

Dehnungsmessstreifen (DMS) für die Feindehnungsmessung in der experimentellen Spannungsanalyse.

(Günter Haberzettl)

1. EINLEITUNG UND HISTORISCHER ÜBERBLICK

Der Folien-Widerstands-DMS ist heute das gebräuchlichste Messmittel zur Feindehnungsmessung. Das gilt sowohl für Dehnungsmessungen zum Zwecke der Berechnung mechanischer Spannungen in Bauteilen und Konstruktionen, eine Messtechnologie, die man allgemein mit dem Begriff *experimentelle Spannungsanalyse* bezeichnet, als auch für Anwendungen im Bereich der *Werkstoffprüfung*, wo Feindehnungsmessungen zur Bestimmung von Werkstoffeigenschaften an standardisierten Proben vorgenommen werden. Ein weiteres Anwendungsgebiet, welches in den letzten Jahren immense Bedeutung erlangt hat und in dem mehr als die Hälfte aller weltweit gefertigten DMS eingesetzt wird, ist die Herstellung von *Messwertaufnehmern* zur Messung von Kraft, Druck, Beschleunigung und ähnlicher Messgrößen, die sich direkt von einer mechanischen Verformung der Körper, auf die sie einwirken, herleiten lassen. So beruht heute fast die gesamte moderne *Wägetechnik* auf der Anwendung von Kraftaufnehmern, sog. Wägezellen, auf DMS-Basis.

Der DMS wurde 1938 in den USA erfunden. Ausgelöst wurde die Erfindung durch die akute Notwendigkeit, dynamische Verformungen an fertigen Bauteilen und Konstruktionen messen zu müssen, welches mit bis dato bekannten Messmitteln überhaupt nicht oder nur mit unzureichender Zuverlässigkeit möglich war. Diese bis damals eingesetzten Messmittel zur Feindehnungsmessung, als sog. *Extensometer* bekannt, waren mehr oder weniger komplizierte, mit Uhrmacherpräzision gefertigte mechanische Vorrichtungen, die, an standardisierte Proben befestigt, mittels mechanischer Übersetzungen die Relativbewegung zweier Punkte auf der Probenoberfläche gegeneinander - also Verformung - messen ließen. Aus der Natur der Konstruktion dieser Extensometer und aus ihrer relativ großen Masse ist klar, dass damit bestenfalls nur Dehnungen aufgrund statischer Belastungen messbar waren. Die Erfinder Simmons (Patentinhaber) und Ruge nun, mit der Aufgabe der Messung dynamischer Dehnungen konfrontiert, kamen auf die Idee, ein seit langem bekanntes elektro-mechanisches Phänomen zu nutzen, um einen kleinen, massearmen Sensor zur Messung dynamischer Dehnungen zu bauen, der natürlich ebenso gut für statische Dehnungsmesszwecke einsetzbar wäre.

Das genannte elektro-mechanische Phänomen, von Thompson (England), dem späteren Lord Kelvin, entdeckt und im Jahre 1856 zum ersten Mal vor der Royal Society in London dargestellt, besteht darin, dass der elektrische Widerstand eines metallischen elektrischen Leiters unter anderem eine Funktion des mechanischen Spannungszustands dieses Leiters ist. Mit anderen Worten, wird der Leiter verformt, ändert er seinen Widerstand. Da natürlich die Möglichkeit besteht, mit geeigneten Beziehungen die Widerstandsänderung der mechanischen Verformung quantitativ zuzuordnen, kann über den Weg einer hinreichend genauen Messung der Widerstandsänderung die entsprechende Verformung (Dehnung) bestimmt werden.

Diesen Zusammenhang ausnützend, haben Simmons und Ruge ein Stück dünnen Konstantandraht genommen, diesen mäanderförmig ausgelegt und das so entstandene Drahtmäander auf ein dünnes Papier fixiert. Damit war die noch heute geläufige Form des DMS festgelegt. Natürlich wäre auch ein einziges Stückchen Draht einer gewissen Länge als Messelement brauchbar; die Mäanderform ergibt sich einfach aus der Notwendigkeit, einen sinnvollen, hinreichend großen Widerstandswert zu erzielen, ohne dass das gesamte Sensorelement eine unhandliche Länge erreicht. Konstantan ist eine Ni-Cu-Legierung, welche zur Zeit der Erfindung des DMS hohe Popularität bei der Herstellung von drahtgewickelten Widerständen genoss und die sich aufgrund einer relativ großen und in sehr engen Grenzen gut reproduzierbaren Abhängigkeit des Widerstands vom Verformungszustand zur Herstellung von DMS besonders gut eignet.

Simmons und Ruge hatten somit *Draht-DMS* hergestellt. Mit der raschen Entwicklung der photo-chemischen Ätztechnik wurden im Jahre 1952 in England zum ersten Mal DMS gefertigt, bei denen die Sensorgeometrie aus einer auf Kunststoffolie laminierten Metallfolie geätzt worden war. Dieses war die Geburtsstunde des *Folien-DMS*, wie wir ihn heute kennen.

Welche Merkmale haben nun den DMS zu dem populären und in seiner Art wichtigsten Messmittel für die

Feindehnungsmessung gemacht? Die folgende Auflistung, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, versucht darauf eine Antwort zu geben:

- a) Geringe Größe
- b) Geringes Gewicht und geringe Masse
- c) Elektrisches, lineares Ausgangssignal
- d) Praktisch unendliche Auflösung des Messwerts
- e) Praktisch noch nicht bestimmte obere Grenzmessfrequenz
- f) Relativ einfache Anwendung
- g) Relativ niedrige Kosten

2. FUNKTIONSWEISE DES DMS

Wie oben schon beschrieben, beruht die Funktionsweise des DMS darauf, dass er seinen Initialwiderstand ändert, wenn er der zu messenden Dehnung ausgesetzt, also ebenso gedehnt wird. Eine prinzipielle DMS-Darstellung zeigt Abb. 1. Um dem DMS die zu messende Dehnung mitzuteilen, wird er auf die deh nende Oberfläche mittels Klebern aufgeklebt, die eine verlustlose Übertragung der Dehnung vom Messobjekt in den DMS gewährleisten. "Dehnung" bewirkt Widerstandserhöhung, "Stauchung" bewirkt Widerstandserniedrigung. In der Fachterminologie spricht man von *positiver Dehnung* und von *negativer Dehnung*. Wie groß die einer bestimmten Dehnung zugeordnete Widerstandsänderung ist, hängt von der Dehnungsempfindlichkeit der Legierung ab, aus der der DMS hergestellt ist. Diese Dehnungsempfindlichkeit wird *K-Faktor* genannt und liegt für moderne Folien DMS nominell bei 2. Das bedeutet, dass einer relativen Längenänderung 1 eine relative Widerstandsänderung 2 zugeordnet ist. Die Dehnung ist definiert zu $\epsilon = \Delta l / l$, d.h. eine Längenänderung wird relativ zu einer Initiallänge bestimmt. Konsequenterweise wird auch mit der relativen Widerstandsänderung $\Delta R / R$ gearbeitet. Die Dehnungsempfindlichkeit ist also definiert mit:

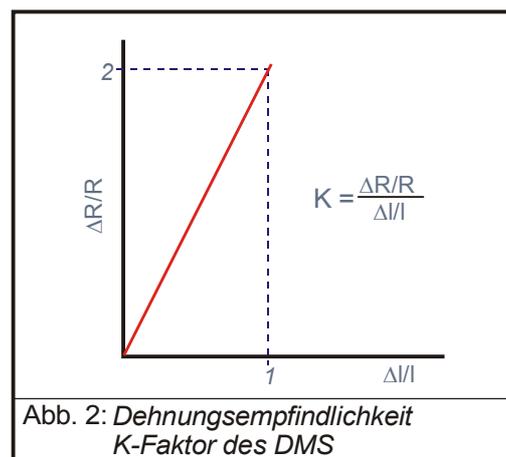
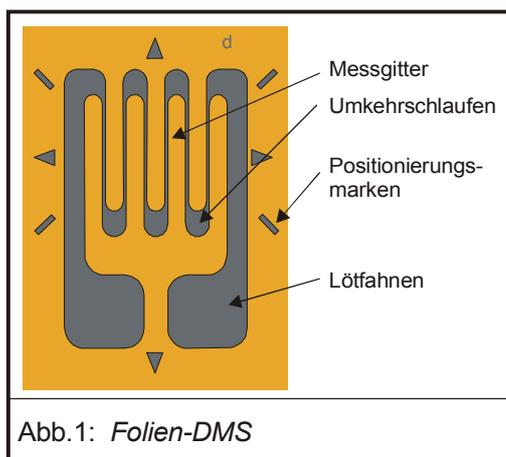
$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}$$

ΔR = Widerstandsänderung des DMS (Ω)

R = Initialwiderstand des DMS (Ω)

$\Delta l / l = \epsilon$ = Dehnung ($\mu\text{m}/\text{m}$)

Abb. 2 zeigt eine graphische Darstellung der *K-Faktor-Funktion*, die, wie man sieht, zumindest für den Bereich praktischer Messtechnik eine *lineare Funktion* ist.



Um einen Anhaltspunkt und Maßstab für die Größenordnung der absoluten Widerstandsänderung für eine bestimmte Dehnung in einem DMS zu geben, sei das folgende numerische Beispiel gegeben:

$$R = 120 \, \Omega; K = 2; \varepsilon = 1000 \, \mu\text{m/m}$$

$$\Delta R = K \times R \times \varepsilon = 2 \times 120 \times (1000 \times 10^{-6}) = 0,24 \, \Omega = \mathbf{240 \, m\Omega}$$

Zur genauen und hinreichend reproduzierbaren Messung solcher kleiner Widerstandsänderungen wird die bekannte *Wheatstone'sche Brückenschaltung* herangezogen (Abb.3). Sind alle vier Brückenweige der Wheatstone-Brücke widerstandsgleich, fließt über die Brückendiagonale kein Strom. Die Brückenschaltung ist dann abgeglichen.

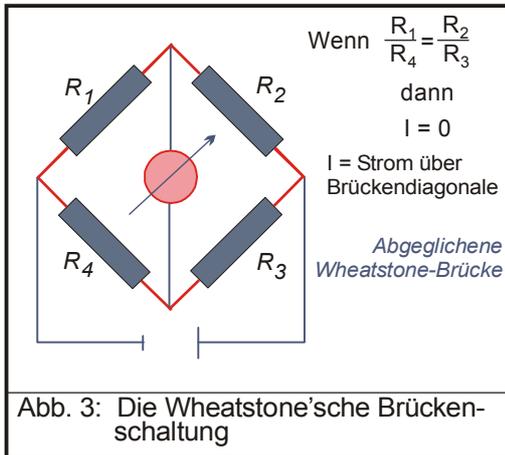


Abb. 3: Die Wheatstone'sche Brückenschaltung

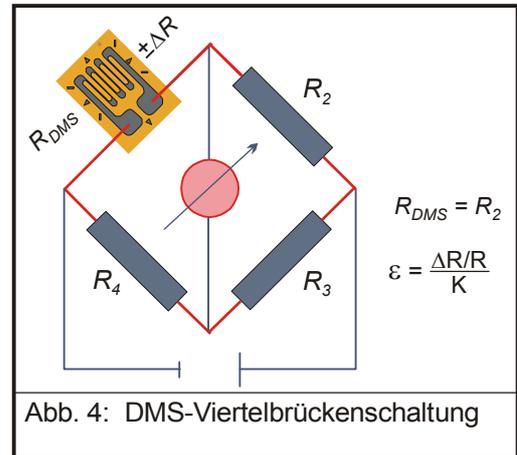


Abb. 4: DMS-Viertelbrückenschaltung

Ersetzt man den Widerstand eines Brückenweigs durch einen DMS (Abb. 4) und dieser ändert aufgrund der Dehnung seinen Widerstand, wird über die Brückendiagonale ein der Widerstandsänderung, also der Dehnung proportionaler Strom fließen. Aus praktischen Gründen wird in der modernen Gerätetechnik allerdings die durch die Widerstandsänderung entstehende Spannungsänderung gemessen, also anstelle eines Amperemeters ein Voltmeter eingesetzt. Dieses Messgerät wird jetzt praktischerweise in Dehnungseinheiten ($\mu\text{m/m}$) kalibriert, womit ein einfaches Dehnungsmessgerät entstanden wäre. In der Praxis stellt sich allerdings schnell heraus, dass die so entstehenden Messsignale der Verstärkung bedürfen, sodass der geschilderten Brückenschaltung ein Verstärker nachgeschaltet wird (Abb. 5). Dieses ist heute im allgemeinen ein Gleichspannungsverstärker, gelegentlich finden auch noch Trägerfrequenzverstärker Verwendung.

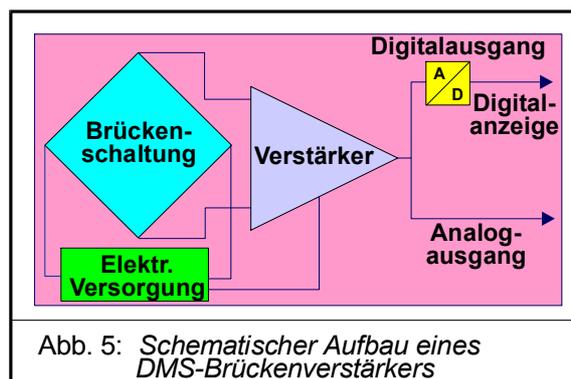


Abb. 5: Schematischer Aufbau eines DMS-Brückenverstärkers

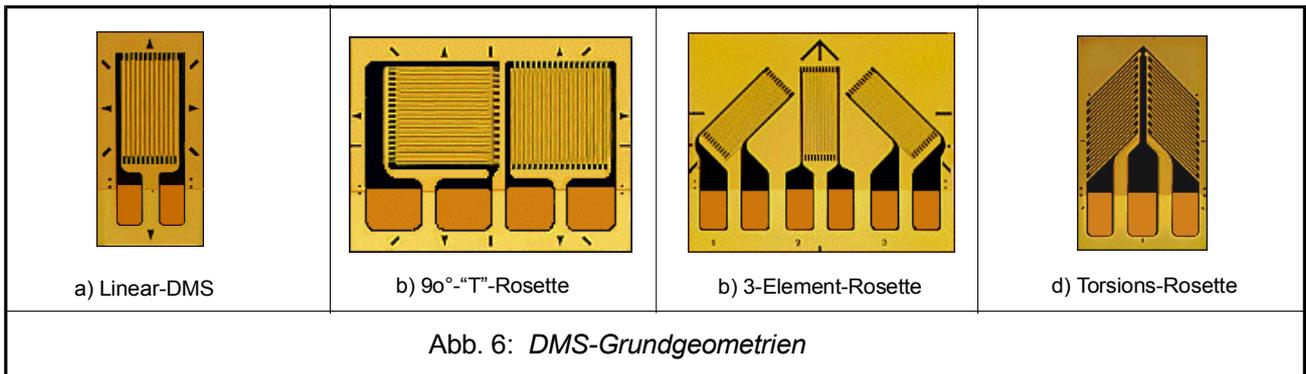
Abhängig von der Versuchssituation, also ob es sich um statische oder dynamische Signale handelt, sind dem Messgerät Peripheriegeräte nachgeschaltet, die zur Anzeige, zur graphischen Darstellung oder zur Speicherung der Messsignale dienen. Dabei handelt es sich gewöhnlich um Digital-Anzeigen (im Messgerät integriert), wenn statische Signale vorliegen, um Analog-Rekorder (X/Y, X/t) oder Oszilloskope für dynamische Signale, um Magnetbandgeräte (heute meistens digital) für beide Signalarten oder um EDV-Speichermedien.

Im Sinne einer logischen und zielführenden Messtechnik ist jedoch das eingesetzte Messgerät oder die Gerätekombination immer sozusagen als "Zubehör" zum Sensor, also dem DMS, zu betrachten. Der DMS ist die Quelle des Messsignals, und demzufolge kommt ihm innerhalb einer Messkette die weitaus größte Bedeutung zu. Eine schlechte oder falsch eingesetzte Signalquelle wird zu entsprechend falschen Signalen

führen und nachgeschaltete Gerätetechnik kann eine qualitative Verbesserung nicht leisten.

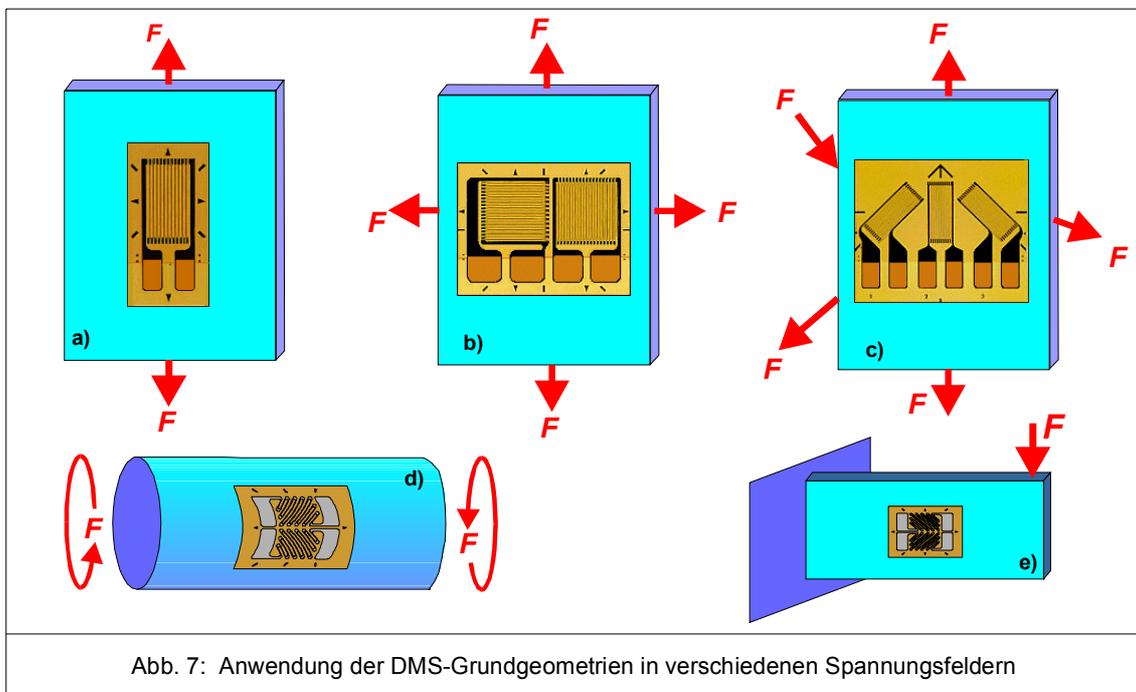
3. DMS-AUSFÜHRUNGEN UND ANWENDUNGSKRITERIEN

Die Arten der Ausführung von DMS, also die DMS-Geometrien, richten sich grundsätzlich nach den Forderungen der Mechanik. Die verschiedenartigen Spannungsfelder, welche die zu messenden Dehnungen hervorrufen, sind die maßgeblichen Kriterien. Man definiert einachsige Spannungsfelder, zweiachsige Spannungsfelder und solche, die aus mehrachsigen Belastungen entstehen. Demzufolge ergeben sich folgende grundsätzlichen DMS-Geometrien (Abb. 6): a) *Linear-DMS*; b) *90°-"T"-Rosette*; c) *3-Element-Rosette* und d) *Torsions- oder Schub-Rosette*.



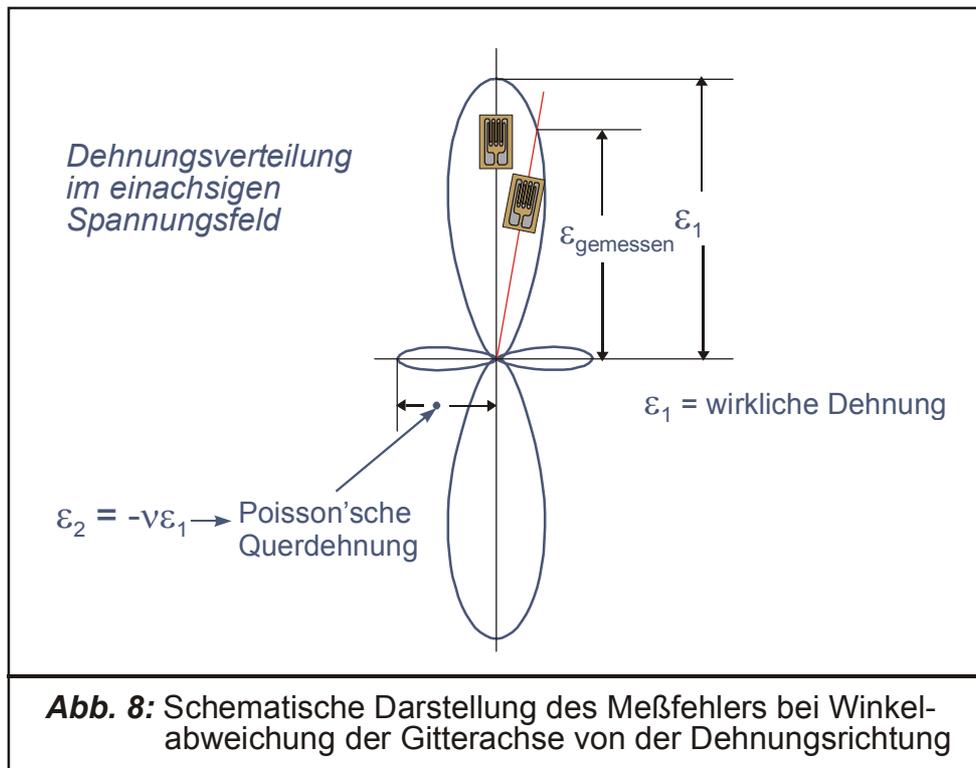
Die Vielfalt der in den DMS-Katalogen der Hersteller gezeigten DMS-Typen sind immer nur Variationen der in Abb. 6 dargestellten Grundtypen. D.h., die Grundtypen werden lediglich in Bezug auf Abmessungen und angewandte Materialien der Gitter- und Trägerwerkstoffe variiert.

Abb. 7 zeigt in Bezug auf vorliegende Spannungsfelder und die zugehörigen Dehnungsfelder die prinzipiellen Anwendungsbedingungen für die DMS-Grundgeometrien.



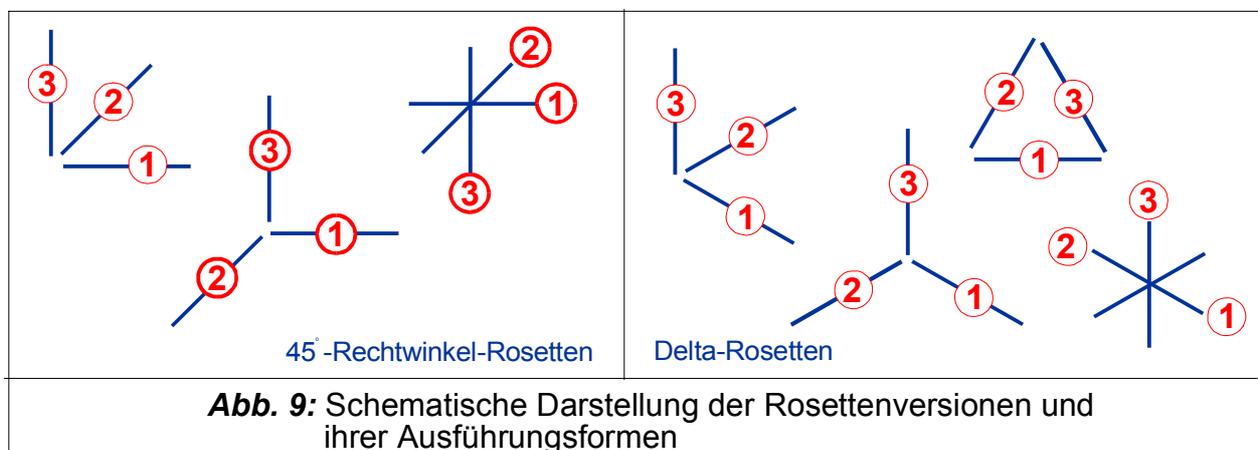
Der *Linear-DMS* (Abb. 6a) soll nur im *einachsigen Spannungsfeld* angewandt werden, dessen Richtung bekannt ist. Er muss, um wirklich den gewünschten Messwert, nämlich die Maximaldehnung in Spannungsrichtung zu liefern, exakt mit seiner Gitterlängsachse in Spannungsrichtung installiert werden. Je größer die

Winkelabweichung der Gitterlängsachse des DMS von der Spannungsrichtung wird, umso größer wird die Abweichung des Messwerts vom Wert der zu messenden Maximaldehnung in Spannungsrichtung sein. Die folgende Abb. 8 stellt diese Problematik schematisch dar.



Die 90°-"T"-Rosette (Abb. 6b) kommt bei zweiachsigen Spannungsfeldern zum Einsatz, deren Richtung ebenso bekannt sein muss, wie es beim Linear-DMS verlangt wird. Die Problematik bezüglich der Richtungsfehler ist die gleiche. Die Bezeichnung "T"-Rosette ergibt sich aus den beiden senkrecht, also "T"-förmig zueinanderstehenden Gitterachsen.

Die 3-Element-Rosette (Abb. 6c) wird angewandt, wenn über die Art des Spannungsfelds und damit über die Dehnungsrichtung keine Information vorliegt. Die Rosette, bestehend aus drei in bestimmter Weise angeordneten Gittern, wird in beliebiger Richtung auf den Messpunkt der Oberfläche des Messobjekts geklebt. Die sich im Messfall ergebenden drei Messwerte ϵ_1 , ϵ_2 und ϵ_3 werden in sogenannten Rosettengleichungen verarbeitet, welche die beiden aus beliebigen Dehnungsfeldern resultierenden Hauptdehnungen ϵ_x und ϵ_y



errechnen. Diese Gleichungen sind aus den Dehnungs-Transformationsbeziehungen abgeleitet und können anhand der bekannten Mohr'schen Dehnungskreise in sehr anschaulicher Weise graphisch dargestellt wer-

den. Substituiert man die so erhaltenen Hauptdehnungen in entsprechende Rosettengleichungen für die Hauptspannungen σ_x und σ_y , können mit Einbeziehung des E-Moduls und der Poisson'schen Zahl des Bauteilmaterials, auf dem Dehnung gemessen wurde, auch die Hauptspannungen und ihre Richtung berechnet werden. Außerdem kann der Richtungswinkel der Hauptdehnungen, bezogen auf die Richtung der Gitterachse eines zu definierenden Messgitters der Rosette, berechnet werden. 3-Element-Rosetten liegen in zwei Versionen vor und zwar als 1. *45°-Rechtwinkel-Rosette* und 2. *als Delta-Rosette*. Die Frage, wann welche Rosetten-Version eingesetzt werden sollte, ist für die Praxis von nur geringer Bedeutung. Aufgrund der gleichmäßigeren Verteilung der Gitter einer Delta-Rosette in einem gegebenen Dehnungsfeld ergibt diese Rosettenform verglichen mit der 45°-Rechtwinkel-Rosette eine etwas bessere Genauigkeit. Der Genauigkeitsunterschied ist allerdings nur marginal, sodass in der Praxis gewöhnlich auf Rosetten zurückgegriffen wird, die am schnellsten verfügbar sind und die sich aufgrund wichtiger Versuchsparameter am besten eignen. Zusätzlich werden die beiden Rosettenversionen in *planarer* und *gekreuzter* Ausführung gefertigt. Bei den planaren Rosetten liegen die Messgitter nebeneinander in einer Ebene, während bei der gekreuzten Version die Messgitter übereinander gestapelt sind. Ob planare oder gekreuzte Rosetten eingesetzt werden sollen, hängt vom Dehnungsfeld ab. Muss mit relativ steilen Dehnungsgradienten gerechnet werden, würde die Wahl auf gekreuzte Rosetten fallen; bei eher uniformer Dehnungsverteilung wird man auf planare Rosetten zurückgreifen. Abb. 9 stellt geometrisch unterschiedliche, jedoch funktionell gleiche Ausführungen der Rosettenversionen dar. Bezüglich der Rosettengleichungen, ihrer Ableitungen und einiger wichtiger Regeln für ihre sachgemäße Anwendung sei auf die Fachliteratur verwiesen, besonders auf die Measurements Group Tech-Note TN-515 "*DMS-Rosetten - Auswahl, Anwendung, Datenberechnung*", wo die Problematik in übersichtlicher und verständlicher Form dargestellt wird. → www.vmsgg.de

Bei der *Torsions-Rosette* (Abb. 6d) schließlich laufen die Gitter unter 45° zur Rosettenachse. Wird eine solche Rosette z.B. mit ihrer Längsachse in Richtung der Wellenachse installiert, kann in einwandfreier Weise die Torsionsdehnung, die unter 45° zur Wellenachse verläuft, gemessen werden (Abb. 7d). Ebenso können mit dieser DMS-Ausführung Schubdehnungen, wie in Abb. 7e schematisch dargestellt, gemessen werden.

3. TEMPERATUR-SELBST-KOMPENSATION

Wie viele andere Sensoren und Signalquellen in der Messtechnik hat auch der DMS die Tendenz, nicht nur den gewünschten Messwert, in unserem Fall also Dehnung, anzuzeigen, sondern sich auch von anderen Umgebungsparametern beeinflussen zu lassen. Diese Einflüsse sind, wenn sie gewisse Größen erreichen, geeignet den gewünschten Messwert zu verfälschen, und es sind Maßnahmen erforderlich, welche das Entstehen der Fehler vermeiden. Ist dieses nicht vollständig möglich, müssen die Fehler minimiert und schließlich quantitativ erfasst und korrigiert werden.

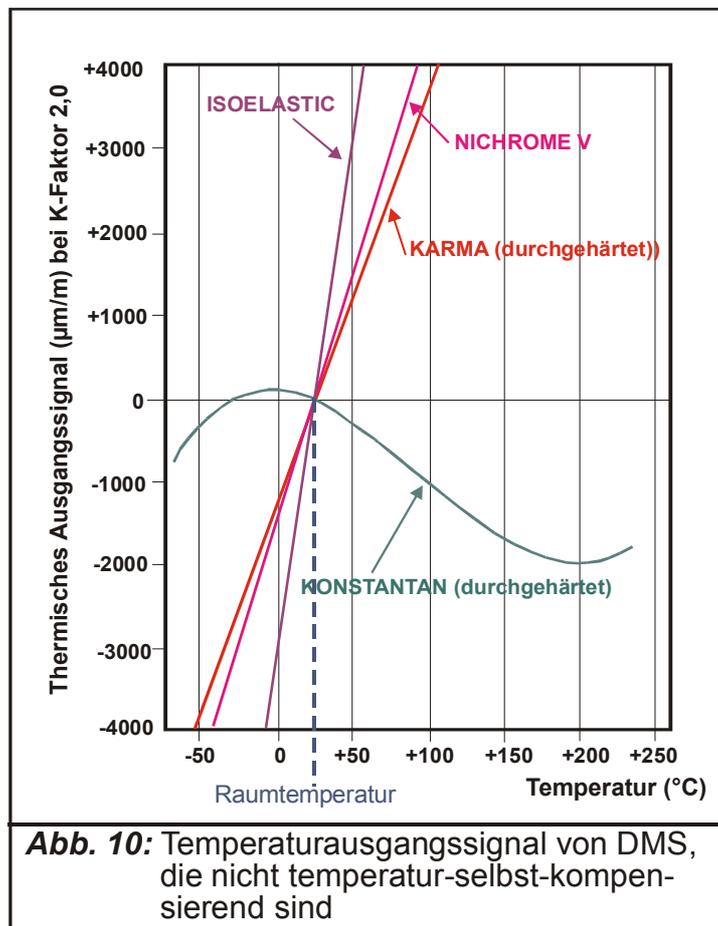
Neben einer Reihe von Einflussfaktoren, deren Auswirkungen in der Regel vernachlässigbar klein bleiben, werden beim DMS Temperatureinwirkungen zu Fehlergrößen führen, die spezieller Behandlung bedürfen.

Ändert ein an eine Dehnungsmessbrücke angeschlossener DMS seinen Widerstand, wird das Messgerät das als entsprechende Dehnung anzeigen, ohne die Ursache der Widerstandsänderung identifizieren zu können. Temperatureinwirkungen auf DMS resultieren in derselben Widerstandsänderung, was zu entsprechenden falschen Dehnungsanzeigen erheblicher Größe führen kann. Die Ursache der Widerstandsänderung der DMS mit der Temperatur ist auf zwei Gründe zurückzuführen. Um diese zu erklären, sei der DMS einmal unter rein elektrischen Gesichtspunkten und zum zweiten unter rein mechanischen betrachtet. Vom Standpunkt der Elektrotechnik gesehen ist der DMS weiter nichts als ein speziell geformter Ohm'scher Widerstand. Solche Widerstände zeigen einen Temperaturkoeffizienten des Widerstands, was bedeutet, dass sich der Absolutwert des vorliegenden Widerstands entsprechend der Größe des Koeffizienten mit der Temperatur ändert. Bei den üblichen Widerstandswerkstoffen wird der Widerstand mit steigender Temperatur größer, mit fallender Temperatur niedriger. So auch beim DMS. Allerdings sind wir hier mit der oben geschilderten Problematik konfrontiert, dass unser Messgerät diese Widerstandsänderung als Dehnung anzeigt. Mechanisch gesehen, ist der DMS ein fester Körper, der auf Temperatureinwirkungen mit Dimensionsänderungen reagiert und zwar entsprechend seines Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten α_t , welcher ein werkstoffspezifischer Kennwert ist. Der DMS nun ist mit Hilfe geeigneter Klebtechnik mit der Oberfläche des Bauteils verbunden, dessen Dehnung es zu messen gilt. Der Temperatur-Ausdehnungskoeffizient a_t des Bauteilmaterials unterscheidet sich jedoch in der Regel vom Ausdehnungskoeffizienten des DMS. Bei Temperatureinwirkung auf das Bauteil (und damit natürlich auch auf den installierten DMS) muss der DMS aufgrund der Klebung dem Ausdehnungsverhalten des Bauteils folgen. Nehmen wir z.B. an, der DMS hätte einen niedrigeren Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten als das Bauteilmaterial. Bei einer Temperaturerhö-

hung dehnt sich das Bauteil entsprechend aus, und der DMS muss sozusagen diese Größe der Temperaturexpansion mitmachen, obwohl er es aufgrund seines niedrigeren Ausdehnungskoeffizienten in diesem Maße gar nicht will. Konsequenterweise fühlt er sich "gedehnt" und zwar entsprechend der Differenz zwischen seinem eigenen Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten und dem des Bauteilwerkstoffs. Diese "Dehnung" teilt er der nachgeschalteten Messbrücke mit, welche sie auch als solche anzeigt.

Die beiden geschilderten Temperaturphänomene, hervorgerufen vom Widerstands-Temperaturkoeffizienten des DMS und von der Differenz der Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten von DMS und Bauteilmaterial, resultieren in dem, was man das *Thermische Ausgangssignal des DMS* nennt. Nebenbei gesagt, wird in älterer Literatur das Thermische Ausgangssignal des DMS mit dem anschaulichen Begriff "scheinbare Dehnung" benannt; es ist dies vom Messgerät als "Dehnung" angezeigte Thermische Ausgangssignal in der Tat nur eine scheinbare Dehnung, die in Bezug auf die im Bauteil durch äußere Krafteinwirkung entstehende und zu messende Dehnung nichts zu tun hat.

Die Größenordnung des Thermischen Ausgangssignals ist, wenn nicht geeignete Maßnahmen zu seiner Unterdrückung oder Minimierung unternommen werden, erheblich und kann in ungünstigen Fällen leicht die Größe des eigentlichen Messsignals erreichen und sogar darüber hinausgehen. In der Tat war das in den Anfangszeiten der DMS-Messtechnik ein äußerst unangenehmer Störfaktor, dessen man nur mit bestimmten kompensierenden Brückenschaltungen Herr werden konnte. Die Größe und Funktionsform des Thermischen Ausgangssignals ist im Wesentlichen eine Funktion der DMS-Gitterlegierung. Abb. 10 gibt eine graphische Darstellung des Thermischen Ausgangssignals für verschiedene gebräuchliche Gitterlegierungen.



Natürlich hat man sehr bald angefangen Wege zu suchen, die das Problem des Thermischen Ausgangssignals entschärfen sollten. Intensives Forschen hat schließlich zu der Möglichkeit der Herstellung von temperatur-selbstkompensierenden DMS geführt. Man erreicht durch bestimmte Maßnahmen während der DMS-Produktion eine Anpassung der DMS an die Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten der Bauteilwerkstoffe, sodass damit das Thermische Ausgangssignal des DMS gegenüber dem ursprünglichen Zustand minimiert wird. Für die Anwendung bedeutet das, dass der DMS nur auf dem Bauteilmaterial Verwendung finden sollte, für das er angepasst ist. Das Ergebnis ist ein Temperaturverhalten, wie es z.B. für den Fall der Konstantan- und der Karma-Gitterlegierung in Abb. 11 dargestellt ist.

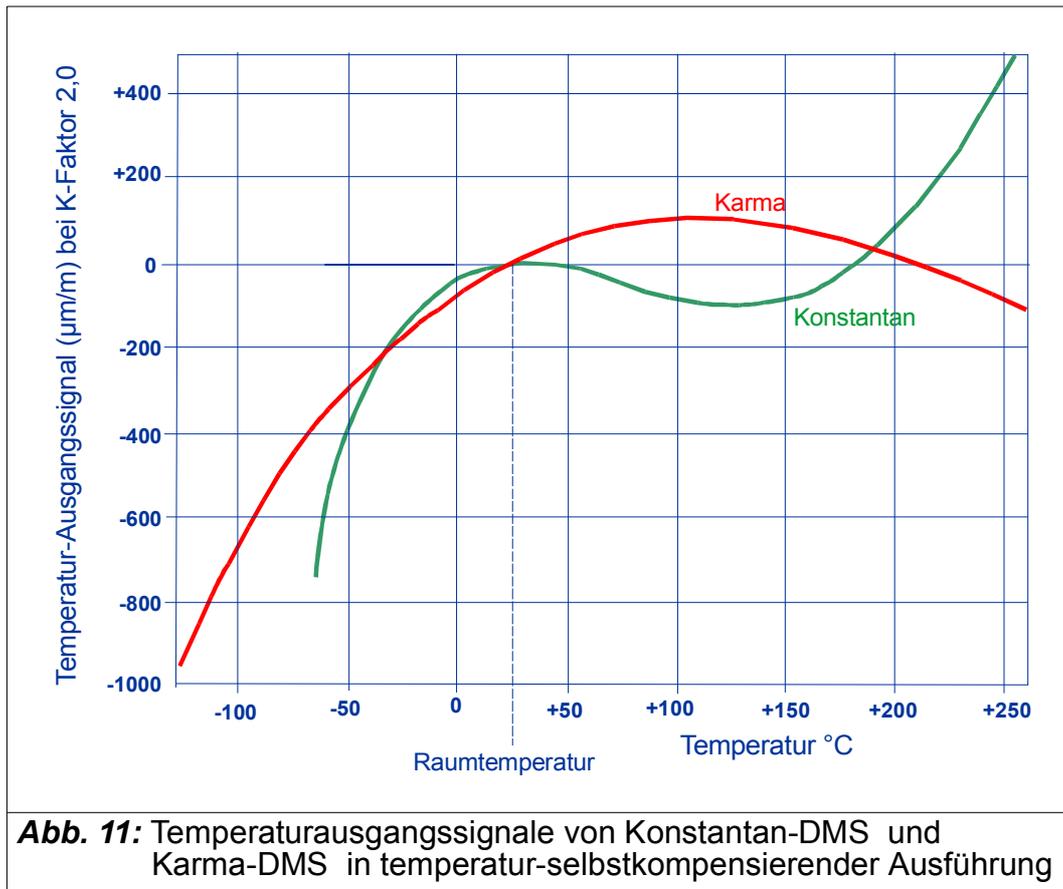


Abb. 11: Temperaturausgangssignale von Konstantan-DMS und Karma-DMS in temperatur-selbstkompensierender Ausführung

Man sieht, dass der an das jeweilige Bauteilmaterial angepasste DMS bei Raumtemperatur kein thermisches Ausgangssignal zeigt und dass in einem breiten Intervall um Raumtemperatur herum dieses Signal für viele praktische Messfälle vernachlässigbar klein ist. Die immense Verbesserung des Temperaturverhaltens im Vergleich zu unbehandelten DMS ist jedenfalls evident. Mit der Entwicklung des Folien DMS ist eine solch hohe Präzision in der Temperatur-Selbst-Kompensation möglich geworden, dass eventuell notwendige Korrekturwerte aus den DMS mitgegebenen Diagrammen entnommen werden können, sofern man die DMS von einem Hersteller bezieht, der über diesbezüglich hinreichendes Know-How verfügt. Dem Anwender können heute temperatur-selbstkompensierende DMS für fast alle gängigen Konstruktionsmaterialien zur Verfügung gestellt werden. Das fängt an mit Bauteilwerkstoffen, welche in praktischen Temperaturbereichen einen Ausdehnungskoeffizienten Null zeigen und geht bis zu ungefüllten Kunststoffmaterialien mit sehr hohen Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten in Bereichen bis zu 90 ppm/K . In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass sich auch hinsichtlich des Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten nicht alle Werkstoffe isotrop verhalten. Das bedeutet, dass der Koeffizient richtungsabhängig sein kann, was besonders bei Faserverbundwerkstoffen, sog. Compositen, der Fall ist. Der Ausdehnungskoeffizient in Faserrichtung ist sehr unterschiedlich, zu dem quer zur Faserrichtung, also zu dem Ausdehnungs-Koeffizienten des Matrixmaterials. Entsprechend müssen die Temperatur-Selbst-Kompensationszahlen der DMS gewählt werden.

4. K-FAKTOR/TEMPERATUR-VERHALTEN

Den aktuellen K-Faktor eines DMS kann der Anwender dem jeweils beigegebenen Datenblatt entnehmen. Es ist allerdings wichtig zu wissen, dass dieser K-Faktor nur für Raumtemperatur gilt, womit klar wird, dass auch der K-Faktor von der Temperatur beeinflusst wird. Die Abhängigkeit des K-Faktors von der Temperatur ist eine lineare und wird gewöhnlich in Diagrammform auf dem der DMS-Packung beigegebenen Datenblatt dargestellt. Verschiedene Gitterlegierungen, die bei der DMS-Herstellung angewandt werden, zeigen eine unterschiedliche Temperaturabhängigkeit des K-Faktors.

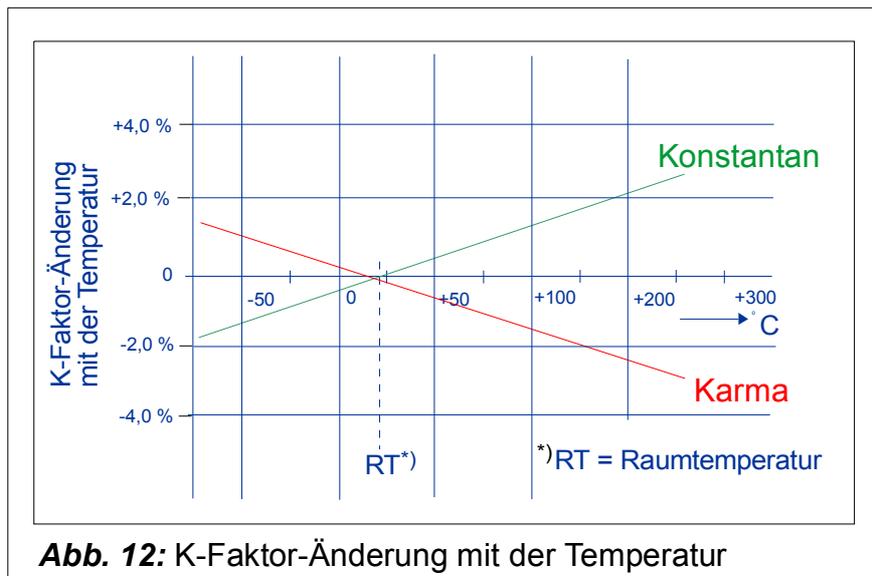


Abb. 12: K-Faktor-Änderung mit der Temperatur

Da der K-Faktor, also die quantitative Größe der Dehnungsempfindlichkeit eines DMS, ein für sein Verhalten wichtiger Kennwert ist, sollte der Anwender darauf achten, dass er vom DMS-Hersteller mittels international anerkannter Verfahren erstellt wird und mit einer hinreichend engen Toleranz behaftet ist. Produktionstechnische und wirtschaftliche Parameter lassen nach dem momentanen Stand der Technik für den K-Faktor eine Toleranz von $\pm 0,5 \%$ ohne weiteres zu.

5. ELEKTRISCHER WIDERSTAND VON DMS

Moderne Folien DMS werden mit Widerstandswerten zwischen 30Ω und 5000Ω gefertigt. Nach internationalem Übereinkommen gibt es jedoch zwei Standardwerte: 120Ω und 350Ω . Diese beiden Widerstandsgrößen sind historischen Ursprungs, und eine unter modernen Gesichtspunkten rationale Begründung für ausgerechnet 120Ω oder 350Ω würde man vergeblich suchen. Nichtsdestoweniger hat man sich in der DMS-Messtechnologie auf beide Werte eingestellt, und sie sind international akzeptiert.

Steht man vor dem Problem der DMS-Auswahl für einen gegebenen Anwendungsfall, stellt sich die Frage, welchem der beiden Standard-Widerstandswerte man den Vorzug geben soll. Um diese Frage korrekt zu beantworten, müssen ein paar technische Hintergründe aufgehellt werden, die diesbezügliche Auswahlkriterien bestimmen.

Zuerst einmal muss man sich daran erinnern, dass der DMS ein *passiver* Sensor ist, der einer Zuführung elektrischer Energie bedarf, um ein der Dehnung entsprechendes Messsignal in Form einer elektrischen Spannung abgeben zu können. D.h., man legt an die DMS, in Brückenschaltung miteinander verbunden, eine Spannung an (ob Gleich- oder Wechselspannung ist für die vorliegende Problematik unerheblich), und entsprechend der Spannungsgröße und dem DMS-Widerstand werden, dem Ohm'schen Gesetz folgend, bestimmte Ströme fließen. Nun ist es sicher leicht einsehbar, dass DMS nicht beliebig große Ströme fließen lassen können, ohne dass sie sich aufgrund dieses Stromflusses anfangen zu erwärmen. Diese sogenannte Selbsterwärmung der DMS muss vermieden werden, da sie eine Nullpunktdrift der Messstelle hervorrufen würde. Natürlich wird bei einem DMS höheren Widerstands, z.B. 350Ω , bei gegebener Brückenspeisung weniger Strom fließen (Ohm'sches Gesetz), als das bei einem DMS mit 120Ω der Fall wäre; oder anders ausgedrückt, DMS höheren Widerstands lassen höhere Speisespannungen zu, ohne dass es zur DMS-Selbsterwärmung und damit zu Nullpunktdriften kommt.

Höhere mögliche Speisespannungen sind nun wiederum günstig in Bezug auf messtechnische Fragen. Um das zu erkennen, braucht man bloß das Ausgangssignal der Brücke statt wie üblich in der mechanischen Einheit der Dehnung, also $\mu\text{m}/\text{m}$, in elektrischen Einheiten auszudrücken, nämlich in mV/V . Das bedeutet weiter nichts als Millivolt Signalspannung pro Volt Brückenspeisespannung. Je höher also die Brückenspeisespannung, umso höher die Signalspannung bei gegebener Dehnung und gegebenem K-Faktor des DMS.

In Bezug auf die Problematik Widerstand/Speisespannung spielt auch die Natur des Bauteilmaterials, auf

dem Dehnung gemessen werden soll, eine Rolle. Werkstoffe mit guter Wärmeleitfähigkeit (z.B. Aluminium) werden höhere Speisespannungen zulassen, da sie ja eventuell drohende Selbsterwärmung des DMS durch rasche Wärmeableitung erst später eintreten lassen, als das bei schlechten Wärmeleitern (Glas, Holz, Kunststoffe) der Fall ist. Als Faustregel kann gesagt werden, dass ein DMS, der auf Stahl installiert ist, mit ca. 0,8 W pro cm² der Gitterfläche belastet werden kann, ohne dass es zu Selbsterwärmungseffekten kommt.

		Wärmeleitfähigkeit →		SEHR GUT Aluminium massiv, Kupfer, etc.	GUT Stahl	MITTEL Hochlegierte Stähle, Titan, etc.	SCHLECHT Gefüllte Kunststoffe, Faserverbund- Werkstoffe	SEHR SCHLECHT Ungefüllte Kunststoffe Polystyrol etc.
		Meßgenauigkeit ↓						
STATISCH	HOCH	3 - 7,8	1,6 - 3,1	0,78 - 1,6	0,16 - 0,31	0,016 - 0,031		
	MITTEL	7,6 - 1,6	3,1 - 7,8	1,6 - 3,1	0,31 - 0,78	0,031 - 0,078		
	GERING	16 - 31	7,8 - 16	3,1 - 7,8	0,78 - 1,6	0,078 - 0,16		
DYNAM.	HOCH	7,8 - 16	7,8 - 16	3,1 - 7,8	0,78 - 1,6	0,016 - 0,078		
	MITTEL	16 - 31	16 - 31	7,8 - 16	1,6 - 3,1	0,078 - 0,31		
	GERING	31 - 78	31 - 78	16 - 31	3 - 7,8	0,31 - 0,78		

Tab. 1: Typische Brückenspeisung in Watt/cm²

Ein weiteres wichtiges Auswahlkriterium in Bezug auf den DMS-Widerstand ist die wünschenswerte Verminderung des Einflusses des Messkabelwiderstands bei Viertelbrückenschaltungen. Der Hintergrund dieser Problematik ist die Tatsache, dass der Widerstand des Messkabels, das den DMS mit dem Brückenverstärker verbindet, Einfluss auf den K-Faktor, d.h. mittelbar auf die Dehnungsempfindlichkeit des DMS hat. Um dieses Phänomen zu verstehen, rufen wir uns die Definition des K-Faktors zurück. Diese lautet:

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}$$

Leider ist diese Definition nur theoretisch oder bei vernachlässigbar kleinen Kabelwiderständen richtig. Im Falle der Viertelbrückenschaltung muss die K-Faktor-Definition bei nicht vernachlässigbaren Kabelwiderständen lauten:

$$K = \frac{\Delta R_{DMS} / R_{DMS} + R_K}{\Delta l / l}$$

Es ist: R_K = Widerstand des Messkabels.

Der im Falle einer Viertelbrückenschaltung der Messbrücke angebotene Widerstand setzt sich zusammen aus dem DMS-Widerstand R_{DMS} und dem dazu in Serie liegenden Widerstand des Messkabels R_K . Da sich aber nur der R_{DMS} aufgrund der Dehnung ändert, muss das entsprechende ΔR auf die Summe des DMS-Widerstands und des Kabelwiderstands ($R_{DMS} + R_K$) bezogen werden. Demzufolge wird, wie aus obiger Beziehung hervorgeht, der K-Faktor mit steigendem Kabelwiderstand niedriger.

Damit wird klar, dass der Einsatz von DMS mit höherem Widerstand empfehlenswert ist, denn das Verhältnis R_{DMS} zu R_K wird im Sinne der geschilderten Problematik günstiger.

6. DMS-GITTERLÄNGEN

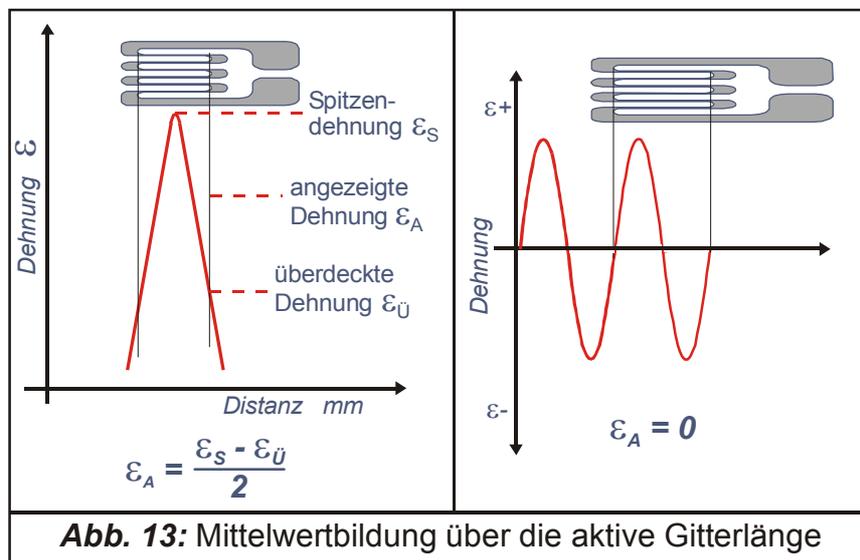
Der dehnungsmessende Teil eines DMS ist das DMS-Messgitter im Bereich der sogenannten aktiven Messlänge. Als aktive Messlänge bezeichnet man die Länge des Messgitters in Richtung der Gitterhalme *zwischen* den Umkehrschlaufen des Messgitters; die Umkehrschlaufen sind also in die aktive Gitterlänge nicht eingeschlossen (Abb. 2).

DMS werden heute mit aktiven Gitterlängen zwischen 0,2 mm und 100 mm gefertigt. Wenn die Platzverhält-

nisse an der Messstelle nicht von vorneherein kleine oder sehr kleine DMS vorschreiben, ergibt sich die Frage, welche Gitterlängen für gegebene Anwendungsfälle ausgewählt werden sollten. Um sich einer korrekten Antwort zu nähern, bedarf es einiger Überlegungen in Bezug auf die im Anwendungsfall vorliegenden Dehnungsverteilungen und auf das entsprechende Verhalten der DMS.

Der DMS ist ein Messmittel mit endlicher Ausdehnung, und das Messsignal aus einem DMS entspricht immer dem *Mittelwert der Dehnung, die unter der aktiven Gitterlänge des DMS vorhanden ist*. Da der Konstrukteur in der Regel jedoch an den Dehnungsspitzenwerten im Bereich der Messstelle interessiert ist, muss die Auswahl der aktiven Gitterlänge konsequenterweise von der dort vorliegenden Dehnungsverteilung abhängig gemacht werden. Abb. 13 stellt die vorliegende Problematik graphisch dar. Liegt an der Messstelle eine gleichförmige Dehnungsverteilung vor, ist die aktive Gitterlänge unkritisch. In der Regel wird man dann zu einem DMS mit einer Gitterlänge von 3mm oder 6 mm greifen. Das gilt sowohl für Linear-DMS, als auch für jede Art von Rosetten. Liegen an der Messstelle jedoch starke Dehnungsgradienten vor, ändert sich die Dehnung also über eine bestimmte Distanz sehr stark, ist es notwendig kurze Gitterlängen auszuwählen, um die Dehnungsspitze hinreichend zu erfassen.

Der auf den ersten Blick negativ zu bewertende Effekt der Mittelwertbildung durch die endliche Messgitterlänge hat jedoch auch einen messtechnisch positiven Aspekt. Besteht das Messobjekt z.B. aus einem heterogenen Werkstoff, ist der Mittelwertbildungseffekt geradezu erwünscht. Als Beispiel mag hier der Werkstoff Beton angeführt werden. Beton besteht im Wesentlichen aus zwei Werkstoffkomponenten, die sich hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften stark unterscheiden. Die beiden Komponenten sind erstens Steingranulat mit verschiedenen möglichen Korngrößen und zweitens ein Sand/Zementgemisch als Bindemittel für das Steingranulat. Bei mechanischer Belastung werden sich im Beton hochkomplizierte Dehnungs- und Spannungsfelder ergeben, da die Steineinlagerungen als Materialien hohen E-Moduls im Vergleich zum Sand/Zement-Gemisch nur sehr wenig Dehnung zeigen, in dem dazwischen gelagerten Bindemittel jedoch hohe Druck- oder Schubdehnungen vorliegen werden. Da der Messtechniker aber den Werkstoff Beton und nicht seine Einzelkomponenten untersuchen will, ist es notwendig DMS mit relativ großer aktiver Gitterlänge zu benutzen, damit die Dehnung im Beton als Mittelwert der Dehnung der Einzelkomponenten gemessen werden kann. Die auszuwählende Gitterlänge würde also hier im Wesentlichen von der Korngröße des Steingranulats abhängen. Das hier Gesagte gilt natürlich in gleicher Weise für andere inhomogene Werkstoffe.



Im Falle dynamischer Messungen kann es selbst bei hohen Amplituden zu dem Kuriosum kommen, dass der DMS kein Ausgangssignal, also Dehnung Null anzeigt, wenn sich unter der aktiven Gitterlänge eine volle Wellenlänge mit alternierendem Halbwellen-Vorzeichen befindet, da der Mittelwert beider Halbwellen Null ist. Das gilt natürlich auch für alle ganzzahligen Vielfachen einer vollen Wellenlänge. Man wählt deswegen bei dynamischen Messungen kürzere Gitterlängen aus, je höher die Signalfrequenzen sind.

6. TEMPERATUR-EINSATZBEREICH VON DMS

Um einen möglichst breiten Temperatur-Einsatzbereich abzudecken, werden moderne Folien-DMS aus ver-

schiedenen Gitterlegierungen und Trägerwerkstoffen gefertigt. Der Einsatzbereich liegt heute bei -269°C (flüssiges Helium) bis über $+300^{\circ}\text{C}$. Für den Einsatz im tiefen kryogenen Bereich, ebenso wie für die hohen Temperaturbereiche (über $+175^{\circ}\text{C}$), sind die DMS aus der Gitterlegierung Karma auf Epoxy-Folie gefertigt. Im Temperaturbereich von -75°C bis $+175^{\circ}\text{C}$ werden für die DMS als Gitterlegierung Konstantan und als Trägermaterial Polyimid herangezogen.

Einzelheiten zu diesem Thema muss der Anwender den Informationen und Instruktionen der einzelnen Hersteller von DMS entnehmen.

7. ERMÜDUNGSVERHALTEN VON DMS

DMS können bei dynamischen Messungen im Normalfall vielen Millionen Lastwechseln standhalten, ohne dass es zu Ermüdungserscheinungen kommt. Wie viele Lastwechsel das im einzelnen Fall sein mögen, hängt von der Amplitudengröße, der Gitterlegierung und dem Trägermaterial des DMS und von sachgemäßen und adäquaten Installationstechniken ab.

Vorausgesetzt, dass für eine gegebene dynamischen Messaufgabe der in jeder Hinsicht richtige DMS ausgewählt und auch fallgerecht installiert worden ist, wird man je nach Amplitudengröße nach einer gewissen Lastwechselzahl ein ganz bestimmtes Phänomen beobachten können, welches man nach internationaler Übereinkunft unter die Folgen des Ermüdungsverhaltens von DMS einordnet. Es handelt sich dabei um eine Nullpunktdrift des DMS nach Erreichen einer bestimmten Lastwechselzahl bei gegebener Amplitude. Um dem Anwender diesbezügliche verwertbare Informationen anhand zu geben, werden von den Herstellern für die jeweiligen DMS-Typen jeweils Dehnungsamplituden und die erreichbaren Lastwechselzahlen als Grenzwerte angegeben, bei denen eine Nullpunktdrift von $100\ \mu\text{m}/\text{m}$ zu beobachten ist. Auf diesen Richtwert hat man sich international geeinigt, um Angaben über das Ermüdungsverhalten von DMS von Hersteller zu Hersteller vergleichbar zu machen. Tab. 2 zeigt eine typische Darstellungsweise für die DMS-Serien EA^o) und ED^o) (Hersteller: MICRO-MEASUREMENTS DIV. der VISHAY MEASUREMENTS GROUP, INC.). Die Werte für die Serie ED zeigen, dass dieser DMS offenbar für dynamische Messungen besonders gut geeignet ist, da bei hohen Dehnungspegeln immer noch große Lastwechselzahlen erreichbar sind. Die Abhängigkeit Dehnungsamplitude/Lastwechselzahl verläuft exponentiell, d.h. mit absinkender Amplitude werden die erreichbaren Lastwechselzahlen überproportional ansteigen.

DMS SERIE EA		DMS SERIE ED	
Amplitude $\mu\text{m}/\text{m}$	Lastwechselzahl	Amplitude $\mu\text{m}/\text{m}$	Lastwechselzahl
+/- 1800	10^5	+/- 2500	10^6
+/- 1500	10^6	+/- 2200	10^7
+/- 1200	10^8		

Tab. 2: Ermüdungsverhalten von DMS

Was ist nun die Ursache für die zu beobachtende Nullpunktdrift? Diese liegt im Folgenden physikalischen Phänomen begründet: Wenn man einen metallischen elektrischen Leiter zyklisch verformt, wird er bei gegebenem Dehnungspegel nach einer bestimmten Lastwechselzahl *seinen spezifischen Widerstand ändern*. Der spezifische Widerstand steigt mit der Lastwechselzahl. Beim DMS bedeutet das eine Änderung des Initialwiderstands, also eine Änderung von $120\ \Omega$ oder $350\ \Omega$ um einen Betrag $+\Delta R$, der sich für den Anwender als Nullpunktverschiebung ausdrückt, da es sich um eine permanente Widerstandsänderung handelt.

8. DEHNUNGSBEREICHE

Im allgemeinen werden die mit DMS messbaren Dehnungsbereiche als diejenigen definiert, innerhalb derer sich der DMS linear verhält, wobei elektrisch bedingte Nicht-Linearitäten bestimmter Brückenschaltungen unberücksichtigt bleiben, da sie nicht auf das DMS-Verhalten als solches zurückzuführen sind. Unter dieser Voraussetzung können mit DMS Dehnungen bis zu $\pm 20\%$ gemessen werden. Das entspricht, ausgedrückt in der nach internationaler Konvention gültigen Dimension, $\pm 200\ 000\ \mu\text{m}/\text{m}$. Solche Werte werden mit speziellen DMS, die für Hochdehnungsmessungen geeignet sind, erreicht. Standard-DMS lassen im allgemeinen Messbereiche bis zu $\pm 50\ 000\ \mu\text{m}/\text{m}$ zu, wobei eine Abhängigkeit des Dehnungsbereichs von der akti-

ven Gitterlänge zu beobachten ist. Bei Gitterlängen unter 3 mm muss mit einem möglichen Dehnungsbe-
reich von +/- 30 000 $\mu\text{m}/\text{m}$ gerechnet werden, während die o.g. +/-50 000 $\mu\text{m}/\text{m}$ für Gitter-längen über 3 mm
gelten.

Ein Wort zu den hier gebrauchten Einheiten. Aus der Definition der Dehnung $\varepsilon = \Delta/l$ ergibt sich, dass es sich
um eine dimensionslose Größe handeln muss. In der Tat wird im Bereich der Werkstoffprüfung die Dehnung
entweder in Prozent oder in Promille ausgedrückt. Im Bereich der Dehnungsmessung in der Experimen-
tellen Spannungsanalyse hat man sich jedoch darauf geeinigt, die direkt aus der Definition (Δ/l) ableitbare
Einheit $\mu\text{m}/\text{m}$ zu benutzen. Da $1 \mu\text{m}/\text{m} = 10^{-6}$, entsprechen 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 0,1 % oder 1 ‰ Dehnung.

9. QUERDEHNUNGSEMPFINDLICHKEIT VON DMS

Der Begriff *Querdehnungsempfindlichkeit* bezieht sich auf die Reaktion von DMS, wenn Dehnungen *quer zur
Gitterlängsachse* auf sie einwirken. Idealerweise ist es wünschenswert, dass DMS gegen solche Quer-
dehnungen total unempfindlich wären. In der Praxis sind jedoch die meisten DMS zu einem gewissen Grade
querdehnungsempfindlich; der Effekt ist aber gewöhnlich klein und bewegt sich in der Größenordnung von
einigen Prozent der Dehnungsempfindlichkeit in Gitterrichtung. Die Größe der Querdehnungsempfindlich-
keit ist abhängig von der Gitterlegierung und der Gittergeometrie. Das Signal aus der Querdehnungsemp-
findlichkeit ist ein Teil des Messsignals und muss als Fehler betrachtet werden.

Im Falle einachsiger Spannungsfelder ist der Fehler gewöhnlich vernachlässigbar klein. Handelt es sich je-
doch um zweiachsige Spannungsfelder, besteht eine große Gefahr, dass eine Hauptdehnung quer durch
das Messgitter eines DMS läuft, und es kann zu großen Messfehlern kommen, wenn keine Korrekturen er-
folgen. Das Nomogramm Abb. 15 zeigt die Größenordnungen möglicher Fehler, die sich aus der Querdeh-
nungsempfindlichkeit von DMS ergeben. Dass diese Problematik bei der Anwendung von DMS-Rosetten
von besonders großer Bedeutung ist, liegt auf der Hand. 3-Element-Rosetten (Abb. 6c) werden schließlich
angewandt, wenn über die Richtung der zu messenden Dehnung keinerlei Information vorliegt. Und die
Wahrscheinlichkeit, dass eine Hauptdehnung quer durch mindestens eines der Rosettengitter läuft, ist sicher
hoch. Das bedeutet, dass bei Rosettenmessungen entsprechende Korrekturen auf jeden Fall durchgeführt
werden müssen.

Der Fehler, der sich aufgrund der Querdehnungsempfindlichkeit eines DMS, der in einem beliebigen Winkel
zur Richtung irgendeines Dehnungsfelds auf irgendein Material installiert ist, kann wie folgt ausgedrückt
werden:

$$n_{\varepsilon} = \frac{k_t \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a} + \nu_0 \right)}{1 - \nu_0 k_t}$$

Es sind: n_{ε} = Fehler in Prozent der Dehnung in Richtung der DMS-Gitterachse.

ν_0 = Poisson'sche Zahl des Werkstoffs, auf dem der K-Faktor bestimmt wurde; gewöhnlich 0,285 (Stahl).

k_t = Querdehnungsempfindlichkeit.

ε_a = Achsialdehnung, Dehnung in Richtung der DMS-Gitterachse (siehe Abb. 14).

ε_t = Transversaldehnung, Dehnung quer zur DMS-Gitterachse (siehe Abb. 14).

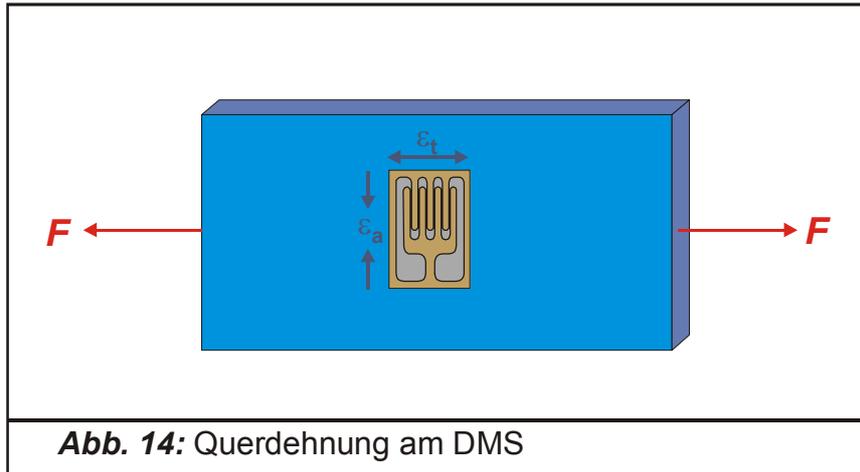


Abb. 14: Querdehnung am DMS

Aus der obigen Gleichung wird klar, dass der prozentuale Fehler aus der Querdehnungsempfindlichkeit mit steigenden Absolutwerten von k_t und ϵ_t/ϵ_a größer wird, gleichgültig, ob diese Werte positiv oder negativ sind. Das Nomogramm Abb. 15 ist eine graphische Darstellung dieser Gleichung. Es ist zu beachten, dass der Hersteller die Größe der Querdehnungsempfindlichkeit k_t in Prozent angibt. Beim Einsetzen dieses Wertes in die Gleichung muss aber der Absolutwert benutzt werden, die Herstellerangabe also durch 100 dividiert werden. In dieser Arbeit wird die Querdehnungsempfindlichkeit mit k_t angegeben. Man muss darauf achten, dass bezüglich der Querdehnungsempfindlichkeit k_t und der Dehnungsempfindlichkeit, also dem **K**-Faktor, keine Konfusion entsteht.

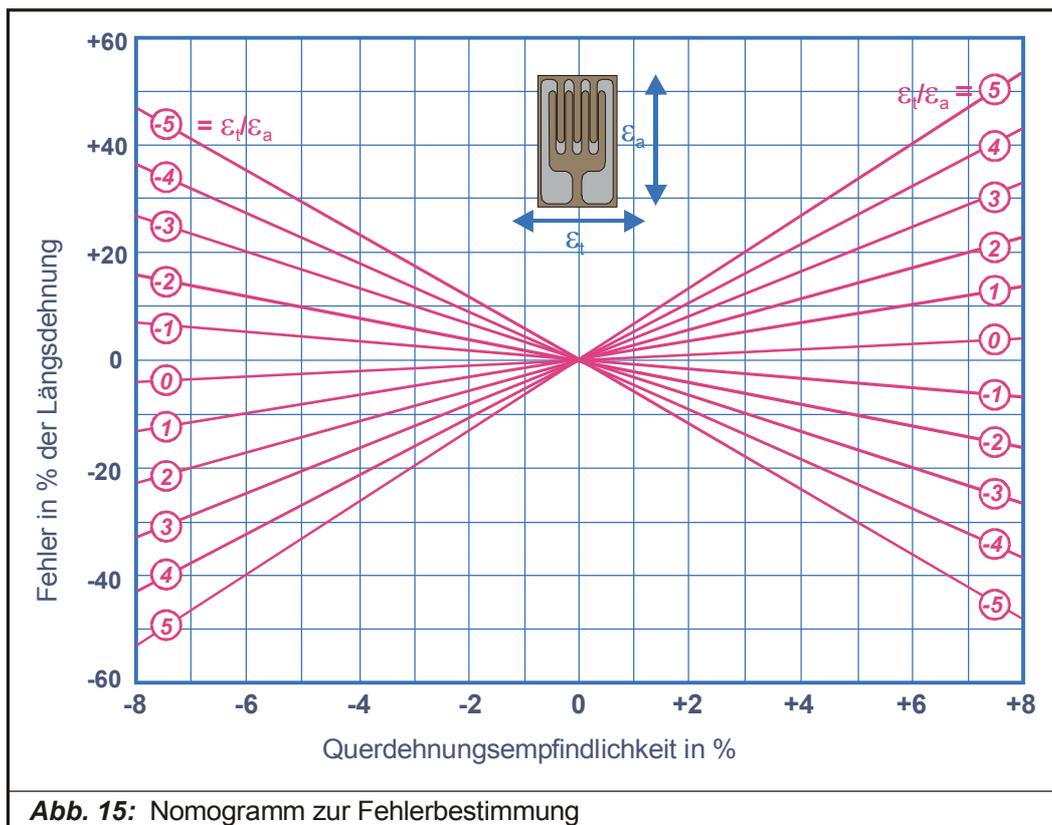


Abb. 15: Nomogramm zur Fehlerbestimmung

10. DMS-INSTALLATION

DMS werden auf das Messobjekt mit Spezialklebern aufgeklebt. Die Kleber müssen einer Reihe von tech-

nisch und wirtschaftlich bedingten Anforderungen genügen, um für den Einsatz mit DMS brauchbar zu sein. Diese Anforderungen wären:

1. Der Kleber muss in der Lage sein dünne Schichten zu formen ($<10\ \mu\text{m}$).
2. Der Kleber muss die Dehnung verlustlos vom Messobjekt in den DMS übertragen.
3. Der Kleber soll möglichst wenig hygroskopisch sein.
4. Der Kleber soll in einem großen Temperaturbereich einsatzfähig sein.
5. Der Kleber soll eine lange Lagerzeit haben.
6. Mehrkomponenten-Kleber sollen optimale Topfzeiten haben.
7. Der Kleber soll einfach anzuwenden sein.
8. Der Kleber darf für den Anwender nicht gesundheitsschädlich sein.

Einige dieser Forderungen schließen die Anwendung von Industrieklebern, auch als sogenannte *Sekundenkleber* bekannt, von vornherein aus. Alle diese Industriekleber enthalten Weichmacher, welche Klebeverbindungen mit diesen Klebern befähigen stoßartigen Belastungen standzuhalten. *DMS-Kleber dürfen solche Weichmacher auf keinen Fall enthalten*, da sonst die geforderte verlustlose Dehnungsübertragung nicht gewährleistet wäre. DMS-Kleber sollten daher ausschließlich vom DMS-Hersteller bezogen werden.

Kaum ein DMS-Kleber ist in der Lage die angeführten Forderungen komplett zu erfüllen. Aus diesem Grunde werden verschiedene Kleber angeboten, welche dann verschiedenen Einsatzbedingungen gerecht werden. Die wichtigsten Kleber für DMS-Installationen sind in Tab. 3 aufgelistet. Darüber hinaus gibt es eine große Palette von Spezial-DMS-Klebern für besondere Anwendungsfälle. Die technischen Einzelheiten über diese und die in Tab. 3 erwähnten Kleber sind den Datenblättern und Anwenderinstruktionen der Hersteller zu entnehmen.

DMS-Installationstechniken sind für den Erfolg einer DMS-Messung von nicht zu unterschätzender Wichtigkeit. Alle diesbezüglichen Instruktionen müssen auf das Peinlichste befolgt werden. Die DMS-Installation besteht im Wesentlichen aus zwei Schritten: 1. *Oberflächenvorbereitung*, 2. *Klebevorgang*.

Die *Oberflächenvorbereitung* wiederum unterteilt man in vier Schritte: a) Mechanische Säuberung; b) Entfetten; c) Aufrauen und d) chemische Oberflächenaufbereitung.

a) *Mechanische Säuberung*: Alle Oberflächenschichten, die sich mechanisch oder chemisch vom Grundwerkstoff des Messobjekts unterscheiden, müssen mit geeigneten Mitteln entfernt werden. Geeignete Mittel sind solche, die weder die Form des Messobjekts noch seine Werkstoffeigenschaften verändern.

b) *Entfetten*: Die Oberfläche muss im Bereich der DMS-Installationsstelle entfettet werden, damit Kleber wirksam werden können. Dazu werden geeignete, hochreine Lösungsmittel herangezogen. Erdölderivate wie Benzin oder dergl. sind nicht geeignet. Ebenso hat sich herausgestellt, dass gängige Lösungsmittel wie Aceton, Trichloräthylen, Tetrachlorkohlenstoff und ähnliche für DMS-Installationen meistens nicht rein genug sind, d.h. mechanische Kontaminationen enthalten. Empfehlenswert sind Isopropylalkohol, Chloroethen, MEK (Methyl-Ethyl-Ketone). Es muss darauf geachtet werden, dass diese Lösungsmittel nicht durch den Gebrauch in den jeweiligen Behältern verschmutzt werden. Es empfiehlt sich der Einsatz von Spraydosen oder nachfüllbaren Sprühflaschen.

c) *Aufrauen*: Aufrauen der Oberfläche ist nicht notwendig, aber für die Messung günstig. Das Aufrauen bewirkt eine Vergrößerung der aktiven Kleberfläche, wodurch höhere Dehnungen gemessen werden können. Je nach Härtegrad der Oberfläche des Messobjekts werden dazu Schmirgelpapiere der Körnungen 200 bis 400 verwandt.

d) *Chemische Aufbereitung*: Alle modernen DMS-Kleber von hinreichender Qualität verlangen chemische Neutralität ($\text{pH} = 7$) sowohl der Oberfläche des Messobjekts, als auch der Klebefläche des DMS. Vorausgesetzt, der DMS wurde von einem qualitätsbewußten Hersteller bezogen, ist der DMS klebefertig und bedarf keiner weiteren Behandlung. Allerdings darf er immer nur mit einer *gesäuberten Pinzette* angefasst werden und *niemals mit bloßen Fingern*. Da der Anwender meistens nicht weiß, ob die Bauteiloberfläche sauer oder basisch ist, wird der gewünschte Zustand, die chemische Neutralität, mit geeigneten Mitteln zwanghaft eingestellt. Das geschieht dadurch, dass man auf die Oberfläche eine wässrige Säurelösung aufbringt, diese kurz einwirken lässt und diese dann, ohne sie eintrocknen zu lassen, wieder abwischt. Damit ist ein bestimmter saurer pH-Wert eingestellt. Jetzt bringt man auf die gleiche Fläche eine wässrige alkalische Lösung auf und verfährt genauso wie vorher mit der Säurelösung. Damit ist die gewünschte chemische Neutralität der Messobjektoberfläche erzielt, und die Oberfläche ist für die Klebung vorbereitet.

www.vmgg.de → Gebrauchsanleitungen

Die Vorgehensweisen, die den Klebevorgang für die einzelnen Kleber erfordern, entnimmt man am besten den Instruktionen der DMS-Hersteller, von denen die Kleber kommen. Diesen Anweisungen ist strikt zu folgen. Für Dehnungsmessungen in der alltäglichen experimentellen Spannungsanalyse wird man, sofern die Temperaturparameter dies zulassen, gewöhnlich zu Schnellklebstoff auf der Basis von Zyanoacrylat zurückgreifen. Geht es um höchstmögliche Messgenauigkeit und ebensolche Langzeitstabilität, kommen eigentlich nur temperaturhärtende 2-Komponenten-Epoxy-Phenol-Kleber infrage, welche auch für kryogene sowie für Messfälle bei höheren Temperaturen die bestgeeigneten sind. Für die Herstellung von Messwertaufnehmern auf DMS-Basis (Kraft-, Druck- oder Beschleunigungsaufnehmer) sind aus Gründen der erzielbaren niedrigen Schichtdicken und der mechanischen Stabilität (günstigstes Kriechverhalten) eigentlich nur die letzteren wirklich geeignet. Bestehen bezüglich einer Messstelle Anforderungen, die über die Möglichkeiten von Schnellklebstoff hinausgehen, andererseits jedoch heißhärtende Kleber aufgrund verschiedener Gegebenheiten ausscheiden, sind 2-Komponenten-Epoxy-Kleber, die bei Raumtemperatur aushärten, die gegebene Problemlösung. Diese Kleber härten im Allgemeinen bei Raumtemperatur in 6 h aus. Ist man jedoch in der Lage die Aushärtetemperatur leicht zu erhöhen, indem man z.B. Infrarot-Strahler oder dergl. anwendet, kann die Aushärtezeit drastisch gesenkt werden. Bei 50 °C brauchen diese Kleber nur noch 2 h Aushärtezeit, bei 75 °C nur noch eine halbe Stunde. Diese Kleber eignen sich besonders gut für DMS-Installationen auf vielen Kunststoffarten sowie auf Beton.

Allgemeine Bezeichnung	Handelsbezeichnung	Chemische Charakteristik	Dehnungsbereich	Temp.-Einsatzbereich	Anwendung
Schnell-Klebstoff	M-Bond 200	Zyanoacrylat	> 6 %	-30 - +65 °C	Allgemeine Anwendung in der Spannungsanalyse.
2-Komponenten-Epoxy-Kleber	M-Bond AE-10	Epoxidharz mit Härter	6 - 10 %	-195 - +95 °C	Raumtemperaturhärtend (6 h). Hohe Dehnungen; Faserverbund-Werkstoffe; Beton; bessere Langzeitstabilität als Schnellklebstoffe.
Heißhärtender 2-Komponenten-Epoxy-Kleber	M-Bond 610	Epoxid-Phenol-System mit Härter	3 %	-269 - +260 °C	Hochpräzisions-Kleber; höchste Langzeitstabilität; für hochgenaue und Langzeitmessungen; Meßwertaufnehmerbau.

Tab. 3: Typische DMS-Kleber

Wie wichtig es ist, bei Dehnungsmessungen in der experimentellen Spannungsanalyse auf möglichst dünne Kleberschichten hinzuwirken, soll anhand der Darstellung in Abb. 16 verdeutlicht werden. Wie man dort sieht, können durch zu dicke Kleberschichten im Biegefall erhebliche Messfehler hervorgerufen werden, wobei zu beachten ist, dass der Abstand der Messebene zur neutralen Faser quadratisch einget.

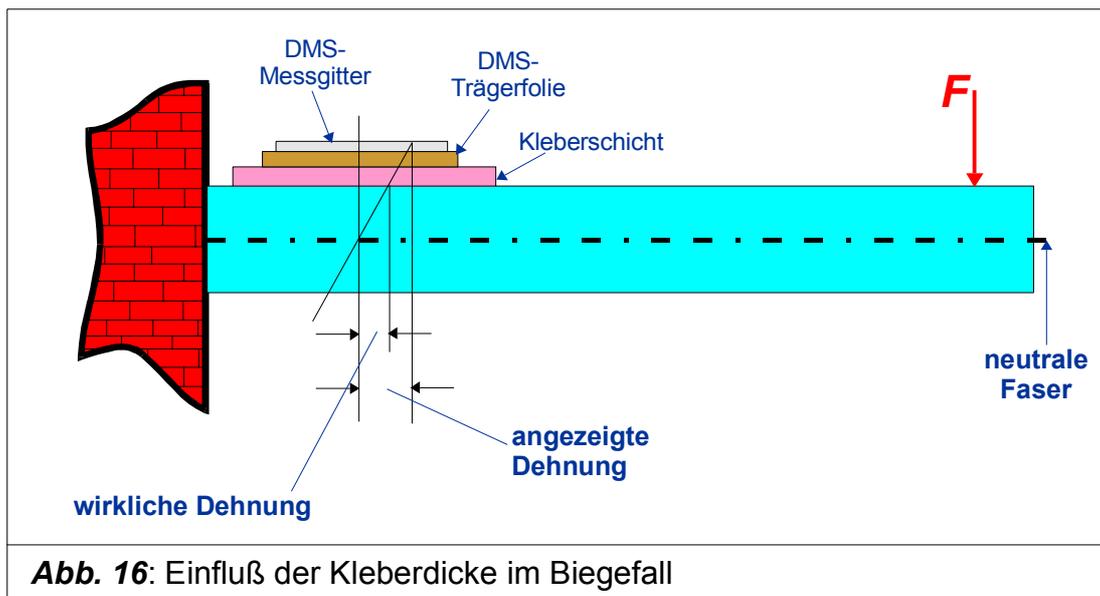


Abb. 16: Einfluß der Kleberdicke im Biegefall

Es kann nun allerdings Anwendungsfälle geben, bei denen aufgrund äußerer Umstände Klebevorgänge für die DMS-Installation nicht möglich sind. Für solche Fälle stehen dem Anwender aufschweißbare DMS zur

Verfügung, welche durch Punktschweißung auf dem Messobjekt befestigt werden. Abb. 17 zeigt die verfügbaren DMS-Typen und deutet schematisch die Art und Weise der Befestigung an. Um diese DMS anwenden zu können, muss natürlich das Messobjekt so geartet sein, dass Punktschweißen möglich ist. Aufschweißbare DMS bestehen aus regulären DMS, die vom Hersteller auf ein Stahlplättchen aufgebracht sind, welches aus einer speziell ausgewählten Stahlsorte besteht und dessen Dimensionen zum DMS in einem genau berechneten Verhältnis stehen. Zur Installation der DMS ist ein spezielles Punktschweißgerät erforderlich, das die Schweißenergie bis etwa 50 Ws kontinuierlich regeln lässt. Für den Installationsvorgang selbst ist nur eine einfache Oberflächenvorbereitung am Messobjekt notwendig. Der Installationsbereich wird metallisch blank geschmirgelt oder geschliffen, mit irgendeinem Lösungsmittel entfettet und ist so bereit für die Punktschweißung.

Als nächstes müssen die auf dem Meßobjekt befestigten DMS, ob geklebt oder punktgeschweißt, verdrahtet werden. Damit sind *Lötvorgänge* verbunden. Im Allgemeinen bedeutet das, dass Verbindungsdrähtchen von DMS zu DMS gezogen und dann auf einen Lötstützpunkt geführt werden müssen. Je eine Lötstelle auf den DMS-Anschlußfahnen und, je nach Brückenschaltung, zwei, drei oder vier Lötstellen auf dem Lötstützpunkt. Hierzu sind kleine und gute, auf jeden Fall temperaturgeregelte Lötgeräte erforderlich. Die eingesetzten Lötzinne müssen hinsichtlich ihrer Charakteristika (Legierung, Solidus/Liquidus-Temperatur)

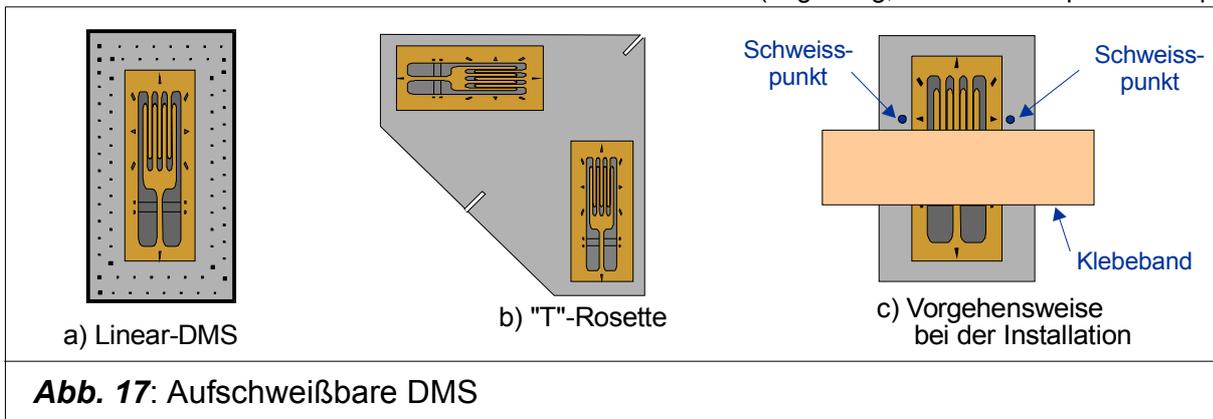
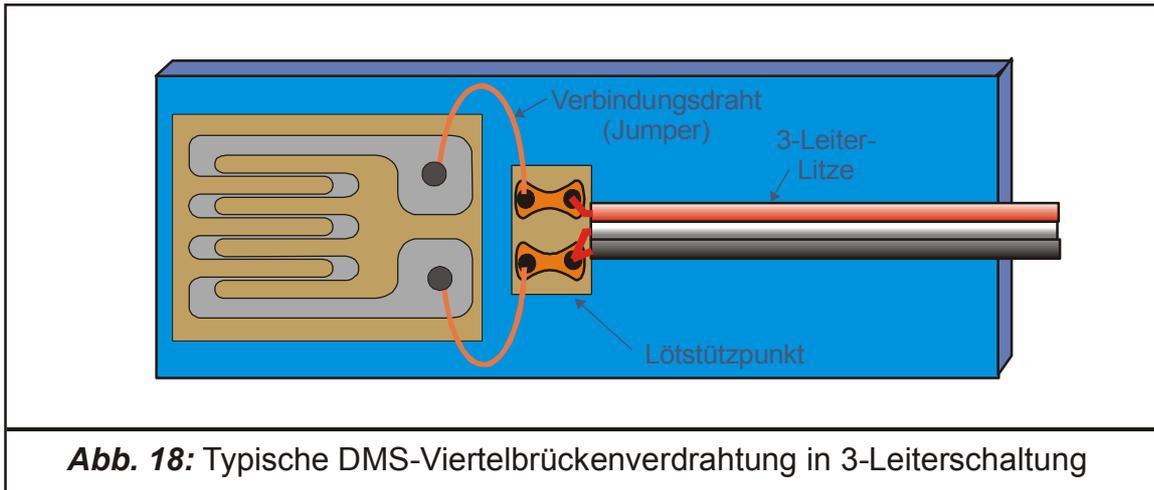


Abb. 17: Aufschweißbare DMS

genau bekannt sein, und der Anwender ist auch hier gut beraten, wenn er die Lötmitte entweder vom DMS-Hersteller bezieht oder nur von DMS-Herstellern empfohlene benutzt. Besonders ist auf die mit den Lötzinne benutzten Flussmittel zu achten, die häufig säurehaltig, in Bezug zum DMS also aggressiv sind und, wenn nicht entfernt, am DMS Korrosion hervorrufen werden. Dadurch wird die Messstelle in kürzester Zeit unbrauchbar. Flussmittelreste werden mit Flussmittel-Lösungsmitteln, die für die DMS-Installation ungefährlich sind, entfernt (Rosin-Solvent). Soll die Messstelle Temperaturen unter -10°C ausgesetzt werden, muss das Lötzinne einen Legierungsanteil von mindestens 0,35 % Antimon enthalten, da sonst Zinnpest einsetzt, wodurch die Lötverbindungen zerstört werden. Die Lötmassen sollen klein und symmetrisch gehalten werden und möglichst sphärische Form haben. Kleine Lötzinne massen sind besonders wichtig, wenn die Messstelle dynamischen Belastungen ausgesetzt ist, weil dadurch die Ermüdungsfestigkeit der Lötverbindung wesentlich verbessert wird. Auf richtige Lötspitzentemperatur ist zu achten, und beim Lötten im Bereich des DMS soll, um die Lötzeit zu verkürzen, möglichst rasch viel Wärme übertragen werden. Deswegen empfehlen sich meiselförmige Lötspitzen, die flach aufgelegt werden, um den raschen, flächigen Wärmefluss zum Lötzinne und zu der Lötfläche zu unterstützen.

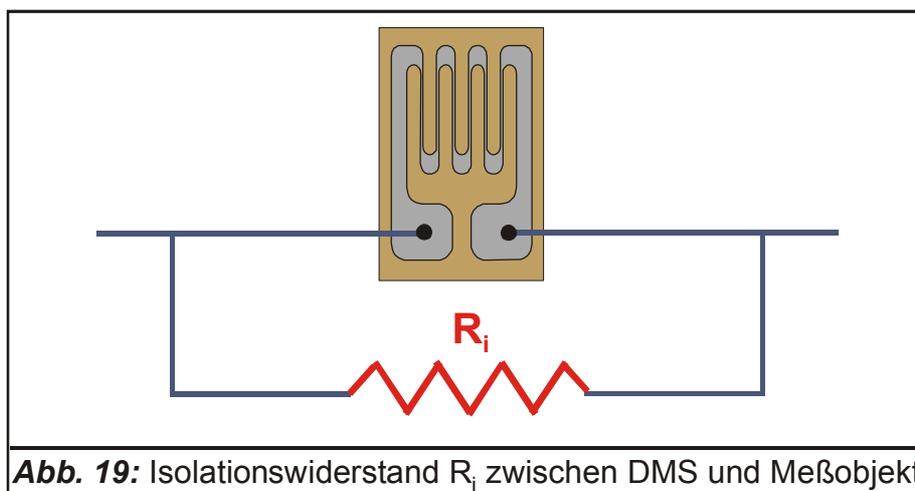


11. QUALITÄTSPRÜFUNG DER INSTALLATION

Nach Fertigstellung der DMS-Installation ist es sicher sinnvoll, deren Qualität zu überprüfen, bevor weitere Schritte unternommen werden und schließlich die Dehnungsmessung durchgeführt wird. Zwei wichtige Tests lassen feststellen, ob die Messstelle zufriedenstellend arbeitet. Zuerst wird der sogenannte *Radiergummitest* angewandt und danach der *Isolationswiderstand* zwischen DMS und Messobjekt gemessen.

Der Radiergummitest dient zur Überprüfung der Kleberschicht. Dazu schließt man den installierten DMS an ein geeignetes Messgerät an, z.B. an den zur Messung bereitgestellten Brückenverstärker, gleicht die Messkette auf Null ab und drückt dann mit einem Radiergummi mittlerer Härte mit festem Druck auf das Messgitter des DMS. Das Messgerät sollte jetzt nur einen sehr kleinen Ausschlag anzeigen, der bei Wegnahme des Radiergummidrucks sofort auf Null zurückgehen muss. In diesem Fall ist die Messstelle in Bezug auf die Kleberschicht nicht zu beanstanden. Zeigt das Messgerät einen größeren Ausschlag der nicht oder nur sehr langsam auf Null zurückgeht, ist die Messstelle für die Dehnungsmessung unbrauchbar. Die Ursache liegt darin, dass entweder die Kleberschicht nicht voll ausgehärtet ist, dass sie Blasen oder irgendwelche Kontaminationen enthält oder dass der DMS teilweise ungeklebt ist.

Die Messung des Isolationswiderstands zwischen DMS und Messobjekt (natürlich nur bei elektrisch leitendem Messobjekt) ist insofern von großer Wichtigkeit, weil ein zu niedriger Isolationswiderstand bei der Dehnungsmessung zu erheblichen Messfehlern führen kann.



Den Isolationswiderstand muss man als parallel geschalteten Widerstand betrachten zum DMS (Abb. 19). Aus der elementaren Elektrotechnik ist bekannt, dass der resultierende Widerstand aus zwei parallel geschalteten Widerständen kleiner ist, als der kleinste Einzelwiderstand. Geht man berechtigterweise davon aus, dass in der hier vorliegenden Parallelschaltung (DMS und Isolationswiderstand) der DMS den kleinsten

Einzelwiderstand darstellt, würde also bei zu niedrigem Isolationswiderstand der Messbrücke ein Widerstand angeboten werden, der niedriger ist als der DMS-Widerstand, also niedriger als z.B. 120 Ω. Die Messbrücke aber kann Abweichungen vom 120 Ω-Initialwiderstand nur als dehnungsbedingt interpretieren und wird demzufolge einen Dehnungswert anzeigen. Natürlich ist dieser Wert dann ein Fehlersignal und muss vom Mess-techniker unbedingt als solches identifiziert werden. Tab. 4 gibt typische Größen von Fehlersignalen bei entsprechenden Isolationswiderständen für DMS mit 120 Ω und 350 Ω.

Bei Langzeitmessungen ist es daher unerlässlich, in bestimmten Zeitabständen den Isolationswiderstand zu überprüfen, um sicherzustellen, dass er unverändert hoch ist. Durch Eindringen von Feuchtigkeit, durch sich bildende Kriechstrompfade oder durch andere Ursachen kann eine kontinuierliche Erniedrigung des Isolationswiderstands bis hin zu sehr niedrigen Werten bewirkt werden.

120 Ω DMS		350 Ω DMS	
Isolationswiderstand	Fehlersignal	Isolationswiderstand	Fehlersignal
59,880 kΩ	1000 μm/m	174,650 KΩ	1000 μm/m
598,800 kΩ	100 μm/m	1,74650 MΩ	100 μm/m
5,9880 MΩ	10 μm/m	17,4650 MΩ	10 μm/m
59,880 MΩ	1 μm/m	174,650 MΩ	1 μm/m
598,80 MΩ	0,1 μm/m	1,74650 GΩ	0,1 μm/m
5,9880 GΩ	0,01 μm/m	17,4650 GΩ	0,01 μm/m

Tab 4: Isolationswiderstände und entstehende Fehlersignale

12. DMS-SCHUTZABDECKUNGEN

DMS-Messstellen sollten immer gegen schädliche Umwelteinflüsse geschützt werden. Diese Umwelteinflüsse können Luftfeuchtigkeit, chemisch aggressive Dämpfe, Maschinenöle, Säuren oder Laugen, Wasser und vieles andere mehr sein. Natürlich besteht auch die Gefahr einer mechanischen Beschädigung der Messstelle. In allen Fällen ist der DMS und seine unmittelbare Umgebung mit geeigneten und der Gefahr adäquaten Abdeckmitteln zu schützen. Die DMS-Hersteller bieten mit ihrem DMS-Zubehör geprüfte und wirksame Schutzabdeckmittel an, auf die der Anwender zurückgreifen sollte. Es handelt sich dabei um verschiedene Schutzlacke, um Silikonkautschuke, Acryl- und Epoxydharze und dergl. mehr. Folgt man den Anwendungshinweisen der Hersteller, werden im Allgemeinen zufriedenstellende Ergebnisse erzielt.

www.vmgg.de → Gebrauchsanleitungen

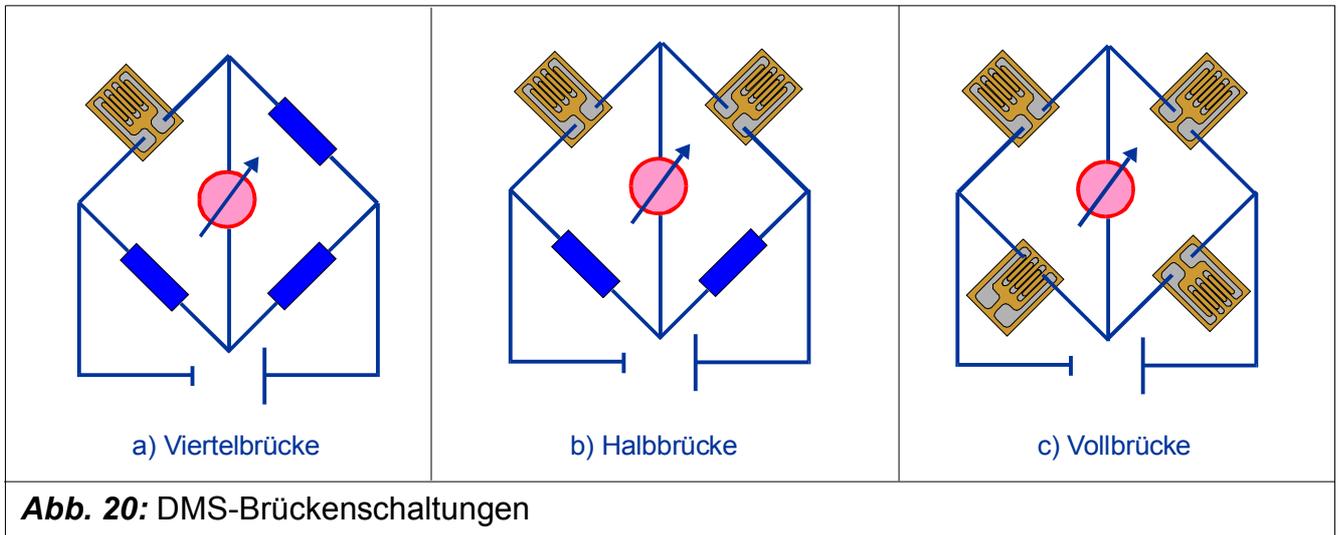
Allerdings muss beim Einsatz von Schutzabdeckmitteln immer ein paar einfachen generellen Regeln gefolgt werden.

- Alle Flächen, die mit dem Abdeckmittel in Berührung kommen, müssen sauber und fettfrei sein.
- Die erste aufgebrachte Abdeckschicht muss den um den DMS herum ausgequetschten Kleber überlappend überdecken.
- Beim Einsatz von mehrschichtigen Abdeckungen muss die oben liegende die darunterliegende überlappend überdecken.
- Vor Aufbringen einer neuen Schicht muss die vorhergehende voll ausgehärtet bzw. lösungsmittel frei sein.
- Es ist sorgfältig darauf zu achten, dass die angewandten Schutzabdeckungen mit dem Isolationsmaterial des Messkabels, das in die Schutzabdeckung hineinragt, eine gute, leckfreie Verbindung eingeht.

Schutzabdeckmittel können am Messobjekt erhebliche und fehlerverursachende Versteifungseffekte hervorrufen. Deswegen soll man Abdeckmittel mit möglichst niedrigen E-Moduln den Vorzug geben. Hat man es mit besonders dünnwandigen Messobjekten zu tun oder hat der Werkstoff, aus dem das Messobjekt besteht, selbst einen niedrigen E-Modul, sollte man, soweit möglich, pastöse Abdeckmittel oder solche mit sehr niedriger Viskoelastizität anwenden.

13. DMS-BRÜCKENSCHALTUNGEN UND BRÜCKEN-AUSGANGSSIGNALE

Wie eingangs schon dargestellt, kommt zur Messung der kleinen Widerstandsänderungen der DMS die bekannte Wheatstone'sche Brückenschaltung zum Einsatz (Abb 3). In der DMS-Messtechnik spricht man je nach Anzahl der in einer Brückenschaltung enthaltenen DMS von Viertelbrücken, Halbbrücken und Vollbrücken (Abb. 20).



Um in einer solchen Brückenschaltung ein Signal zu generieren, muss in den jeweils benachbarten Brückenzeigen eine betragsgleiche aber vorzeichenunterschiedliche Widerstandsänderung stattfinden oder eine betragsunterschiedliche, jedoch vorzeichengleiche oder eine betrags- und vorzeichen unterschiedliche. Die Brückenausgangsspannung, also die Signalspannung aus einer gegebenen DMS-Brückenschaltung berechnet sich zu:

$$U_A = U_B \times \frac{1}{4} \times N \times K \times \varepsilon$$

Es sind: U_A = Brückenausgangsspannung (Volt)
 U_B = Brückenspeisespannung (Volt)
 N = Brückenfaktor
 K = K-Faktor der eingesetzten DMS
 ε = Dehnung ($\mu\text{m}/\text{m}$)

Neben den hier angeführten allgemein bekannten Größen, bedarf der *Brückenfaktor* N einer Erklärung. Dieser Faktor ergibt sich aus der Platzierung bestimmter DMS einer Brückenschaltung im gegebenen Dehnungsfeld. Aus den Darstellungen in Abb. 21 geht die Größe des jeweiligen Brückenfaktors hervor.

Die angegebene Beziehung ergibt die Brückenausgangsspannung vor der Verstärkung. Um ein Gefühl für die Spannungsgrößen zu vermitteln, mit denen zu arbeiten ist, sei hier ein numerisches Beispiel für den Fall einer Viertelbrückenschaltung angeführt, welche die in der experimentellen Spannungsanalyse am häufigsten vorkommende Brückenschaltungsart ist. Für das numerische Beispiel werden praxisgerechte Werte benutzt.

$U_B = 2 \text{ V}$; $N = 1$; $K = 2,115$; $\varepsilon = 1000 \mu\text{m}/\text{m}$

$$U_A = 2 \times 1/4 \times 1 \times 2,115 \times (1000 \times 10^{-6}) = 0,0010575 \text{ V} = \mathbf{1,06 \text{ mV}}$$

Wie man sieht, ist eine Verstärkung dieses Signals durchaus notwendig, um bestimmte erforderliche Messwertauflösungen zu erreichen, oder um das Messsignal mit Peripheriegeräten, die an den Ausgang des Brückenverstärkers angeschlossen werden (Oszilloskop, X/Y-Recorder, Magnetbandgeräte, Digitalanzeigen, EDV-Speicher), einwandfrei darzustellen.

Bei allen Brückenschaltungen, die mit DMS ausgeführt werden, ist es von absoluter Wichtigkeit, dass bei der *Verdrahtung auf peinlichst genaue Widerstandssymmetrie* geachtet wird. Die allgemeine Aussage, dass eine Wheatstone'sche Brückenschaltung aus vier Widerständen besteht, ist für die Praxis insofern irreführend, als diese vier Widerstände elektrisch miteinander verbunden werden müssen und die Verbindungsdrähte natürlich auch Widerstandsmaterial darstellen. Ist dieses Widerstandsmaterial nicht in allen vier Brückenäzweigen von gleichem Widerstandsbetrag und den gleichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt, wird sich eine solche Brückenschaltung niemals temperaturstabil gestalten lassen. Die zur Verbindung der DMS benutzten Drähtchen bestehen aus Kupfer. Dieses Material hat einen relativ hohen Temperaturkoeffizienten des Widerstands, was bedeutet, dass es um ein Vielfaches temperaturempfindlicher reagiert als der DMS. Sind nun in den einzelnen Brückenäzweigen unterschiedliche Drahtlängen eingeschaltet, wird von vorneherein keine Widerstandssymmetrie der Brücke vorliegen, d.h. die Brücke verstimmt sein. Diese Brückenverstimmung kann im Allgemeinen mit der Brückenabgleich-Funktion des Messinstruments vor der Dehnungsmessung auf Null abgeglichen werden. Wird die Brückenschaltung danach allerdings einer, wenn auch nur leichten Temperaturänderung ausgesetzt, wird es rasch zu einer erheblichen Nullpunktdrift kommen, die sehr leicht Größenordnungen annehmen kann, welche die Größe der Messsignale übertreffen. Werden also Brückenschaltungen aus mehreren DMS hergestellt, muss man sich, entsprechend den örtlichen Gegebenheiten, das längste zur DMS-Verbindung nötige Drähtchen suchen, und diese Drähtchenlänge ist das verbindliche Maß für die Länge aller anderen Verbindungsdrähtchen der Schaltung. Wird die Notwendigkeit der symmetrischen Brückenverdrahtung missachtet, können selbst Temperaturänderungen von nur ein, zwei oder drei Grad zu erheblich störender Nullpunktdrift führen. In der messtechnischen Praxis werden die DMS häufig für solche Nullpunktdriften verantwortlich gemacht, was für temperaturelbstkompensierende DMS falsch ist.

Hinsichtlich der Brückenverdrahtung stellt die Viertelbrückenschaltung einen Sonderfall dar. Für sie ist es besonders wichtig, eine Möglichkeit der temperaturunempfindlichen Verkabelung zu finden. Betrachtet man die in Abb. 22 dargestellte 2-Leiterverdrahtung, wie sie theoretisch durchaus richtig wäre, stellt sich diese schnell als total asymmetrisch heraus, und kleine Temperaturänderungen werden große Nullpunktdrift hervorrufen.

Die Asymmetrie kann beschrieben werden mit:

$$R_{K1} + R_{DMS} + R_{K2} \neq R_{BE}$$

Es sind: R_{K1}, R_{K2} = Kabelwiderstände
 R_{DMS} = DMS-Widerstand
 R_{BE} = Brückenergänzungswiderstand

Da im Brückenäzweig R_{BE} keine oder nur vernachlässigbar kleine Kabelwiderstände vorhanden sind, im benachbarten Brückenäzweig jedoch die Kabelwiderstände R_{K1} und R_{K2} in Serie zum DMS-Widerstand R_{DMS} liegen, ist die Widerstandsasymmetrie der beiden Brückenäzweige, die zur Halbbrücke verschaltet sind, deutlich.

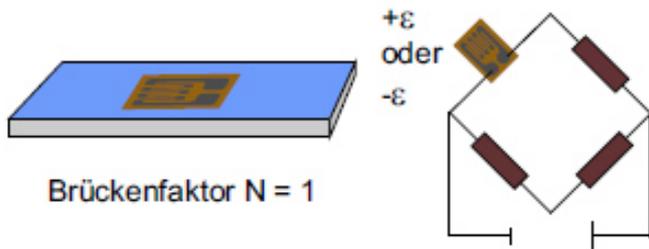
Unter Berücksichtigung der praxisgerechten Bedingung

$$R_{K1} = R_{K2} \text{ und } R_{DMS} = R_{BE}$$

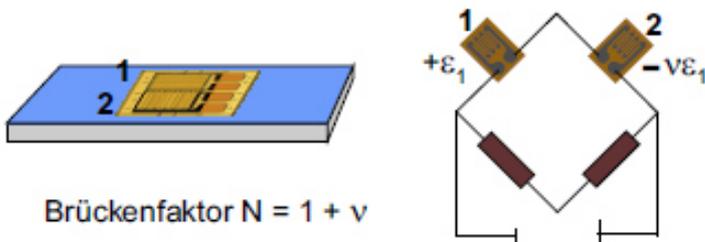
müsste eine schaltungsmäßige Realisierung der Beziehung

$$R_{K1} + R_{DMS} = R_{K2} + R_{BE}$$

eine Problemlösung bieten und eine wirklich widerstandssymmetrische Schaltung erbringen. In der Tat ist diese Gleichung mit der 3-Leiterschaltung (Abb. 22) realisiert, sodass damit Temperatureinflüsse auf die Verkabelung eliminiert sind. R_{K1} liegt in Serie mit R_{DMS} und R_{K2} in Serie mit R_{BE} .

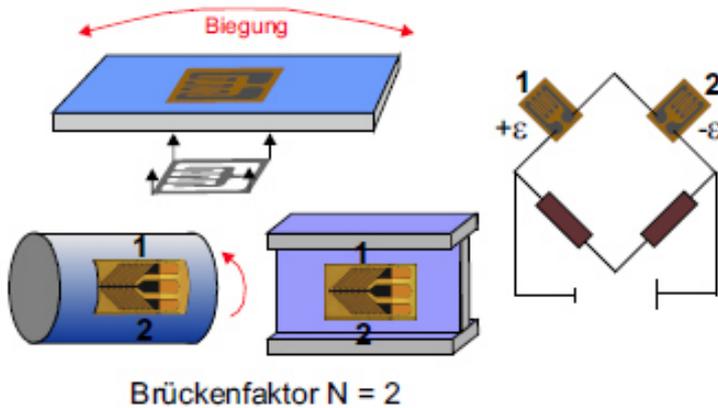


Viertelbrücke im 1-achsigen Spannungsfeld
Zug, Druck oder Biegung



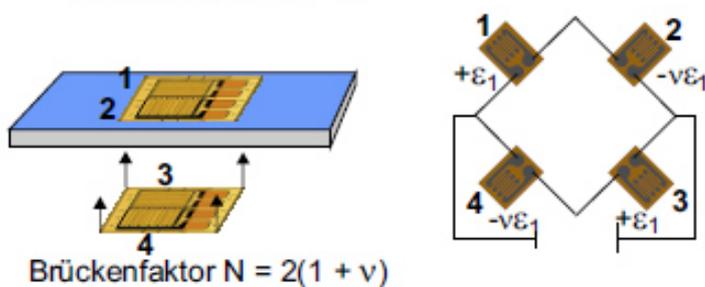
Poisson'sche Halbbrücke im 1-achsigen Spannungsfeld,
Zug, Druck oder Biegung.

Bei Umkehrung der Belastungsrichtung Vorzeichenumkehrung.



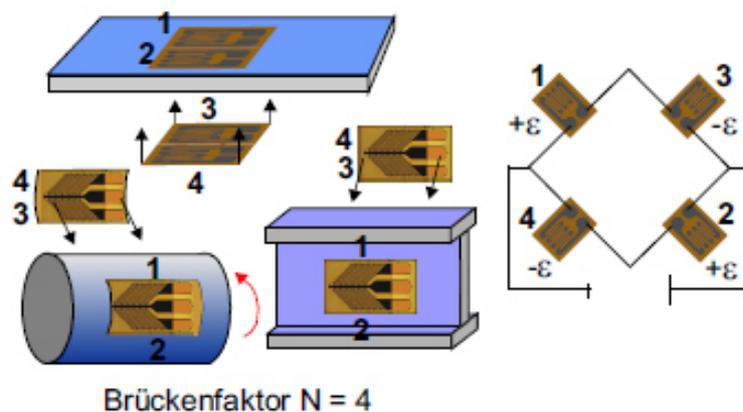
Voll aktive Halbbrücke im 1- oder 2-achsigen Spannungsfeld,
nur Biegung Torsion und Schub.

Bei Umkehrung der Belastungsrichtung Vorzeichenumkehrung.



Poisson'sche Vollbrücke im 1-achsigen Spannungsfeld,
Zug, Druck,
kompensiert Biegung.

Bei Umkehrung der Belastungsrichtung Vorzeichenumkehrung.



Vollaktive Vollbrücke im 1- oder 2-achsigen Spannungsfeld,
nur Biegung, Torsion
und Schub

Bei Umkehrung der Belastungsrichtung Vorzeichenumkehrung.

Abb. 21: Praktische DMS-Brückenschaltungen und Brückenfaktoren

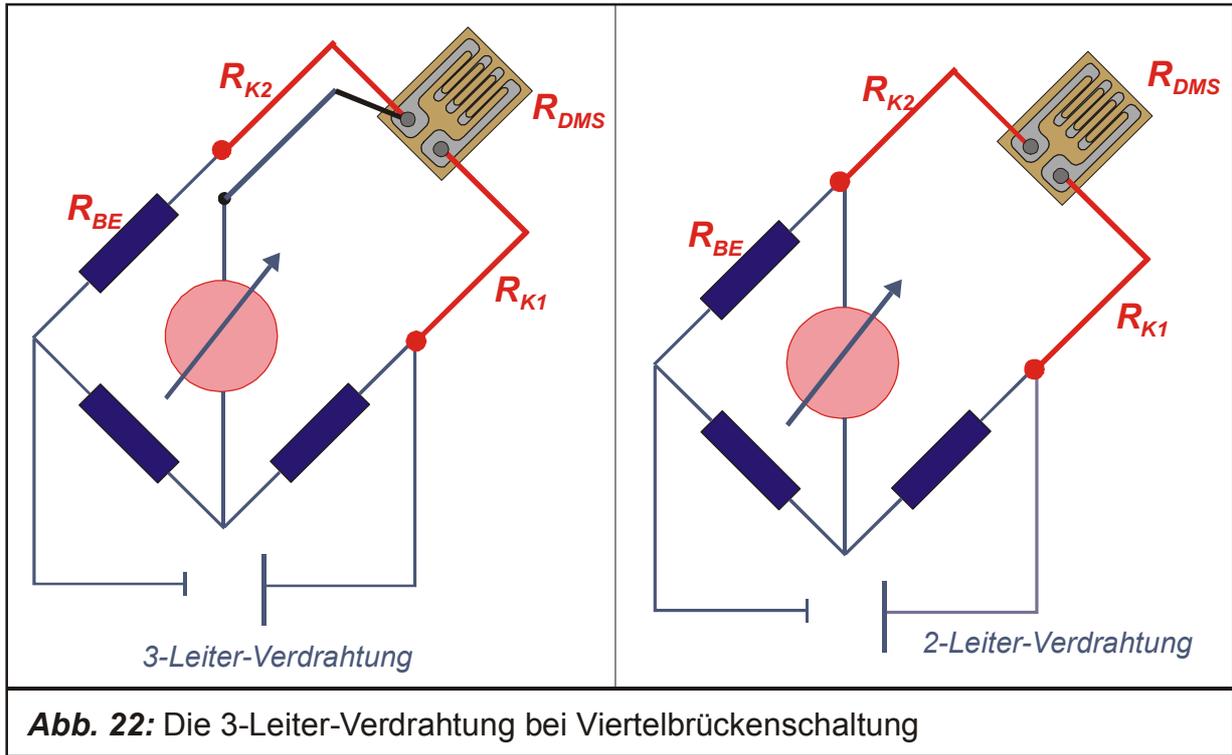


Abb. 22: Die 3-Leiter-Verdrahtung bei Viertelbrückenschaltung

Voraussetzung für die Anwendung dieser Schaltung ist ein Brückenverstärker, der den Brückenergänzungswiderstand R_{BE} enthält und somit einen Eingang für die Viertelbrücke in 3-Leiterschaltung bereitstellt. Moderne Gleichspannungsbrückenverstärker bieten diese Möglichkeit in der Regel, während ältere Brückenverstärker in Trägerfrequenztechnik nur Halbbrückeneingänge vorsehen und den Anschluß echter Viertelbrücken von vorneherein ausschließen.

BIBLIOGRAPHIE

- Measurements Group Tech-Note TN-501-1: ***Zur Einschränkung von Rauschsignalen bei DMS- Messungen***
- Measurements Group Tech-Note TN-502: ***Zur Optimierung der elektrischen Speisung von DMS***
- Measurements Group Tech-Note TN-504-1: ***Strain Gage Thermal Output and Gage Factor Variation with Temperature***
- Measurements Group Tech-Note TN-505-3: ***Strain gage Selection - Criteria, Procedures, Recommendations***
- Measurements Group Tech-Note TN-507: ***Fehler aufgrund der Nicht-Linearität von Wheatstone-Brückenschaltungen***
- Measurements Group Tech-Note TN-508-1: ***Ermüdungsverhalten von Micro-Measurements-DMS***
- Measurements Group Tech-Note TN-509: ***Meßfehler aufgrund der Querdehnungsempfindlichkeit von DMS***
- Measurements Group Tech-Note TN 510: ***Die Konstruktion von Membran-Druckaufnehmern***
- Measurements Group Tech-Note TN-511: ***Richtungsfehler bei DMS-Installationen***
- Measurements Group Tech-Note TN-512: ***Die Messung ebener Schubzustände mit DMS***
- Measurements Group Tech-Note TN-513-1: ***Measurement of Thermal Expansion Coefficient Using Strain Gages***
- Measurements Group Tech-Note TN-514: ***Nebenschluß-(Shunt)-Kalibrierung von DMS-Instrumenten***
- Measurements Group Tech-Note TN-515: ***Strain Gage Rosettes - Selection, Application and Data Reduction***
- Measurements Group Tech-Note TN-516: ***Errors Due to Shared Leadwires in Parallel Strain Gage Circuits***
- Measurements Group DMS-Katalog 500 (1993)***
- Measurements Group DMS-Zubehör-Katalog A-110-7***

→ www.vmgg.de

