wird die Dehnung an einem Betonkörper gemessen, ist gewöhnlich ein DMS mit so großer Gitterlänge auszuwählen, dass diese eine Anzahl der Zuschlagstoffkörper (wie Kiesel) und das dazwischenliegende Sand-Zement-Gemisch überspannt, um so die Dehnung des Betons zu erfassen, nicht aber die seiner Einzelkomponenten. Mit anderen Worten: Es ist in solchen Fällen in der Tat die *mittlere* Dehnung gefragt und nicht die eventuell stark variierenden Dehnungen, die über einer gegebenen Distanz der Betonoberfläche auftreten können. Es gilt die Regel, dass bei Messungen auf Kompositwerkstoffen die aktive Gitterlänge im Vergleich zu den Dimensionen der Inhomogenitäten des Materials groß sein soll.

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

Als generelle Richtlinie, und wenn die obigen Überlegungen keine andere Vorgehensweise vorschreiben, sollten Gitterlängen zwischen 3mm und 6mm den Vorzug finden. Innerhalb dieser Längen liegt die größte Variationsbreite von Gittergeometrien vor, und auch die Lagerhaltung ist für diese Abmessungen am großzügigsten. Dazu kommt, dass kleinere oder auch größere DMS in der Regel teurer sind, längere DMS keine merkliche Verbesserung bezüglich Dehnungsbereich, Stabilität und Ermüdungsverhalten erbringen, wogegen kürzere Gitterlängen als 3mm bis 6mm in Bezug auf die genannten Parameter schlechteres Verhalten zeigen.

2.5 Gittergeometrien

Der Begriff Gittergeometrie setzt sich zusammen aus der Form des DMS-Messgitters, bei mehrgittrigen DMS aus der Anzahl und der Richtungsorientierung der Gitter, sowie schließlich aus der Konfiguration der Anschlussfäden und anderer Konstruktionsmerkmale, die als Standard für einen bestimmten DMS-Typ gelten. Alle Einzelheiten bezüglich der Gitterform und der Anschlussfäden sind in der Spalte "DMS-Geometrie" des DMS Data Book dargestellt. Die große Variationsbreite der dort auffindbaren Gittergeometrien beabsichtigt allen Anforderungen, die sich aus normalen DMS-Installationen und Dehnungsmessungen ergeben; nachzukommen.

Ob die Geometrie eines Einzelgitter-DMS einem gegebenen Anwendungsfall gerecht wird, hängt hauptsächlich von folgenden Merkmalen ab:

Lötanschlussfäden - Diese sollten in Größe und Positionierung am DMS-Gitter natürlich mit den Gegebenheiten an der Installationsstelle kompatibel sein. Auch ist es wichtig, dass sie in ihrer Ausführung die Fertigkeiten des Messtechnikers bei den notwendigen Verdrahtungsarbeiten nicht über Gebühr strapazieren.

Gitterbreite - Liegen ernsthafte Dehnungsgradienten quer zur Gitterachse vor, wird ein schmales Messgitter Fehler aus dem mittelwertbildenden Effekt minimieren. Breitere Messgitter, wenn aufgrund existierender Platzverhältnisse möglich, begünstigen die Wärmeableitung und verbessern das Stabilitätsverhalten des DMS, besonders bei Anwendungen auf Werkstoffen mit schlechter Wärmeleitfähigkeit.

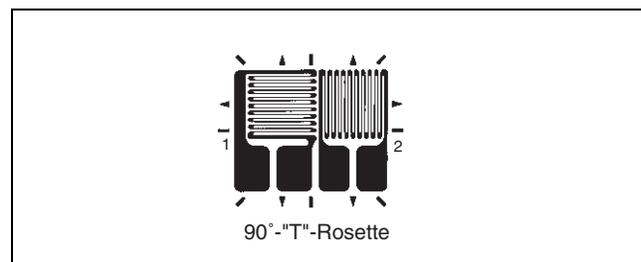
Elektrischer Widerstand - In bestimmten Fällen liegt der einzige Unterschied zwischen zwei Gittergeometrien innerhalb einer DMS-Serie im elektrischen Widerstand, typischerweise 120Ω oder 350Ω. Liegt diese Alternative vor, ist der höherohmige DMS vorzuziehen, weil er die Wärmeentwicklung im Messgitter bei gleicher Speisespannung um den Faktor 3 reduziert. Ein höherer Widerstand hat außerdem den Vorteil, Kabel- und Verdrahtungseinflüsse zu minimieren, wie z. B. die Erniedrigung der Dehnungsempfindlichkeit aufgrund in Serie liegender Kabelwiderstände zum DMS. Unerwünschte

Signale, die sich aus Widerstandsänderungen der Kabel bei Temperatureinwirkungen ergeben, werden ebenfalls weniger in Erscheinung treten. Ganz ähnlich wird das Signal/Rauschverhältnis mit DMS höheren Widerstands bei gleicher Speisespannung wesentlich verbessert, wenn in der Messschaltung Schleifringe, Schalter oder andere Komponenten enthalten sind, die zu sprunghaften, undefinierten Widerstandsänderungen neigen.

In der experimentellen Spannungsanalyse würde ein DMS mit Einzelgitter, auch Linear-DMS genannt, nur eingesetzt werden, wenn der Spannungszustand an der Messstelle eindeutig einachsig und die Hauptdehnungsrichtungen mit hinreichender Genauigkeit ($\pm 5\%$) bekannt sind.

Diese Forderungen bedeuten für die sinnvolle Anwendung von Linear-DMS in der Spannungsanalyse ernsthafte Einschränkungen. Und wenn das Vorliegen eines zweiachsigen Spannungszustands nicht in Betracht gezogen wird, kann das zu großen Fehlern bei der Berechnung der Spannungsgrößen aus der Dehnungsmessung mit einem Linear-DMS führen.

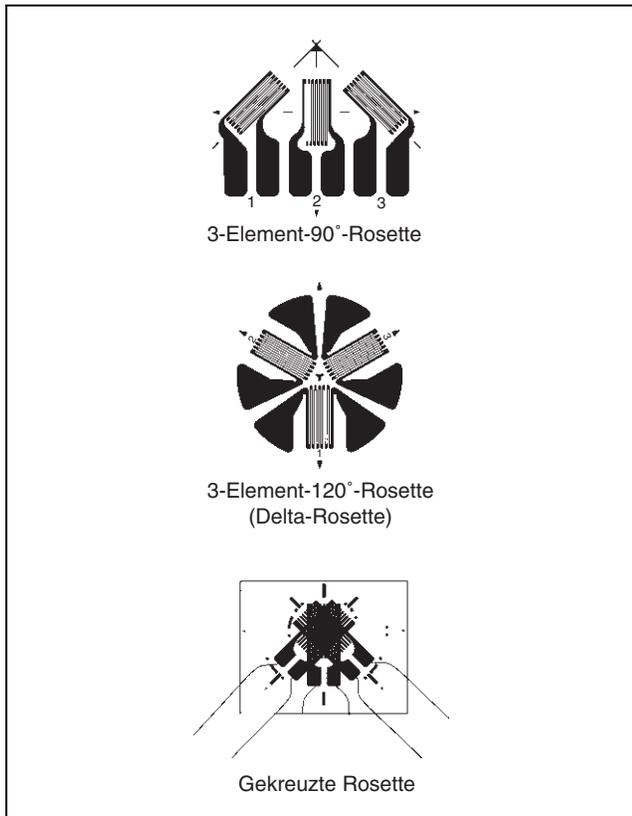
Für einen zweiachsigen Spannungszustand - ein häufig vorkommender, DMS-Messungen notwendig machender Fall - werden 2- oder 3-Element-Rosetten benötigt, um die Hauptspannungen zweifelsfrei bestimmen zu können. Sind die Richtungen der Hauptspannungen von vornherein bekannt, kann eine 2-Element-90°-Rosette, auch unter der Bezeichnung T-Rosette bekannt, eingesetzt werden, die so installiert wird, dass ihre Gitterachsen mit den Hauptspannungsrichtungen übereinstimmen. Manchmal können die Hauptspannungsrichtungen mit hinreichender Genauigkeit überlegungsmäßig bestimmt werden. Form und Symmetrieachsen des Messobjekts und Belastungsrichtungen können so sein, dass sich die Hauptspannungsrichtungen aus der Symmetrie der Situation ergeben, wie dies z. B. bei zylindrischen Druckkesseln der Fall ist. Für die Bestimmung der Hauptspannungsrichtungen bietet sich aber auch das Photo-Stress® (spannungsopt. Verfahren) als sehr effektiv an.



Im allgemeinsten Fall einer Bauteiloberflächenspannung, bei der die Hauptspannungsrichtungen unbekannt sind und auch nicht überlegungsmäßig bestimmt werden können, muss eine 3-Element-Rosette angewandt werden, um die Hauptspannungsgrößen bestimmen zu können. Die Rosette kann in beliebiger Richtung installiert werden; allerdings wird man üblicherweise so vorgehen, dass eine ihrer Gitter-

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

richtungen entlang einer bestimmenden Achse des Messobjekts ausgerichtet ist. 3-Element-Rosetten werden als 45°-Rechtwinkel-Rosetten oder aber 60°-Delta-Rosetten hergestellt. In früheren Zeiten haben 45°-Rechtwinkel-Rosetten den Vorzug gefunden, da ihre Auswertgleichungen etwas einfacher sind. Mit der heute zur Verfügung stehenden Computerauswertung spielt das keine Rolle mehr, und gewöhnlich wird derjenige Rosettentyp herangezogen, der am ehesten verfügbar ist.



Wird mit Rosetten gearbeitet, muss der Unterschied zwischen planaren und gekreuzten Rosetten sorgfältig in Betracht gezogen werden. Planare Rosetten sind solche, bei denen die Einzelgitter in einer Ebene nebeneinanderliegen, während bei gekreuzten Rosetten die Gitter übereinander angeordnet sind. Für jede gegebene Gitterlänge ist die Planar-Rosette der gekreuzten Rosette in Bezug auf die Wärmeabgabe an das Messobjekt vorzuziehen, wobei als Folge mit besserer Stabilität bei statischen Dehnungsmessungen gerechnet werden kann. Das gilt auch für den Fall, dass senkrecht zur Messobjektfläche ein scharfer Dehnungsgradient existiert (wie im Biegefall). Dann wird die Planar-Rosette genauere Dehnungsdaten liefern, da sich alle Gitter in naher und gleichmäßiger Entfernung zur Oberfläche befinden. Auch die geringere Formbarkeit gekreuzter Rosetten ist bei gekrümmten Bauteiloberflächen zu beachten.

Andererseits kann die Planar-Rosette bei starken Dehnungsgradienten in der Oberflächenebene des Testobjekts zu Messfehlern führen, da sich die einzelnen Gitter in unterschiedlichen Bereichen des Dehnungsfeldes befinden. In solchen Fällen ist eine gekreuzte Rosette in der Regel vorzuziehen. Gekreuzte Rosetten werden auch dann bevorzugt, wenn die Platzverhältnisse an der Messstelle eingeschränkt sind.

2.6 Optionen

Unsere Vishay Micro-Measurements offeriert zu den Standardausführungen ihrer DMS und Spezialsensoren eine Reihe von Optionen. Das Hinzufügen dieser Optionen erhöht in der Regel die Kosten, was aber im Allgemeinen durch die erlangten Vorteile aufgewogen wird. Als Beispiele für diese Argumentation können geltend gemacht werden:

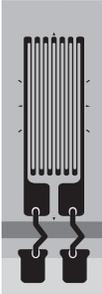
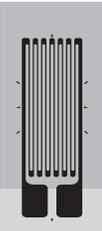
- Beträchtliche Reduzierung der Installationszeit und Installationskosten
- Geringere benötigte Fertigkeiten des Personals, um zuverlässige Installationen durchzuführen
- Erhöhte Zuverlässigkeit der Applikation
- Vereinfachung der Installationstechniken unter erschwerten Bedingungen
- Verbesserter Schutz für die DMS/Sensoren während Installation und Handhabung, sowie gegen Umgebungseinflüsse während der Anwendung
- Erzielen verbesserter Leistungsmerkmale

Die Verfügbarkeit jeder Option ist abhängig von der DMS-Serie und der Gittergeometrie. Die Standard-Optionen für jeden DMS/Sensor sind im DMS Data Book aufgeführt. Im folgenden sind die verfügbaren Optionen zusammengefasst.

Standard-Katalog - Optionen

Option	Kurze Beschreibung
W	Integrierte Lötstützpunkte und gekapselt
E	Gekapselt mit freien Lötanschlussfahnen
SE	Vorverzinnte Lötunkte und gekapselt
L	Anschlussdrähtchen
LE	Anschlussdrähtchen und gekapselt
P	Mit Messkabel und gekapselt
P2	Mit Messkabel, nur bei Serie CEA

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

Option W	Verfügbar mit DMS-Serien: EA, EP, WA, ED, WD, EK, WK	
<p>Allgemeine Beschreibung: Diese Option bedeutet volle Kapselung des DMS und den Zusatz von dünnen Lötstützpunkten nach Art gedruckter Schaltungen anschließend an die DMS-Anschlussfahnen. Beryllium/Kupfer-Bänder verbinden die Lötstützpunkte mit den DMS-Anschlussfahnen. Die Lötstützpunkte bestehen aus 0,036mm dicken Kupferleitern auf 0,038mm dicker Polyimid-Folie. DMS mit der Option W besitzen somit eine robuste, gut geschützte Ausführung und erlauben das direkte Anbringen von größer dimensionierten Messkabeln, was bei normalen DMS nicht ohne weiteres möglich ist. Diese Option wird meistens mit EA-DMS und für allgemeine Zwecke eingesetzt. Lötzinn: Zinn-Silber-Legierung (+220°C) auf DMS mit Trägerfolie E; Blei-Zinn-Silber-Legierung (+300°C) für DMS mit Trägerfolie W. Einsatztemperaturgrenze: +200°C für DMS mit Trägerfolie E; +260°C für DMS mit Trägerfolie W. Messgitterschutz: Der gesamte DMS und ein Teilbereich der Lötstützpunkte sind mit Polyimidfolie gekapselt. Ermüdungsverhalten: Mit einer leichten Beeinträchtigung des für die DMS-Serie angegebenen Ermüdungsverhaltens ist zu rechnen, wenn der Dehnungspegel im Bereich der Lötstützpunkte nicht unter +/-1000µm/m liegt. Abmessungen: Da die Lötstützpunkte an die DMS-Anschlussfahnen anschließen, ergibt sich eine Verlängerung des Standard-DMS. Bei einigen Ausführungen kann sich auch die Breite leicht erhöhen. Dehnungsmessbereich: Option W wird bei einigen DMS-Serien, besonders bei solchen mit E-Trägern, den Dehnungsmessbereich erniedrigen: Dieser Effekt ist bei der Serie EP am stärksten. Diese Option sollte also mit EP-DMS möglichst nicht angewandt werden. Flexibilität: Die Kapselung der Option W macht die DMS etwas dicker und steifer. Ihre Schmiegsamkeit bei gekrümmten Flächen wird etwas reduziert. Im Bereich der Lötstützpunkte ergibt sich merklich erhöhte Steifigkeit. Widerstandstoleranz: Bei DMS mit abgedecktem Gitter ist die Toleranz gegenüber DMS mit offenem Gitter verdoppelt.</p>		
<p>Option E Verfügbar mit DMS-Serien: EA, ED, EK, EP</p> <p>Allgemeine Beschreibung: Die Option E besteht aus einer schützenden Kapselung aus Polyimidfilm von etwa 0,025mm Dicke. Das bedeutet für den DMS Robustheit und ausgezeichneten Schutz des Messgitters, ohne dass viel Flexibilität geopfert wird. Der Lötvorgang für die Verdrahtung wird sehr vereinfacht, weil durch eine eng begrenzte, offene Lötfläche auf der Anschlussfahne des DMS das Lötzinn nicht über eine unerwünscht große Fläche verlaufen kann. Option E trägt beträchtlich zur Langzeitstabilität bei, da das Messgitter während der DMS-Installation gegen schädigende Fingerberührungen und andere Kontaminierungen geschützt ist. Für einfache statische Messungen kann das Messkabel direkt an die Anschlussfahnen angelötet werden. In den meisten Fällen sollten aber nach der Verdrahtung zusätzliche Schutzabdeckmittel aufgetragen werden. Einsatztemperaturgrenze: Keine Beeinträchtigung durch Option E. Messgitterschutz: Das gesamte Messgitter sowie Teile der Anschlussfahnen sind gekapselt. Ermüdungsverhalten: Sind die DMS mit dünnen Verbindungsdrähtchen richtig verdrahtet, kann die maximal mögliche Dauerfestigkeit leicht erreicht werden. Abmessungen: Die Gesamtmaße des DMS werden nicht berührt. Dehnungsmessbereich: Der Dehnungsmessbereich von DMS wird durch die Option E eingeschränkt, da die zusätzliche Versteifung durch Polyimidkapselung zu einem früheren Versagen in der Klebeschicht führen kann, bevor der volle Dehnungsmessbereich des DMS ohne Option E erreicht ist. Widerstandstoleranz: Option E führt normalerweise zu einer Verdoppelung der Widerstandstoleranz.</p>		
<p>Option SE Verfügbar mit DMS-Serien: EA, ED, EK, EP</p> <p>Allgemeine Beschreibung: Option SE ist eine Kombination von vorverzinneten Lötunkten mit voller DMS-Kapselung aus 0,025mm dickem Polyimidfilm. In der Kapselung befindet sich lediglich eine Aussparung im Bereich der Lötunkte, die zum Anlöten der Verbindungsdrähtchen. DMS mit Option SE sind sehr flexibel und gegen Beschädigungen während der Installation gut geschützt. DMS mit dieser Option sind besonders zum Einsatz bei eingegengten Platzverhältnissen gedacht, da die Anschlussdrähtchen von den Lötunkten in jeder beliebigen Richtung weggeführt werden können. Die Option vergrößert die Gesamtmaße des DMS nicht, und die Trägerfolie kann bei Bedarf bis nahe an das Messgitter heran beschnitten werden. Option SE kann bei Miniatur-Messwertaufnehmern mittlerer oder niedriger Genauigkeitsklasse hilfreich sein, oder wenn Dehnungsmessungen an sehr kleinen Bauteilen vorgenommen werden müssen. Lötzinn: Zinn-Silber-Legierung, Schmelzpunkt +300°C. Um einen Verlust an Langzeitstabilität zu vermeiden, sollte bei Option SE nur mit nichtkorrosiven Flussmitteln gelötet werden, und alle Flussmittelreste müssen nach dem Löten mit <i>M-Line Rosin Solvent</i> sorgfältig entfernt werden. Danach sollte ein Schutzabdeckmittel aufgetragen werden. Einsatztemperaturgrenzen: Keine Beeinträchtigung durch Option SE. Messgitterschutz: Der gesamte DMS ist gekapselt. Ermüdungsverhalten: Sind die DMS mit dünnen Verbindungsdrähtchen richtig verdrahtet, kann die maximal mögliche Dauerfestigkeit leicht erreicht werden. Abmessungen: Die Gesamtmaße des DMS werden nicht berührt. Dehnungsmessbereich: Der Dehnungsmessbereich von DMS wird durch Option SE eingeschränkt, da die zusätzliche Versteifung durch die Polyimidkapselung zu einem früheren Versagen in der Klebeschicht führen kann, bevor der volle Dehnungsmessbereich des DMS ohne Option erreicht ist. Flexibilität: DMS mit Option SE sind fast so gut auf gekrümmte Flächen formbar wie solche mit offenem Messgitter. Widerstandstoleranz: Option SE führt normalerweise zu einer Verdoppelung der Widerstandstoleranz.</p>		

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

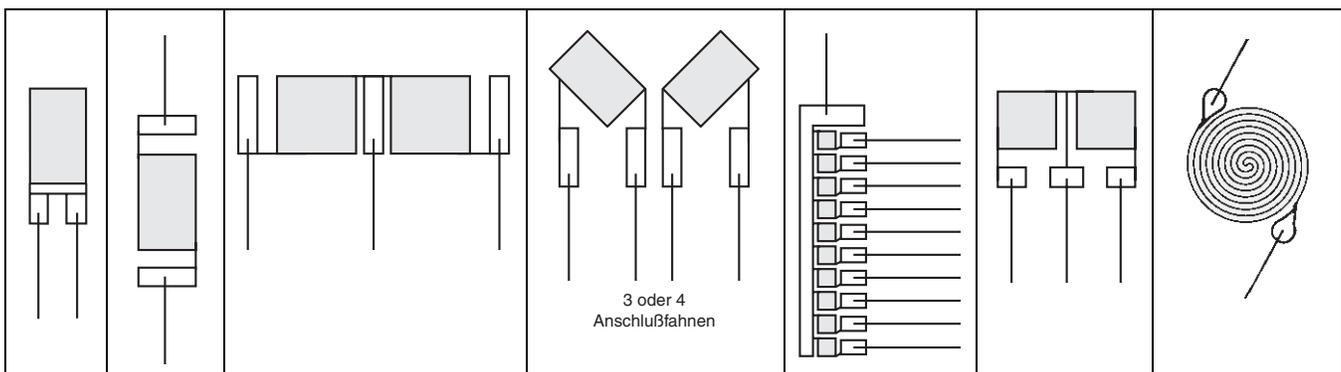
Option L	Verfügbar mit DMS-Serien: EA, ED, EK, EP	
<p>Allgemeine Beschreibung: Option L fügt DMS mit offenem Messgitter auf Polyimidträger weiche Kupferanschlussdrähtchen hinzu. Diese Anschlussdrähtchen sind flach, bandförmig, womit der DMS dünner und formbarer bleibt als das bei normalen runden Drähtchen mit vergleichbarem Querschnitt der Fall wäre. Gleichzeitig sind die Anschlussbändchen so geartet, dass sie leicht in beliebige Richtungen geformt werden können. Anschlussbändchen: Die nominalen Maße der Anschlussbändchen bei den meisten DMS sind 0,3 x 0,1 x 20mm (Breite x Dicke x Länge). Lötzinn: Zinn-Silber Legierung, Schmelzpunkt +220°C. Temperaturgrenze: +200°C. Ermüdungsverhalten: Normalerweise wird die Option L das Ermüdungsverhalten von DMS beeinträchtigen. Das liegt an der begrenzten Dauerschwingfestigkeit der Kupfer-Anschlussbändchen. Gelingt es allerdings, die Anschlussbändchen aus dem unmittelbaren Bereich hoher Dehnungsfelder herauszuhalten, wird diese Beeinträchtigung nicht eintreten. Für hochdynamische Anwendungen, zum Beispiel mit DMS der Serie ED, welche für solche Anwendungen gedacht sind, wird Option L gewöhnlich nicht empfohlen. Abmessungen: Die Gesamtabmessungen der Trägerfolie werden nicht berührt. Dehnungsmessbereich: Der Dehnungsmessbereich wird durch Option L normalerweise nicht beeinträchtigt. Flexibilität: DMS mit Option L sind weniger formbar als solche in Standardausführung. Widerstandstoleranz: Wird durch Option L nicht beeinflusst.</p>		

Option LE	Verfügbar mit DMS-Serien: EA, ED, EK, EP	
<p>Allgemeine Beschreibung: Diese Option bringt die gleichen Kupfer-Anschlussbändchen wie Option L, zusätzlich jedoch eine schützende Kapselung aus dünnem (0,025mm) Polyimidfilm. Die Kapselung bietet für den DMS einen ausgezeichneten Schutz bei der Installation. Sie trägt auch beträchtlich zum Schutz gegen Umgebungseinflüsse bei; die Anwendung separater Schutzabdeckmittel bleibt trotzdem empfohlen. DMS mit Option LE zeigen normalerweise bessere Langzeitstabilität als solche mit offenem Messgitter, die erst nach der Installation abgedeckt werden, was zu einem guten Teil daherrührt, dass die Kontamination der Messgitter während der Installation durch Fingerberührung oder andere schädliche Einflüsse ausgeschlossen bleibt. Anschlussbändchen: Weiche Kupfer-Anschlussbändchen 0,3 x 0,1 x 20mm (Breite x Dicke x Länge). Lötzinn: Zinn-Silber-Legierung, Schmelzpunkt +220°C. Einsatztemperaturgrenze: +200°C. Messgitterschutz: Der gesamte DMS ist gekapselt. In Richtung der Anschlussbändchen ist der kapselnde Polyimidfilm etwas kürzer als das Trägermaterial, um Kontakt zwischen Anschlussbändchen und Bauteiloberfläche zu vermeiden. Ermüdungsverhalten: Normalerweise wird die Option LE das Ermüdungsverhalten von DMS beeinträchtigen. Das liegt an der begrenzten Dauerschwingfestigkeit der Anschlussbändchen. Für hochdynamische Anwendungen, zum Beispiel mit DMS der Serie ED, welche für solche Anwendungen gedacht sind, wird Option LE gewöhnlich nicht empfohlen. Abmessungen: Die Gesamtmaße der Trägerfolie werden nicht berührt. Dehnungsmessbereich: Der Dehnungsmessbereich wird durch Option LE gewöhnlich eingeschränkt. Flexibilität: DMS mit Option LE sind weniger formbar als solche in Standardausführung. Widerstandstoleranz: Option LE verdoppelt normalerweise die Widerstandstoleranz.</p>		

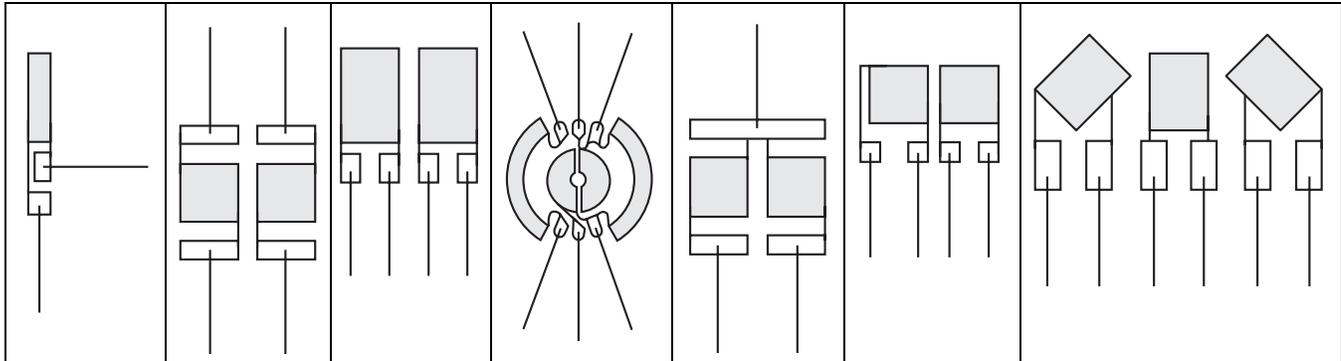
Orientierung der Anschlussdrähtchen bei den Optionen L und LE

Die Abbildungen auf Seite 11 zeigen die Standardorientierung der Anschlussdrähtchen bezogen auf die Gittergeometrie für die Optionen L und LE. Als allgemeine Regel gilt, dass die Drähtchen entlang der längsten DMS-Abmessung ausgerichtet sind. Die Illustration gilt

auch für die Orientierung der Anschlussdrähtchen der DMS-Serien WA, WK und WD, bei denen Drähtchen Standard sind, soweit die gezeigten Geometrien innerhalb dieser Serien vorliegen.



Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen



Option P	Verfügbar mit DMS-Serien: EA, N2A.	
<p>Allgemeine Beschreibung: Die Option P, die für viele DMS-Ausführungen der Serien EA und N2A verfügbar ist, bedeutet, dass diese DMS bereits mit Messkabeln geliefert werden, die an ihnen befestigt sind. Dünne Drähtchen, die aus dem DMS heraustreten, ergeben den Übergang zum Messkabel. Option P erübrigt praktisch jeden Lötvorgang bei der DMS-Installation. Drähtchen: Ein Paar dünne Kupferdrähtchen (134-AWP, lackisoliert), Länge 25mm. Messkabel: 3,1m farbcodiertes 3-Leiter-Flachkabel (AWG 26, Ø0,404 mm/Leiter), verzinnzte Kupferlitze mit PVC-Isolation (ähnlich dem Kabel 326-DFV). Lötzinn: Alle Lötverbindungen sind mit Zinn/Silber-Lot ausgeführt, Schmelztemperatur +220°C; die Messkabelenden sind vorverzinnt. Temperaturgrenzen: Der Temperatureinsatzbereich von DMS mit Option P reicht von -50°C bis +80°C. Diese Grenzen werden durch das Temperaturverhalten der PVC-Kabelisolation bestimmt. Gitterkapselung: Der gesamte DMS (Gitter plus Lötflächenbereich) ist abgedeckt (Option E). Ermüdungsverhalten: Das Ermüdungsverhalten der DMS wird durch Option P eingeschränkt, da die Kupferverbindungsdrähtchen bei zyklischer Belastung eine begrenzte Dauerfestigkeit zeigen. Verfügbarkeit: Option P ist mit den meisten DMS-Ausführungen der Serien EA und N2A mit Gitterlängen über 1,5mm verfügbar, welche an einem Gitterende nebeneinanderliegende Lötflächen haben und sich für vollständige Kapselung (Option E) eignen. Verschiedene Messkabeln, oder mit anderen DMS-Geometrien, auf Anfrage erhältlich. Abmessungen: DMS-Abmessungen werden durch Option P nicht verändert. Dehnungsbereich: Mit einem im Vergleich zum optionslosen DMS eingeschränkten Dehnungsbereich ist zu rechnen. Flexibilität: Die Flexibilität von DMS mit E-Träger wird durch Option P eingeschränkt. Elektrischer Widerstand: Jeder Leiter des Kabels hat einen Widerstand von 0,13Ω/m. Der DMS-Widerstand ist an den Lötflächen des DMS gemessen. K-Faktor: Der K-Faktor der DMS wird im optionslosen Zustand bestimmt.</p>		

Option P2	Verfügbar mit DMS-Serien: EA, N2A	
<p>Allgemeine Beschreibung: Messkabel an DMS der Serie CEA. Die Option P2 erübrigt praktisch jeden Lötvorgang während der Installation von DMS der Serie CEA. Messkabel: 3,1m farbcodiertes 3-Leiter-Flachkabel (AWG 30, Ø0,255mm/Leiter), verzinnzte Kupferlitze mit PVC-Isolation (ähnlich dem Kabel 330-DFV). Lötzinn: Lötverbindungen mit Zinn/Blei-Lot, Schmelztemperatur +180°C Messkabelenden vorverzinnt. Temperaturgrenzen: Der Temperatureinsatzbereich der DMS mit Option P2 reicht von -50°C bis +80°C. Diese Grenzen werden durch das Temperaturverhalten der PVC-Kabelisolation bestimmt. Gitterkapselung: Das gesamte Messgitter ist gekapselt. Lötflächen bleiben offen. Ermüdungsverhalten: Wird normalerweise durch Option P2 nicht verändert. Verfügbarkeit: Option P2 ist mit den meisten DMS der Serie CEA verfügbar. Abmessungen: Bleiben durch Option P2 unbeeinflusst. Dehnungsbereich: Standarddehnungsbereich für DMS der Serie CEA. Flexibilität: Keine nennenswerte Erniedrigung der Flexibilität durch Option P2. Elektrischer Widerstand: Jeder Leiter des Kabels hat einen Widerstand von 0,36Ω/m. Der DMS-Widerstand ist an den DMS-Lötflächen gemessen. K-Faktor: Der K-Faktor der DMS wird im optionslosen Zustand bestimmt.</p>		

2.7 Charakteristika der Standard-Katalog-Optionen für DMS der Serie EA

Ein weiterer Aspekt der DMS-Auswahl besteht darin, dass entsprechende Optionen mitunter Kompromisse erforderlich machen. Es ist z. B. möglich, dass eine Option, die ein bestimmtes Leistungsmerkmal eines DMS maximiert, andererseits vielleicht ein wesentlich größeres Geschick des Anwenders bei der DMS-Installation erfordert. Wegen der zahlreichen Wechselbeziehungen zwischen Installationserfordernissen und DMS-Leistungsparametern, die sich aus Optionen ergeben, werden die relativen Vorteile

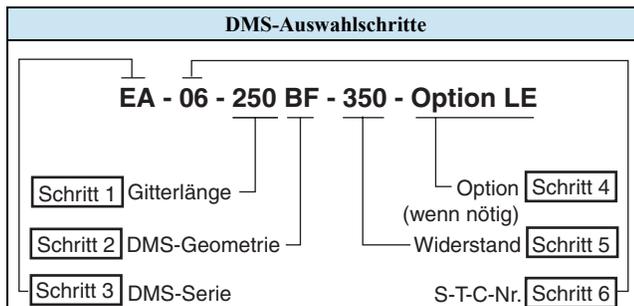
der Optionen in der vorstehenden Tabelle als Hilfe zur Auswahl von Optionen qualitativ zusammengefasst. Dabei werden die Leistungsparameter eines DMS der Serie EA mit offenem Messgitter mit der willkürlich festgelegten Note 5 bewertet. Noten über 5 bedeuten, dass ein bestimmtes Leistungsmerkmal durch eine entsprechende Option verbessert wird, während Noten unter 5 eine Einschränkung des Leistungsmerkmals anzeigen. Die Note 10 ist demzufolge die Bestnote für eine gegebene DMS/Option-Kombination.

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

Installations- oder Leistungsmerkmale	Standard-Optionen					DMS-Serie CEA
	W	E	SE	L	LE	
Allgemeine Einfachheit der Installation	8	7	6	5	6	10
Einfache Verdrahtung	10	8	7	7	8	10
Schutz des Messgitters vor negativen Umwelteinflüssen	8	8	8	5	8	8
Ermüdungsfestigkeit bei zyklischer Belastung	2	7	8	3	4	4
Dehnfähigkeit	2	3	3	4	3	3
Toleranz des elektrischen Widerstands	3	3	3	5	3	3
Versteifungseffekte	2	3	3	5	3	3

Bei den Auswahlüberlegungen sollte auch beachtet werden, dass sehr viele Standard-DMS-Typen ohne Option lagerhaltig sind, während DMS mit Optionen gewöhnlich nach Auftrag gefertigt werden und eine Mindestabnahmemenge unerlässlich ist.

Da bei Dehnungsmessungen in der experimentellen Beanspruchungsanalyse die Standardoptionen meistens für DMS der Serie EA gefragt sind, werden die Informationen in diesem Abschnitt vorzugsweise auf solche Anwendungen bezogen.



Wird die Anwendung eines DMS der Serie EA mit Option überlegt, sollte man zuerst herausfinden, ob ein äquivalenter DMS-Typ aus der Serie CEA den Anforderungsbedingungen entspricht. Vergleicht man z. B. einen DMS der Serie EA mit Option W mit einem funktionsgleichen DMS der Serie CEA, wird man herausfinden, dass der letztere charakterisiert ist durch niedrigere Kosten, größere Flexibilität und Formbarkeit sowie mit einem überlegenen Ermüdungsverhalten. Der einzige mögliche Vorteil für einen EA-DMS mit Option W wäre die größere Vielfalt der verfügbaren Gittergeometrien und die gelegentliche Notwendigkeit wirklich großer Anschlusslötlflächen.

3.0 Vorgehensweise bei der DMS-Auswahl

Das Verhalten eines DMS in einer gegebenen Anwendung wird durch jedes Element der Konstruktion und Herstellung des DMS beeinflusst. Die Vishay Micro-Measurements bietet eine sehr große Vielzahl verschiedener DMS-Typen, um einem möglichst großen Anforderungsbereich bei Dehnungsmessungen gerecht zu werden. Trotz der großen Anzahl von Veränderlichen kann der DMS-Auswahlprozess auf einige wenige grundsätzliche Schritte reduziert werden. Aus der nebenstehenden Darstellung der

DMS-Typenkodierung geht klar hervor, dass der Auswahlprozess, sieht man von möglichen Optionen ab, auf fünf Parametern beruht. Diese sind: Die DMS-Serie, die Temperatur-Selbstkompensations-Zahl (S-T-C-Nr.), die DMS-Gitterlänge und -Gittergeometrie, sowie der elektrische Widerstand.

Von den genannten Parametern stellen DMS-Gitterlänge und DMS-Gittergeometrie gewöhnlich den ersten und zweiten Auswahlschritt dar - abhängig vom zur Verfügung stehenden Installationsplatz und vom vorliegenden Spannungsfeld (ein- oder mehrachsig) sowie vom Dehnungsgradienten, mit dem zu rechnen ist. Eine Gitterlänge von 3mm ist ein guter Startpunkt hinsichtlich der Betrachtungen zur DMS-Abmessung. Diese Gitterlänge bietet die größte Auswahlmöglichkeit auch im Hinblick auf die restlichen Parameter wie Gittergeometrie, DMS-Serie und elektrischer Widerstand. Ein solcher DMS ist, ebenso wie es seine Lötanschlussfahnen sind, groß genug, um bequeme Handhabung und einfache Installationsprozeduren zu gewährleisten; gleichzeitig zeigt er Leistungsmerkmale, die denen größerer DMS nicht nachstehen.

Prinzipielle Gründe für die Wahl größerer DMS bei einer gegebenen Messaufgabe wären etwa folgende: a) größere Gitterfläche für bessere Wärmeabgabe, b) verbesserte Mittelwertbildung für die Dehnung unter dem Messgitter bei Messungen auf inhomogenen Werkstoffen wie z. B. Faserverbundwerkstoffen, oder c) leichtere, bessere Handhabbarkeit und etwas einfachere Installation, was aber nur für Gitterlängen bis 10mm gilt. Andererseits kann eine kurze Gitterlänge notwendig werden, wenn es gilt, lokalisierte Dehnungsspitzen bei Spannungskonzentrationen im Bereich von Bohrungen oder Kerbradien zu messen. Das Gleiche gilt selbstverständlich auch dann, wenn die zur Verfügung stehende Fläche für die DMS-Installation sehr begrenzt ist. Hinsichtlich der Gittergeometrie hat die erste Überlegung der Frage zu gelten, ob ein Linear-DMS mit nur einem Gitter oder aber, ob eine DMS-Rosette erforderlich ist (s. Abschnitt 2.5). Linear-DMS liegen in vielen verschiedenen Abmessungen und mit vielen verschiedenen Anordnungen der Lötanschlussfahnen vor, um so einer Vielzahl von Anwendungsanforderungen gerecht zu werden. Dies gilt ebenso für 2-Element-T-Rosetten. Werden 3-Element-Rosetten benötigt - ob in Rechtwinkel- oder Deltaausführung (s. Abschnitt 2.5), muss zwischen plana-

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

ren und gekreuzten Rosetten entschieden werden, wenn die richtige Gitterlänge festgelegt worden ist.

Das Format des DMS Data Book der Vishay Micro-Measurements ist so ausgelegt, dass es die DMS-Auswahl für die vorliegenden Messaufgaben vereinfacht. Ähnliche DMS-Geometrien sind für die jeweiligen Größen in Gruppen zusammengefasst und nach Gitterlängen aufgelistet. DMS-Typen, im Katalogteil Vorzugstypen, kommen für die experimentelle Spannungsanalyse am häufigsten zum Einsatz, sodass dieser Katalogteil bei der DMS-Auswahl immer zuerst zu Rate gezogen werden sollte.

Sind die initialen Auswahlentscheidungen hinsichtlich Gitterlänge und Gittergeometrie gefallen, wird beim nächsten Schritt über die DMS-Serie entschieden werden müssen, das heißt, die richtige Gitterlegierung/Trägermaterial-Kombination sowie die den entsprechenden Serien gemeinsamen Merkmale müssen gewählt werden. Dazu dient die tabellarische Darstellung der DMS-Serien im DMS Data Book, aus der die Auswahlempfehlungen für vorliegende "Versuchsprofile" oder Versuchsumstände entnommen werden können. Will man dem DMS einer ausgewählten Serie eine Standard-Option hinzufügen, sollte sie jetzt spezifiziert werden, allerdings nur vorläufig, da ihre Verfügbarkeit für die gewählte Gittergeometrie und DMS-Serie erst später, im Auswahlprozess, verifiziert werden kann.

Hat man die DMS-Serie ausgewählt (und, falls notwendig, eine Option), wird erneut auf das DMS Data Book Bezug genommen, um mit Rücksicht auf Gitterlänge und Gittergeometrie innerhalb der gewählten DMS-Serie die volle Typenbezeichnung des DMS zu ermitteln. Wird anhand des Katalogs festgestellt, dass die gewählte Kombination so nicht besteht, wird eine ähnliche Gittergeometrie innerhalb der gleichen Dimensionsgruppe oder eine nur leicht abweichende Größe innerhalb der Geometriegruppe den Anwendungsforderungen in der Regel ebenso gut gerecht werden. In Extremfällen mag es notwendig werden, auf eine andere DMS-Serie auszuweichen und innerhalb dieser den bis dahin durchgeführten Auswahlprozess zu wiederholen. Speziell bei routinemäßigen Dehnungsmessungen wird oftmals mehr als nur eine Gitterlängen/Geometrie-Kombination für die gegebenen Versuchsanforderungen passen. Dann ist es freilich ratsam, den DMS aus der Super-Stock-Auflistung (Vorzugstypen) auszuwählen, um längere Lieferzeiten oder Mindestliefermengen zu umgehen.

Wie bereits im Abschnitt 2.5 diskutiert, ergeben sich bei Auswahl eines DMS-Widerstands von 350Ω oft Vorteile, wobei darauf geachtet werden muss, dass der angewandte Brückenverstärker mit diesem Widerstand kompatibel ist. Diese Entscheidung kann allerdings durch Kostenüberlegungen beeinflusst werden, besonders, wenn es um kleine Gitterlängen geht. Außerdem muss bei DMS hohen Widerstands mit einer gewissen Beeinträchtigung des Ermüdungsverhaltens gerechnet werden. Schließlich muss in die komplette Typenbezeichnung des DMS noch die

S-T-C-Nummer (Temperatur-Selbstkompensationszahl) eingetragen werden, die man einer Tabelle im DMS Data Book entnehmen kann. Damit ist der DMS-Auswahlvorgang vollständig. Für jeden Auswahlschritt kann die anschließende DMS-Auswahl-Checkliste als Hilfe hinzugezogen werden, um bei der Auswahl den Versuchsbedingungen und Versuchsanforderungen hinreichend Rechnung zu tragen.

↓ Kriterien zur Parameterauswahl	
<p><u>Auswahlschritt 1</u> Parameter: Gitterlänge</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Dehnungsgradient <input type="checkbox"/> Bereich maximaler Dehnung <input type="checkbox"/> Erforderliche Genauigkeit <input type="checkbox"/> Stabilität bei statischer Messung <input type="checkbox"/> Maximaldehnung <input type="checkbox"/> Ermüdungsverhalten <input type="checkbox"/> Wärmeabgabe <input type="checkbox"/> Verfügbarer Installationsplatz <input type="checkbox"/> Installationsschwierigkeit
<p><u>Auswahlschritt 2</u> Parameter: Gittergeometrie</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Dehnungsgradient (in der Oberflächenebene und in der Normalen dazu) <input type="checkbox"/> Ein- oder zweiachsiges Spannungsfeld <input type="checkbox"/> Wärmeabgabe <input type="checkbox"/> Verfügbarer Installationsplatz <input type="checkbox"/> Installationsschwierigkeit <input type="checkbox"/> Verfügbarkeit des Widerstandswerts
<p><u>Auswahlschritt 3</u> Parameter: DMS-Serie</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Art der Messung (statisch, dynamisch, plastische Verformung, etc.) <input type="checkbox"/> Versuchstemperatur <input type="checkbox"/> Versuchsdauer <input type="checkbox"/> Ermüdungsverhalten <input type="checkbox"/> Erforderliche Genauigkeit <input type="checkbox"/> Installationsschwierigkeit
<p><u>Auswahlschritt 4</u> Parameter: Optionen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Art der Messung (statisch, dynamisch, plastische Verformung, etc.) <input type="checkbox"/> Installationsumgebung (Labor, Messfeld) <input type="checkbox"/> Stabilitätsanforderungen <input type="checkbox"/> Lötprobleme mit Probenmaterial (Plastik, Knochen etc.) <input type="checkbox"/> Verfügbarer Installationsplatz <input type="checkbox"/> Begrenzte Installationszeit
<p><u>Auswahlschritt 5</u> Parameter: DMS-Widerstand</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Wärmeabgabe <input type="checkbox"/> Messkabeinfluss <input type="checkbox"/> Signal/Rausch-Verhältnis
<p><u>Auswahlschritt 6</u> Parameter: S-T-C-Nummer</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Probenmaterial <input type="checkbox"/> Versuchstemperatur <input type="checkbox"/> Erforderliche Genauigkeit

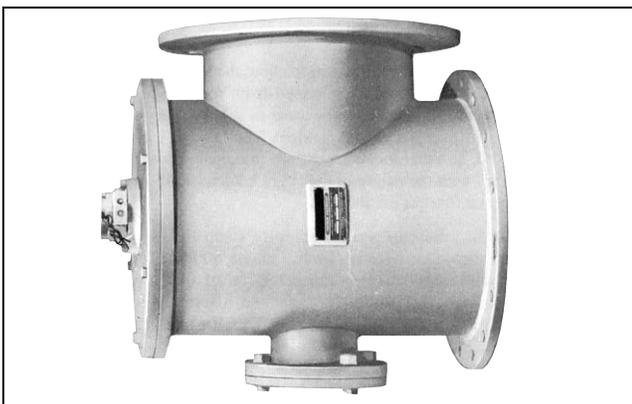
Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

4.0 Checkliste zur DMS-Auswahl

Die Checkliste bietet eine schnelle und sichere Hilfe, um sicherzustellen, dass keine kritischen Anforderungen aus dem Versuchsprofil übersehen werden, welche die DMS-Auswahl beeinflussen können. Allerdings bezieht sie sich im Wesentlichen auf konventionelle Anforderungen im Bereich routinemäßiger Spannungsanalyse. "Exotische" Anwendungen umfasst sie eher nicht, wie zum Beispiel Messungen unter Kernstrahlung, bei starken magnetischen Feldern, hohen Zentrifugalkräften oder dergleichen mehr.

5.0 Praktische Auswahlbeispiele

In diesem Abschnitt werden drei Beispiele zu DMS-Auswahlprozeduren für repräsentative Situationen in der experimentellen Spannungsanalyse dargestellt. Dabei wird versucht, die Beweggründe für bestimmte Auswahlentscheidungen plausibel zu erläutern. Es sollte allerdings beachtet werden, dass ein erfahrener Spannungsanalytiker bei der DMS-Auswahl den in den Beispielen gezeigten Schritt-für-Schritt-Prozeduren gewöhnlich so nicht folgen wird. Unter gleichzeitiger Beachtung der Versuchsbedingungen, der Installationsschwierigkeiten und der Versuchsanforderungen wird er vielmehr im DMS Data Book rasch die geeignet erscheinenden Kandidaten aus der Kombination von Gittergeometrie, DMS-Serie und Gitterlänge aussondern, um aus diesen dann anhand der Versuchs-kriterien eine Feinauswahl des DMS-Typs zu treffen, der schließlich für die Messaufgabe zu spezifizieren ist. Indes: Ob unter Einhaltung eines streng formalisierten Auswahlprozesses oder anderswie - ein kenntnisreicher Praktiker wird den in der Checkliste erwähnten Auswahlkriterien immer die notwendige Beachtung zukommen lassen.



A) Konstruktionsstudie eines Druckgefäßes

Es sind Dehnungsmessungen am verkleinerten Kunststoffmodell eines Druckgefäßes durchzuführen. Das Modell wird statischen Tests bei oder in der Nähe von Raumtemperatur unterzogen. Obwohl sich die Gesamtuntersuchungen über mehrere Monate hinziehen können, werden sich die individuellen Versuche jeweils nur auf einige Stunden erstrecken.

DMS-Auswahl

- 1. Gitterlänge:** Sehr kleine Gitterlängen sollten vermieden werden, um Wärmeabgabeprobleme zu vermeiden, die sich aus der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffmaterials ergeben. Das Modell ist relativ groß und anscheinend frei von ernst zu nehmenden Dehnungsgradienten. Folglich wird eine Gitterlänge von 6mm ausgewählt, da innerhalb dieser Länge die größte Auswahl an Gittergeometrien zur Verfügung steht.
- 2. Gittergeometrie:** In einigen Bereichen des Modells sind die Hauptdehnungsrichtungen aus den ersichtlichen Symmetrieachsen ableitbar, und Linear-DMS können somit ausgewählt werden. Aus den innerhalb der gewählten Gitterlänge verfügbaren Gittergeometrien ist die Geometrie 250BF (s. DMS Data Book) wegen des hohen Widerstands ein guter Kompromiss, weil damit Probleme in Bezug auf Selbsterwärmungseffekte wegen zu hohen Stromflusses minimiert werden. In anderen Bereichen des Modells sind die Hauptdehnungsrichtungen überlegungsmäßig nicht feststellbar, womit 3-Element-Rosetten notwendig werden. Es sollte eine "planare" Rosette gewählt werden, weil gekreuzte Rosetten beträchtliche Probleme in Hinsicht von Versteifungseffekten am Modell sowie bezüglich zu befürchtender Selbsterwärmungseffekte hervorrufen können. Wiederum wegen des höheren Widerstands ist die Geometrie 250RD (s. DMS Data Book) eine gute Wahl.
- 3. DMS-Serie:** Das Polyimid-Trägermaterial ist vorzuziehen, weil es wegen seines niedrigen Elastizitätsmoduls die Versteifungseffekte am Modell minimieren wird. Da sich die Dehnungsmessungen im Raumtemperaturbereich abspielen und statischer Natur sind, kommt Konstantan als Gitterlegierung in Frage. Damit ist die Entscheidung für die DMS-Serie EA gefallen.
- 4. Optionen:** Während der DMS-Verdrahtung sollte vermieden werden, das Modell großer, lokal begrenzter Temperatureinwirkungen auszusetzen. Also wird die Option L gewählt (DMS mit vorgefertigten Drähtchen), sodass an die Drähtchen das Messkabel direkt angebracht werden kann, ohne dass an den DMS-Lötflächen selbst gelötet werden muss. Option L ist der Optionenkombination LE vorzuziehen, weil die Option E (gekapseltes Gitter) zu Versteifungseffekten beitragen würde.
- 5. Elektrischer Widerstand:** Im vorliegenden Fall ist wegen des Widerstands bereits während des Auswahl-schrittes 2 entschieden worden, wo aus den Möglichkeiten vorhandener Gittergeometrien die Alternative eines höheren Widerstands gewählt worden war, das heißt, die Geometrie 250RD wurde anstelle der Geometrie 250RA ausgewählt. Damit ist der gewählte elektrische Widerstand 350Ω .
- 6. S-T-C-Nummer:** Idealerweise sollte der DMS für das Modellmaterial temperaturselbstkompensierend sein.

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen

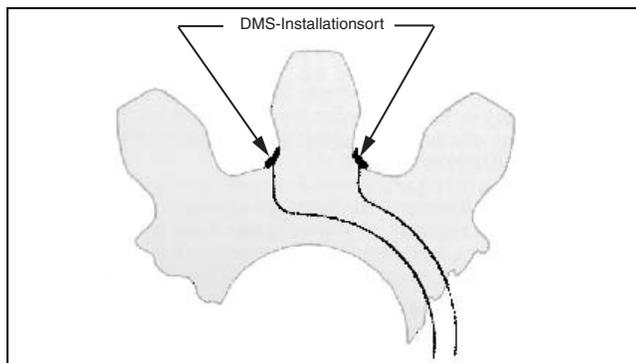
Das ist aber nicht immer möglich, weil Kunststoffe, insbesondere Faserverbundwerkstoffe, hinsichtlich ihres Temperaturexpansionskoeffizienten eine große Variationsbreite aufweisen. Für nicht faserverstärkte Kunststoffe werden in der Regel die S-T-C-Nummern 30, 40 oder 50 gewählt. Wenn eine exakte Anpassung bei Kunststoffen nicht möglich ist, sollte (aus Lagerhaltungsgründen und zur schnelleren Verfügbarkeit) auf die S-T-C-Nummer 13 ausgewichen und der Versuch bei konstanter Temperatur durchgeführt werden.

DMS-Typenbezeichnung

Die beschriebenen Auswahlsschritte 1 bis 6 resultieren in den DMS-Typen

EA-30-250BF-350/Option L (Linear-DMS)

EA-30-250RD-350/Option L (3-Element-Rosette)



B) Dynamische Spannungsanalyse am Getriebebestirrad einer Hydraulikpumpe

Es sind Dehnungsmessungen am Zahnfuß eines Getriebezahnrads durchzuführen, während die Pumpe in Betrieb ist. Der Kehlradius am Zahngrund, dem Ort der DMS-Installation, beträgt etwa 3mm, und für die Versuchstemperatur wird ein Bereich von -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ erwartet.

DMS-Auswahl

- 1. Gitterlänge:** Für diese Anwendung muss eine Gitterlänge gewählt werden, die klein ist im Vergleich zum genannten Kehlradius. Eine Gitterlänge von 0,4mm wäre vorzuziehen, aber ein Blick in das DMS Data Book lässt schnell erkennen, dass damit die Auswahlmöglichkeiten in Bezug auf verfügbare Geometrien und Gitterlegierungen stark eingeschränkt sind. Um Probleme, die während der Auswahlsschritte 2 und 3 entstehen könnten, von vornherein zu vermeiden, wird deshalb eine Gitterlänge von 0,8mm gewählt.
- 2. Gittergeometrie:** Da aus der Form und dem Betriebseinsatz des Bauteils die Hauptdehnungsrichtungen klar ersichtlich sind, können Linear-DMS eingesetzt werden. Es sollte eine DMS-Ausführung ausgesucht werden, bei der die Lötanschlussfahnen nebeneinander an einem Gitterende liegen, um die Verdrahtungsführung

so legen zu können, dass einerseits ein ungestörter Pumpenbetrieb ermöglicht und andererseits die Verdrahtung beim Betrieb nicht zerstört wird. Unter diesen Voraussetzungen fällt die Entscheidung für die DMS-Geometrie 031CF (s. DMS Data Book).

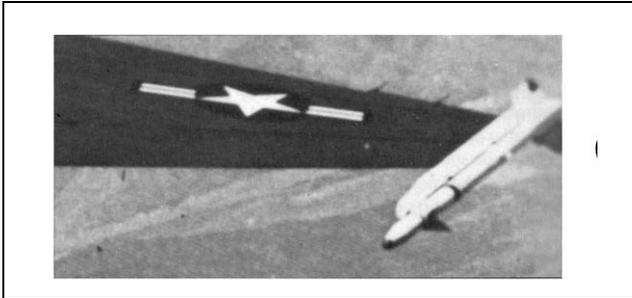
- 3. DMS-Serie:** Für den vorliegenden Anwendungsfall werden relativ niedrige Dehnungspegel erwartet, und darüber hinaus müssen die so zu erwartenden niedrigen Messsignale entweder über Schleifringübertrager oder telemetrisch auf das Messinstrument übertragen werden. Das spricht für den Einsatz von DMS mit Isoelastisch-Gitterlegierung (Legierung D) wegen des ihr eigenen höheren K-Faktors (nominell 3,2; im Gegensatz zu 2,1 bei den Legierungen A und K). Weil wegen des kleinen Radius' am Applikationsort ein flexibles Trägermaterial von Vorteil ist, fällt die Wahl auf den Trägerwerkstoff E (Polyimid). Die maximale Versuchstemperatur kann hier außer Acht gelassen werden, da sie sicher innerhalb der Spezifikationen aller denkbaren Trägermaterialien liegt. Alle diese Betrachtungen münden in die Auswahl der DMS-Serie ED.
- 4. Optionen:** Für einen besseren Schutz des Messgitters in der Testumgebung sollte die Option E (Kapselung) gewählt werden. Wegen der Forderung nach einer geringen Aufbauhöhe der gesamten DMS-Installation (Abstand zum Zahn des eingreifenden Zahnrads) müssen für die Verdrahtung sehr dünne Drähtchen hinzugezogen werden, die 90° zur Gitterrichtung aus den Lötflächen herausgeführt und entlang der Zahnradstirn zum Verbindungspunkt mit einer Messleitung höheren Querschnitts gebracht werden. Alle Umstände sprechen für diese Vorgehensweise und gegen die Anwendung von DMS mit Option L (vorgefertigte Drähtchen an den DMS).
- 5. Elektrischer Widerstand:** Für die DMS-Geometrie 031CF innerhalb der ED-Serie wird im Katalog ein Widerstand von 350Ω angegeben. Dieser höhere Widerstand sollte, sofern er für eine ausgesuchte Geometrie und DMS-Serie verfügbar ist, möglichst immer spezifiziert werden. Er wird besonders im vorliegenden Anwendungsfall Vorteile hinsichtlich eines besseren Signal/Rausch-Verhältnisses ergeben.
- 6. S-T-C-Nummer:** DMS mit der Gitterfolie D liegen nicht in temperaturselbstkompensierender Form vor, was für den vorliegenden Fall auch nicht notwendig wäre, da es sich um eine rein dynamische Messung handelt. In der Typenbezeichnung für DMS der Serie ED wird daher die zweistellige S-T-C-Nr. durch die beiden Buchstaben DY (für "dynamisch") ersetzt.

DMS-Typenbezeichnung

Kombiniert man die Ergebnisse der Auswahlprozedur, ergibt sich als auszuwählender DMS-Typ

ED-DY-031 CF-350/Option E

Auswahl von DMS Kriterien, Verfahren, Empfehlungen



C) Spannungsanalyse im Flugtest an der Titan-Tragflächenspitze, mit und ohne montiertem Raketenmodul

Der dominierende Faktor bei der DMS-Auswahl für diese Messung ist der Versuchstemperaturbereich, der zwischen -55°C und bis $+230^{\circ}\text{C}$ liegt.

DMS-Auswahl

- 1. Gitterlänge:** Vorhergehende Konstruktionsstudien, bei denen das spannungsoptische Oberflächenschichtverfahren Photo-Stress[®] eingesetzt worden ist, ergaben, dass eine Gitterlänge von 1,6mm hinsichtlich Dehnungsgradienten, Bereich der Spitzendehnung und des Installationsplatzes den besten Kompromiss darstellt.
- 2. Gittergeometrie:** Den Informationen aus der Photo-Stress[®]-Studie über den Spannungszustand und die Hauptdehnungsrichtungen ist zu entnehmen, dass in einigen Bereichen der Tragflächenspitze sowohl Linear-DMS als auch "T"-Rosetten eingesetzt werden können. In anderen Bereichen, in denen sich die Hauptdehnungsrichtungen mit den Flugmanövern ändern, werden 3-Element-90°-Rosetten benötigt. Da relativ steil ansteigende Dehnungsgradienten vorliegen, ist der Einsatz gekreuzter Rosetten ratsam. Diese Überlegungen führen zur Auswahl der DMS-Geometrien 060WT und 060WR für die gekreuzten Rosetten sowie 060AP für den Linear-DMS (s. DMS Data Book). Bei der Entscheidung für diese Geometrien ist berücksichtigt worden, dass sie alle innerhalb der DMS-Serie WK verfügbar und somit kompatibel mit den Temperaturanforderungen im vorliegenden Messfall sind.

- 3. DMS-Serie:** Der bei diesem Messfall vorliegende Temperatureinsatzbereich und die Anforderungen sowohl für statische als auch für dynamische Messungen diktiert klar den Einsatz der Gitterlegierung K (Karma). Damit kämen die DMS-Serien SK und WK in Frage. Die Entscheidung fällt jedoch zugunsten der Serie WK, weil DMS dieser Serie standardmäßig mit Drähtchen versehen sind.
- 4. Optionen:** Um die Installationsarbeiten zu vereinfachen, ist die Option W (integrierte Lötstützpunkte) zu empfehlen. Diese Option gibt es jedoch nicht mit gekreuzten Rosetten, sodass sie nur für die Linear-DMS zu wählen ist.
- 5. Elektrischer Widerstand:** Wenn verfügbar, was hier der Fall ist, sollten wegen der allgemeinen Vorteile, die sich aus dem höheren Widerstand ergeben, DMS mit 350Ω gewählt werden.
- 6. S-T-C-Nummer:** Der Titan-Werkstoff der Tragflächenspitze entspricht der Legierung 6A1-4V mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $8,8 \times 10^{-6}/\text{K}$. Das ergibt die S-T-C-Nr. 05 (s. DMS Data Book).

DMS-Typenbezeichnung

WK-05-062AP-350/Option W
WK-05-060WT-350
WK-05-060WR-350