

6 DMS-Technik

Die nähere Betrachtung der Dehnungsmessstreifen (DMS) und der damit verbundenen Messtechnik in diesem Kapitel verfolgt zwei Ziele. Zum einen soll anhand dieser Art von Sensoren der praktische Umgang mit Messgebern weiter vertieft und zum andern die zentrale Bedeutung der DMS wie der Dehnungsmessung im Bereich der strukturmekanischen Versuchstechnik verdeutlicht werden. Dabei bilden Aufbau und Eigenschaften der Dehnungsmessstreifen, die Messschaltungen, die Kalibrierung, die Fehlereinflüsse und die Spannungsermittlung an Bauteilen die wesentlichen Schwerpunkte.

6.1 Einleitung

Ihrem Namen entsprechend dienen Dehnungsmessstreifen a priori zur messtechnischen Bestimmung von Dehnungen, wobei der Begriff „Dehnungen“ sowohl „Zugdehnungen“ (mit positivem Vorzeichen) als auch „Druckdehnungen“ oder „Stauchungen“ (mit negativem Vorzeichen) beschreibt. Bild 6.1 zeigt beispielhaft eine typische Ausführung solcher Sensoren.

Äußere und innere Einwirkungen auf einen Körper, wie Kräfte, Drehmomente, Drücke, Wärme und andere, verursachen im Allgemeinen strukturelle Veränderungen, die mit DMS an der Oberfläche des Körpers messbar sind und die zudem Rückschlüsse auf die verursachende Größe ermöglichen. Davon macht man beispielsweise in der „experimentellen Spannungsanalyse“ Gebrauch, um Materialeigenschaften oder Beanspruchungszustände zu ermitteln und letztlich Erkenntnisse über Sicherheit und Lebensdauer zu gewinnen.

Spezielle Messgrößen-Aufnehmer oder Messdosen verwenden DMS als Sensoren, um Kräfte oder verwandte Größen (insbesondere Drehmomente, Drücke) zu messen. Diese Geräte enthalten einen besonders gestalteten Federkörper, der einen eindeutigen und möglichst linearen Zusammenhang zwischen der zu ermittelnden Größe und der tatsächlich gemessenen Dehnung sicherstellt (vgl. Abschnitt 3.2.8).

Die Vielfalt und Anpassungsfähigkeit der auf dem Markt erhältlichen DMS verhelfen der damit verbundenen Messtechnik zu ihrer dominierenden Stellung. Als wichtigste Vorzüge sind zu nennen:

- Selektive Erfassung einzelner Beanspruchungskomponenten eines Bauteils durch geeignete Messschaltungen mit mehreren DMS (vgl. Abschnitt 6.3),
- Kompensation von Störeinflüssen, z.B. durch Temperatureinwirkungen (vgl. Abschnitt 6.3),
- großer Dehnbarkeitsbereich: $|\varepsilon| \geq 10 \cdot 10^{-2} \text{ m/m } (\pm 10\%)$,
- hohe Auflösbarkeit des Messsignals,
- keine Ansprechschwelle,
- großer Temperaturbereich der Anwendung von ca. -269°C bis zu ca. $+1000^\circ\text{C}$,
- geringe Größe und Masse (d.h. im Allgemeinen keine Beeinträchtigung des dynamischen Verhaltens des untersuchten Bauteils),
- Messbarkeit dynamischer Vorgänge,
- hohe Schwingfestigkeit.

Der wesentliche Nachteil eines DMS liegt darin, dass er nur einmal zu verwenden ist, denn nach seiner Applikation ist er vom Prüfobjekt ohne Zerstörung nicht mehr entfernbar.

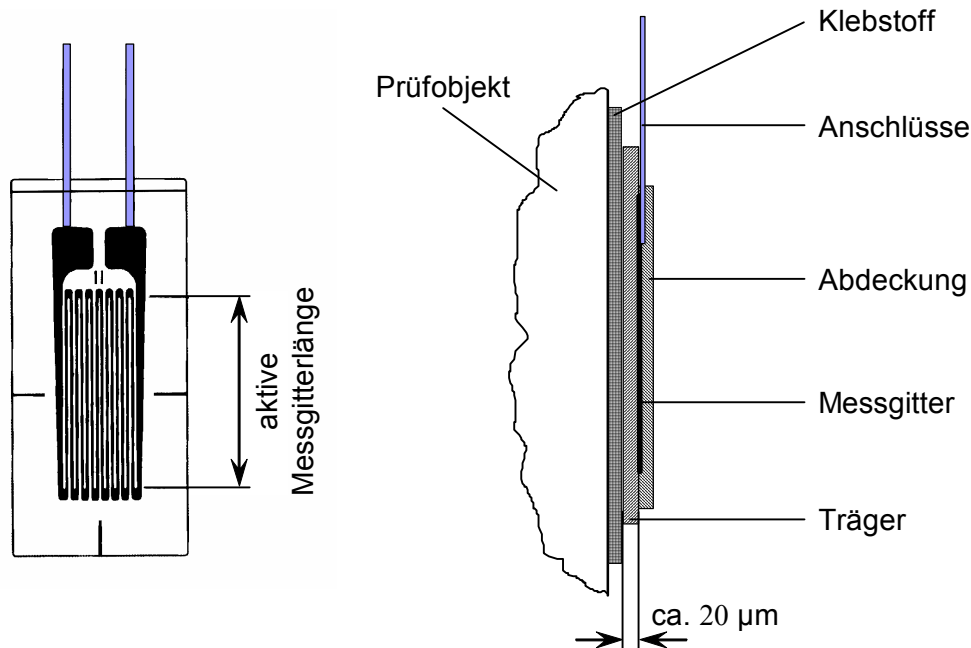


Bild 6.1: Dehnungsmessstreifen DMS.

6.2 Wirkungsweise, Aufbau und Eigenschaften

Die Wirkungsweise der DMS beruht auf dem von Wheatstone und Thomson Mitte des 19. Jahrhunderts gefundenen Dehnungs-Widerstands-Effekt elektrischer Leiter. Den Zusammenhang zwischen der relativen Widerstandsänderung des DMS und der sie verursachenden Dehnung beschreibt die Gleichung:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \varepsilon \quad \text{mit} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta R \text{ Widerstandsänderung des Messgitters,} \\ R_0 \text{ Nennwiderstand,} \\ k \text{ „k-Faktor“, Proportionalitätsfaktor,} \\ \varepsilon \text{ relative Längenänderung, Dehnung des Messgitters.} \end{array} \right\} \quad (6.1)$$

Handelsübliche DMS haben Nennwiderstände von 120 Ω, 350 Ω, 600 Ω, 700 Ω und 1000 Ω. Der k-Faktor lässt sich nur näherungsweise berechnen; er wird deshalb bei der Herstellung der DMS experimentell bestimmt und zusammen mit anderen Kenngrößen auf der jeweiligen DMS-Verpackung angegeben.

6.2.1 Aufbau und Befestigung

Es gibt verschiedene Typen von DMS, deren grundsätzlicher Aufbau im Allgemeinen aber gleich ist. "Draht-DMS" besitzen ein Messgitter aus feinem Widerstandsdraht (Durchmesser kleiner als $3 \cdot 10^{-2}$ mm), das mäanderförmig auf einem dünnen Isoliermaterial (Träger) aufgeklebt ist (ähnlich wie in Bild 6.1 links). Bei "Folien-DMS" besteht das Messgitter aus einer dünnen, mäanderförmig geätzten Folie aus Widerstandsmaterial (Dicke: 3 bis $5 \cdot 10^{-3}$ mm). Meist wird das Messgitter zum Schutz mit einer zweiten Folie abgedeckt (Bild 6.1). Der DMS wird meist auf das Prüfbjekt aufgeklebt. Der zu verwendende Klebstofftyp ist abhängig vom Trägermaterial und wird vom DMS-Hersteller angegeben.

Im Gegensatz zu klebbaren DMS besitzen anschweißbare DMS eine Stahlfolie, auf der das Messgitter mit Phenolharz oder keramischem Kitt isoliert befestigt ist. Der DMS wird durch Punktschweißung mit dem Versuchsstück verbunden.

Hochtemperatur-DMS, die mit dem Flammstanzverfahren befestigt werden, besitzen weder Träger noch Abdeckung. Das Messgitter wird durch einen Hilfsträger gehalten, der während der Montage entfernt wird.

6.2.2 Eigenschaften

Vorbemerkung: Bei der Anwendung von DMS ist darauf zu achten, dass die nachfolgend beschriebenen Eigenschaften, wie der k-Faktor und die Temperaturabhängigkeit, sowie der Temperatureinfluss an der Messstelle keine systematischen Fehler in der Messkette verursachen.

k-Faktor

Bei den meisten DMS mit metallischem Messgitter (zumeist Kupfer- und Nickel-Legierungen wie Konstantan, Karma, Nichrom-V) liegt der Wert des k-Faktors in der Nähe von 2. Die herstellungsbedingte Toleranz beträgt je nach Serie etwa $\pm 0,5\%$ bis $\pm 1\%$ und wird vom Hersteller auf der DMS-Verpackung angegeben. Sie geht bei Dehnungsmessungen als Unsicherheit in das Messergebnis ein.

Wie der Vergleich der Beziehungen (3.2.3) und (6.1) ergibt, setzt sich der Wert des k-Faktors aus 2 Komponenten zusammen, wobei $\Delta l/l$ der Dehnung entspricht (ν ist wieder die Querdehnungszahl und ρ der spezifische Widerstand):

$$k = k_1 + k_2 = (1 + 2\nu) + \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon} \quad \text{mit} \quad \left\{ \begin{array}{l} k_1 \text{ durch Längen- und Querschnittsänderungen} \\ \text{verursacht,} \\ k_2 \text{ infolge Änderung des spezifischen} \\ \text{Widerstandes } \rho \text{ relativ zur Dehnung.} \end{array} \right\} \quad (6.2)$$

Durch geeignete Auswahl des Leitermaterials kann erreicht werden, dass k auch über die Fließgrenze hinaus konstant bleibt, wie am Beispiel Konstantan zu sehen ist:

- elastisch: $k_1 = 1,6$ $k_2 = 0,4$ \rightarrow $k = 2,0$,
- plastisch: $k_1 = 2,0$ $k_2 = 0,0$ \rightarrow $k = 2,0$.

Die Berücksichtigung des k-Faktors ist immer dann nötig, wenn die Kalibrierung einer DMS-Messstelle nicht möglich ist, beispielsweise bei Messungen zur Spannungsanalyse. DMS-Messverstärker erlauben meist die Einstellung eines k-Faktors, so dass die Verstärkerausgangsspannung der Dehnung direkt proportional ist. Andernfalls muss der Verstärker auf einen festen k-Faktor (z.B. 2,00) kalibriert und das Ausgangssignal rechnerisch auf den tatsächlichen k-Faktor des betreffenden DMS korrigiert werden:

$$\varepsilon = \varepsilon_a \frac{2}{k_{\text{DMS}}} \quad \text{mit} \quad \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon \text{ wirklicher Dehnungswert,} \\ \varepsilon_a \text{ angezeigter Messwert,} \\ k_{\text{DMS}} \text{ tatsächlicher k-Faktor des DMS.} \end{array} \right\} \quad (6.3)$$

Die Angaben auf den DMS-Verpackungen für den k-Faktor gelten bei Raumtemperatur. Bei abweichender Temperatur ändert er sich je nach Messgitterwerkstoff in unterschiedlichem Maße. Für gebräuchliche Messgitterlegierungen sind die relativen k-Faktoränderungen bekannt (vgl. Bild 6.2) und können bei Planung oder Auswertung von Messungen berücksichtigt werden. Solange die Temperatur am Prüfobjekt während der Messung konstant ist, genügt ein Korrekturfaktor. Andernfalls muss zeitgleich zur Dehnungsmessung die Temperatur der Messstelle registriert werden, damit bei der Auswertung eine fortlaufende Korrektur möglich ist.

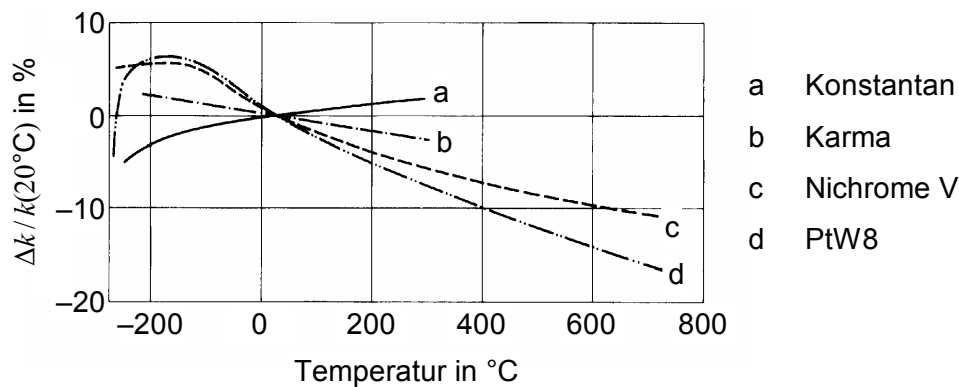


Bild 6.2: Temperaturabhängigkeit des k-Faktors für vier gebräuchliche Messgitterlegierungen.

Temperaturgang einer DMS-Messstelle

Unter dem Temperaturgang einer DMS-Messstelle versteht man die temperaturbedingte Veränderung des Messsignals bei konstanter mechanischer Belastung. Der Temperaturgang macht sich nur bemerkbar, wenn während der Messdauer die Temperatur des Prüfobjektes oder seiner Umgebung variiert. Er ist neben der Veränderung des k-Faktors durch weitere Faktoren bestimmt:

- Wärmedehnung des Prüfobjekts,
- Wärmedehnung des Messgitterwerkstoffs des DMS,
- Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes des Messgitterwerkstoffs,
- Temperaturgang der mit dem DMS in Serie geschalteten Anschlussleitungen.

Typischerweise besteht eine DMS-Messaufgabe darin, Dehnungen infolge Krafteinwirkung und die damit verbundenen mechanischen Spannungen zu erfassen. Temperaturänderungen verursachen zwar ebenfalls Werkstoffdehnungen, die aber im unbehinderten Objekt keine Spannungen erzeugen. Eine DMS-Messung ist aber unabhängig von der Ursache, die eine Dehnung des Prüfobjekts bewirkt, also unabhängig davon, ob es sich um eine mechanisch oder thermisch induzierte Dehnung (ε oder ε_g) handelt. Nur durch geeignete versuchstechnische Maßnahmen gelingt es, den Einfluss der Temperatur zu kompensieren oder den im Messsignal enthaltenen thermischen Dehnungsanteil so klein zu halten, dass er zu vernachlässigen ist.

Eine Möglichkeit hierfür stellt der „temperaturkompensierende DMS“ dar, der in einem begrenzten Temperaturbereich den Temperaturgang näherungsweise unterdrückt. Diese Eigenschaft erhält man, indem der Wärmedehnungskoeffizient des DMS an den des Bauteilwerkstoffes angepasst wird. Im Handel sind DMS erhältlich, die an die Temperaturgänge von Legierungen der Metalle Aluminium, Eisen und Titan angepasst sind (vgl. Bild 6.3).

Weitere Möglichkeiten zur Kompensation von Temperaturgängen bieten sich durch die Gestaltung geeigneter Messschaltungen, in die dann mehrere DMS einzubringen sind und die im folgenden Abschnitt 6.3 näher betrachtet werden. Damit kann auch die Wirkung großer Temperatureinflüsse vollständig unterdrückt werden.

Querempfindlichkeit

DMS sollten im Prinzip nur in Richtung ihrer Messachse mit einer Widerstandsänderung auf eine Dehnung reagieren. (Dabei ist die Messachse durch die Orientierung der Drähte oder der drahtähnlichen Leiterteile des Messgitters bestimmt.) Beansprucht man die Messstreifen

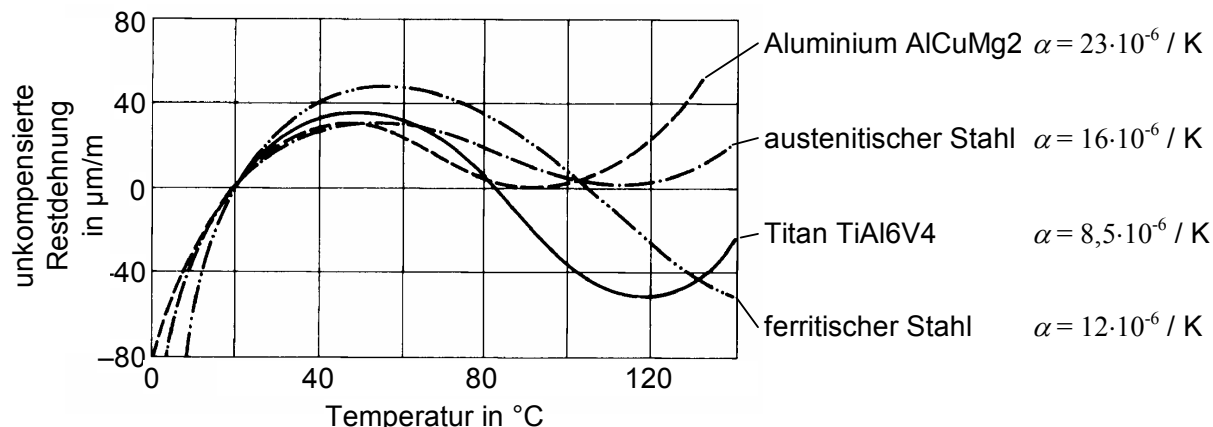


Bild 6.3: Temperaturgangreste von temperaturkompensierenden DMS bei optimaler Anpassung an die Wärmeausdehnungskoeffizienten verschiedener Werkstoffe.

hingegen quer dazu mit einer einachsigen Dehnung, dann findet man trotzdem einen, meist allerdings geringen Einfluss, welcher der „Querempfindlichkeit“ entspricht. Letztere ist definiert als der Quotient der beiden richtungsabhängigen k-Faktoren k_l und k_q längs und quer zur Messrichtung: $q = k_q / k_l$. Ursächlich sind dafür die Gitteranteile, die in den Umkehrzonen quer zur Messrichtung verlaufen (Bild 6.1). Bei DMS mit Folienmessgitter helfen konstruktive Maßnahmen, wie beispielsweise dicke Querbrücken, diesen Quereffekt zu vermindern. Die Querempfindlichkeit q nimmt mit steigender Messgitterlänge ab und ist meistens kleiner als 1%. Prinzipiell kann die Querempfindlichkeit Ursache für fehlerhafte Messungen sein. Wenn eine Messstelle aber angemessen kalibriert wird, wirkt sich q in den Ergebnissen nicht aus.

6.3 Messschaltungen

Die relativen Widerstandsänderungen bei Dehnungsmessungen mit DMS liegen in der Größenordnung von 10^{-4} bis 10^{-2} . Um sie möglichst genau zu erfassen, werden spezielle Messschaltungen verwendet, von denen die Wheatstonesche Brückenschaltung (Bild 6.4) am weitesten verbreitet ist.

6.3.1 Wheatstonesche Brückenschaltung und Messmethoden

Die folgenden Betrachtungen zur Wheatstoneschen Brückenschaltung gehen von der Voraussetzung aus, dass der Innenwiderstand der Speisespannungsquelle vernachlässigbar klein sowie der Eingangswiderstand des Messgerätes am Brückenausgang sehr hoch ist und diese somit keine störenden Belastungen der Brückenschaltungen verursachen.

Legt man an die beiden Brückenspeisepunkte 2 und 3 in Bild 6.4 eine Brückenspeisespannung U_B an, dann teilt sich diese in den beiden Brückenhälften R_1, R_2 und R_3, R_4 jeweils im Verhältnis der Brückenwiderstände auf. Die Differenz zwischen den Teilspannungen bei R_1, R_2 und R_3, R_4 ist die Brückenausgangsspannung U_A :

$$U_A = U_B \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right). \quad (6.4)$$

Definiert man U_A/U_B , also die relative Ausgangsspannung als „Brückenverstimmung“, dann folgt:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \quad (6.5)$$

Es gibt zwei typische Zustände, für welche $U_A = 0$ und damit die Brücke „abgeglichen“ ist:

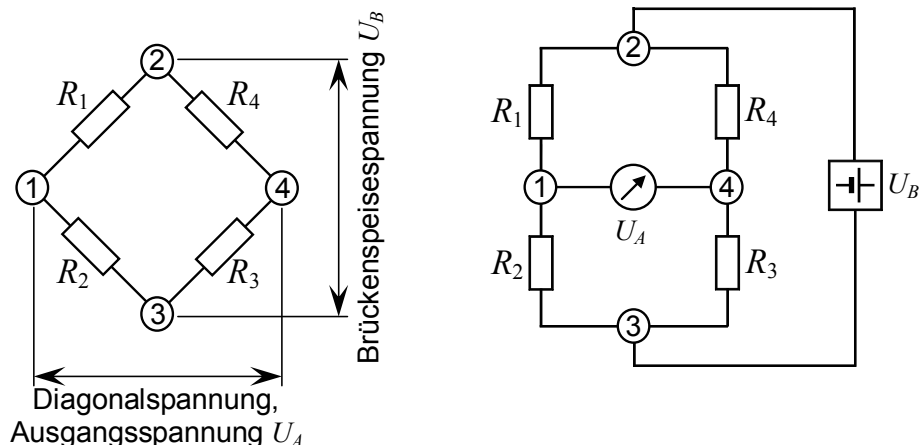


Bild 6.4: Wheatstonesche Brückenschaltung in unterschiedlicher Darstellung.

1. Alle Brückenwiderstände sind gleich groß, d.h. $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$.
2. Die Widerstandsverhältnisse der beiden Brückenhälften sind gleich, d.h. $R_1 / R_2 = R_4 / R_3$.

Ändern sich die Brückenwiderstände R_1 bis R_4 in ihrem Wert um die Beträge ΔR_1 bis ΔR_4 , dann wird die Brückenschaltung „verstimmt“ und zwischen den Punkten 1 und 4 ist eine Ausgangsspannung U_A messbar:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4}. \quad (6.6)$$

Da in der DMS-Technik die Beträge der Widerstandsänderungen normalerweise sehr klein sind, kann nachstehende Näherungsgleichung (6.7) verwendet werden, die für $R_1 = R_2$ und $R_3 = R_4$ aus Gleichung (6.6) durch Linearisierung entsteht. Sie zeigt, dass die *relative* Widerstandsänderung jedes Brückenzeigs für die Brückenverstimmung wesentlich ist und nicht die absolute:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (6.7)$$

Das Auftreten der relativen Widerstandsänderungen mit unterschiedlichem Vorzeichen ist eine wichtige Eigenschaft der Wheatstoneschen Brückenschaltung. Damit ist es möglich, die für die jeweiligen Brückenzeigs maßgeblichen Effekte zu addieren oder zu subtrahieren, wobei folgende Regeln gelten:

- Gleichsinnige Widerstandsänderungen in *benachbarten* Brückenzeigs *subtrahieren* sich (d.h. R_1 und R_2 ; R_2 und R_3 ; R_3 und R_4 ; R_4 und R_1).
- Gleichsinnige Widerstandsänderungen in *gegenüberliegenden* Brückenzeigs *addieren* sich (d.h. R_1 und R_3 ; R_2 und R_4).
- Gegensinnige Widerstandsänderungen in *benachbarten* Brückenzeigs *addieren* sich (d.h. R_1 und R_2 ; R_2 und R_3 ; R_3 und R_4 ; R_4 und R_1).

Mit Hilfe der Proportionalitätsbeziehung zwischen der relativen Widerstandsänderung und der Dehnung (Gleichung (6.1)) ergibt sich schließlich unter der Voraussetzung, dass alle vier Widerstände DMS mit dem gleichen k-Faktor repräsentieren:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad (6.8)$$

Der Quotient U_A/U_B wird auch als „Brückenempfindlichkeit“ bezeichnet und als ein Maß für die Größe der Ausgangsspannung infolge einer Einheitsdehnung an der Messstelle benutzt.

Die Gleichungen (6.6) bis (6.8) gehen allerdings davon aus, dass sich alle Widerstände der Brücke ändern. In der Versuchstechnik trifft das nur in Sonderfällen zu. Oft ist lediglich ein Teil der Brückenarme mit DMS besetzt, der Rest wird durch Ergänzungswiderstände gebildet. An sie sind zum Ausschluss von Störungen hohe Anforderungen hinsichtlich zeitlicher Stabilität und Temperaturgang zu stellen, die von Metallschichtwiderständen gut erfüllt werden. Anstelle dieser passiven Widerstände können auch Kompensations-DMS als Brückenergänzungswiderstände benutzt werden (siehe Abschnitt 6.3.2).

In der messtechnischen Praxis sind nun vier Varianten der Wheatstoneschen Brückenschaltung gebräuchlich. Sie unterscheiden sich gemäß Tabelle 6.1 und Bild 6.5 durch die Zahl von „aktiven“ DMS und „passiven“ Ergänzungswiderständen sowie durch deren Anordnung in den Brückenarmen.

Weiterhin zeigt Gleichung (6.8) zwei wichtige Eigenschaften der Brückenschaltung auf:

1. Je größer die Speisespannung U_B ist, desto größer ist die Brückenausgangsspannung U_A . (Die Grenze von U_B ist im Allgemeinen durch die Temperaturbelastbarkeit der DMS vorgegeben, denn je nach Wärmeleitfähigkeit des Prüfobjektes verursachen zu hohe Speisespannungen und damit zu hohe elektrische Ströme eine übermäßige Eigen erwärmung der Messstreifen und damit erhebliche Fehler.)
2. Unerwünschte Dehnungssignale in einem DMS (z.B. durch den Temperaturgang) lassen sich eliminieren, wenn man einen zweiten DMS appliziert, welcher der gleichen Störgröße unterworfen ist, ihn aber in einen benachbarten Brückenarm schaltet. Man erreicht damit eine Kompensation, da sich Änderungsbeträge mit gleichem Vorzeichen in benachbarten Brückenarmen subtrahieren (vgl. die Halbbrücke in Bild 6.5).

Zur Messung der Brückenausgangsspannung U_A sind zwei Techniken gebräuchlich: Die Ausschlagsmethode und die Nullmethode, wobei erstere das Standardverfahren darstellt. Bei der Ausschlagsmethode wird die Brücke vor Versuchsbeginn abgeglichen, d.h. $U_A = 0$ eingestellt. Mit der Belastung ändert sich die Dehnung und proportional dazu U_A . Die Null- oder Kompensationsmethode setzt voraus, dass die Brückenergänzungswiderstände einstellbar sind. Wenn sich in der abgeglichenen Brückenschaltung infolge eines DMS eine Diagonalspannung einstellt, dann verändert man den Wert eines Ergänzungswiderstands R_{Erg} solange, bis die Bedingung $U_A = 0$ wieder erfüllt ist. Das unbekannte ΔR_{DMS} kann somit an dem bekannten ΔR_{Erg} abgelesen werden. Da sich diese Methode aber nur für statische Untersuchungen eignet, wird sie kaum noch angewandt.

6.3.2 Kompensation und Brückenfaktor

Die charakteristische Eigenschaft der Wheatstoneschen Brückenschaltung, Widerstandsänderungen zu subtrahieren oder zu addieren, lässt sich in zweifacher Hinsicht nutzen:

Tabelle 6.1: Varianten der Wheatstoneschen Brückenschaltung bei DMS-Messungen.

Brückenschaltung	Anzahl DMS	Anzahl Ergänzungswiderstände
Viertelbrücke	1	3
Halbbrücke	2	2
Zweiviertel- oder Diagonalbrücke	2	2
Vollbrücke	4	0

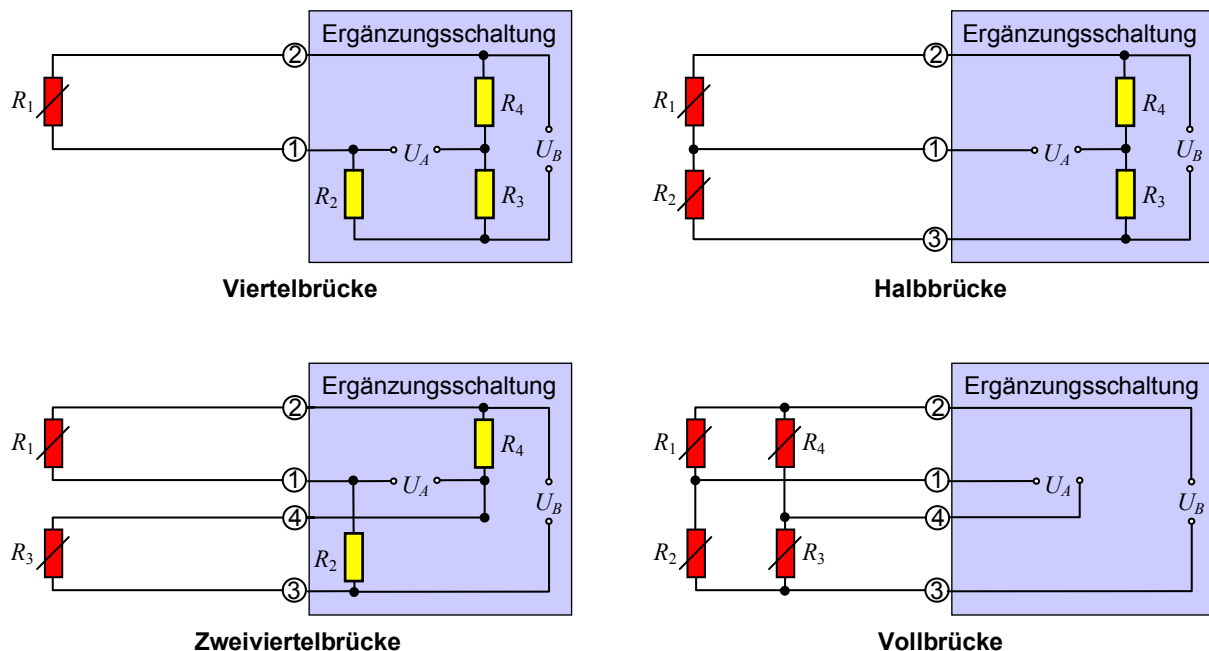


Bild 6.5: Anwendungsformen der Wheatstoneschen Brückenschaltung bei DMS-Messungen.

1. Wie bereits erwähnt, die Elimination unerwünschter Störgrößen (Kompensation).
2. Vervielfachen der Brückenausgangsspannung (Steigerung der Brückenempfindlichkeit).

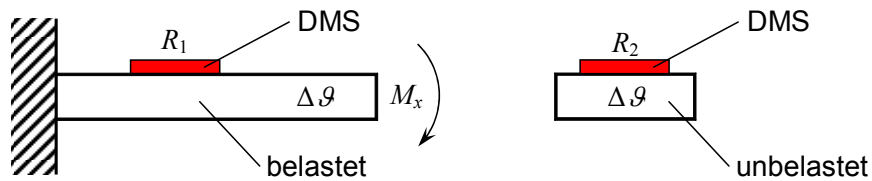
Zur Veranschaulichung des zweiten Punkts dient unter Abwandlung von Gleichung (6.8) der so genannte Brückenfaktor B , der für die eingeführten vier Fälle der Brückenschaltung in Tabelle 6.2 weiter aufgeschlüsselt ist:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad \leftrightarrow \quad \frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot \varepsilon \quad (6.9)$$

Die Realisierung der angegebenen Dehnungsfälle hängt von der Art des Prüfobjektes, vom Belastungsfall und nicht zuletzt von der messtechnischen Aufgabenstellung ab. In der folgenden Bildern 6.6 bis 6.9 sind vier typische Beispiele angeführt, auf welche Weise sowohl eine Kompensation von Störgrößen (d.h. $B = 0$) als auch eine Vervielfachung der Ausgangsspannung zu erreichen ist. Zugleich geben diese Fälle einen Eindruck über den grundsätzlichen Aufbau von Kraft- oder Drehmomentenmessdosen (vgl. auch Bild 3.2.13).

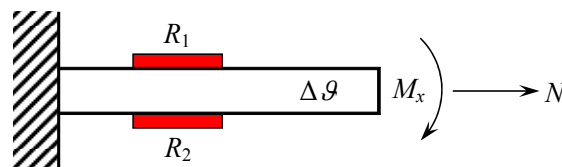
Tabelle 6.2: Brückenfaktor B für die vier Varianten der Wheatstoneschen Brückenschaltung.

Variante	Brückenschaltung	Dehnungsfall	B
1	Viertelbrücke	$\varepsilon = \varepsilon_1 \neq 0$ $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0$	1
2	Halbbrücke	$\varepsilon = \varepsilon_1 = -\varepsilon_2 \neq 0$ $\varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0$	2
3	Zweiviertelbrücke	$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_3 \neq 0$ $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = 0$	2
4	Vollbrücke	$\varepsilon = \varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 \neq 0$	4



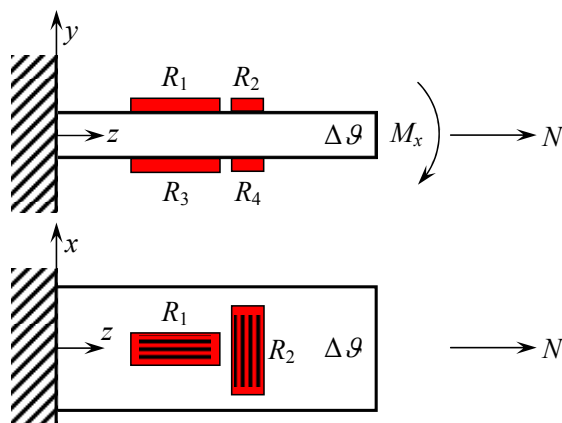
Einflussgröße	Widerstandsänderung (Vorzeichen):		Einfluss auf U_A (Vorzeichen):		B
	R_1	R_2	R_1	R_2	
M_x	+	0	+	0	1
Δg	+	+	+	-	0

Bild 6.6: Beispiel 1 – Biegebalken mit störender Temperaturänderung.



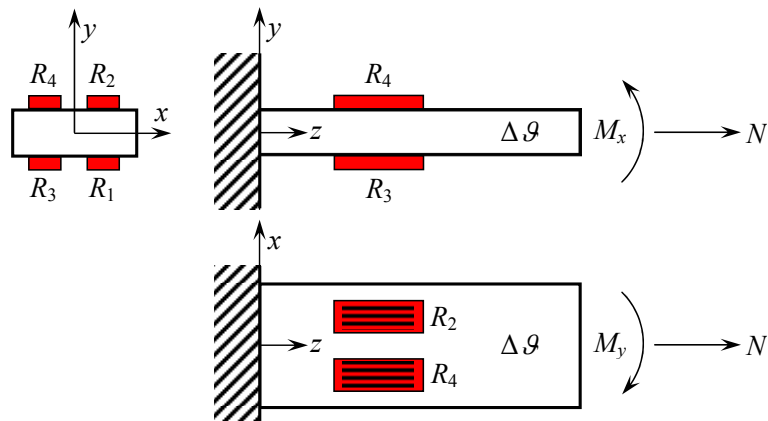
Einflussgröße	Widerstandsänderung (Vorzeichen):		Einfluss auf U_A (Vorzeichen):		B
	R_1	R_2	R_1	R_2	
M_x	+	-	+	+	2
N	+	+	+	-	0
Δg	+	+	+	-	0

Bild 6.7: Beispiel 2 – Biegebalken mit störender Temperaturänderung und störender Normalkraft.



Einflussgröße	Widerstandsänderung (Vorzeichen):				Einfluss auf U_A (Vorzeichen):				B
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4	
N	+	-	+	-	+	+	+	+	$2(1+\nu)$
M_x	+	-	-	+	+	+	-	-	0
Δg	+	+	+	+	+	-	+	-	0

Bild 6.8: Beispiel 3 – Zug-/Druckstab mit störender Temperaturänderung und störendem Biegemoment (ν Querdehnungszahl).



Einflussgröße	Widerstandsänderung (Vorzeichen):				Einfluss auf U_A (Vorzeichen):				B
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4	
M_x	+	-	+	-	+	+	+	+	4
M_y	+	+	-	-	+	-	-	+	0
N	+	+	+	+	+	-	+	-	0
$\Delta \theta$	+	+	+	+	+	-	+	-	0

Bild 6.9: Beispiel 4 – Biegebalken mit störender Temperaturänderung, störender Normalkraft und störendem Biegemoment M_y .

6.4 Kalibrierung

Die Messkette *DMS – Brückenschaltung – Verstärker* wandelt die nichtelektrische Messgröße Dehnung in eine elektrische Spannung um. Zwischen den beiden Größen besteht folgender Zusammenhang:

$$\text{Dehnung} = \text{Kalibrierfaktor} \cdot \text{gemessene elektrische Spannung} . \quad (6.10)$$

Die quantitative Zuordnung zwischen Ausgang und Eingang der Messkette wird somit durch den Kalibrierfaktor hergestellt, der sich aus einem Kalibriervorgang ergibt:

$$\text{Kalibrierfaktor} = \frac{\text{bekannte, vorgegebene Dehnung}}{\text{gemessene Ausgangsspannung}} . \quad (6.11)$$

In der DMS-Technik ist eine direkte Art der Kalibrierung nicht möglich, da sich eine Dehnung als Referenzwert für die Bestimmung des Kalibrierfaktors nur sehr schwer erzeugen lässt. Stattdessen finden andere Verfahren Anwendung:

- Kalibrieren mit einem vom Messverstärker gelieferten Signal,
- Kalibrieren mit einem Kalibriergerät,
- direkte Nebenschlusskalibrierung (Shunt-Kalibrierung).

Verstärkereigenes Kalibriersignal

Einige Messverstärker enthalten Einrichtungen, mit denen ein definiertes Signal in den Messkreis eingespeist werden kann. Der Betrag des Kalibriersignals kann entweder im Dehnungsmaß $\mu\text{m}/\text{m}$ oder in Brückenverstimmung mV/V angegeben sein. Da die Einspeisung erst am Verstärkereingang erfolgt, bezieht sich der gewonnene Kalibrierfaktor nicht auf die gesamte Messkette sondern nur auf den Verstärkerteil ohne DMS und Zuleitungen.

Kalibriergerät

Um bei der Kalibrierung den Einfluss der Zuleitungen von der Messstelle zur Brücke zu erfassen, den die erste Kalibrierart unberücksichtigt lässt, kann man anstelle des DMS ein im Handel erhältliches Kalibriergerät in die Messkette einfügen. Derartige Geräte simulieren Dehnungsänderungen durch Widerstandsänderungen. Sie sind auf Standard-Widerstandswerte (z.B. 120 Ω) festgelegt und erlauben die Vorgabe einzelner Stufen durch einfaches Umschalten. Eine Messreihe, bei der zu vorgewählten Widerstandsänderungen (also Schalterstellungen) die zugehörigen Verstärkerausgangsspannungen registriert werden, liefert hier die Basis zur Bestimmung des Kalibrierfaktors, beispielsweise mittels linearer Regression. Dieser ist eventuell noch zu korrigieren, wenn nämlich der k-Faktor des DMS nicht mit dem des Kalibriergerätes von $k = 2,00$ übereinstimmt. Nach der Kalibrierung wird das Gerät aus der Messkette entfernt und der DMS angeschlossen.

Nebenschlusskalibrierung

Auch diese Kalibrierung arbeitet mit Widerstandsänderungen zur Simulation von Dehnungen. Sie erfolgt aber direkt am DMS durch Parallelschaltung von genau bekannten Widerständen R_p (Bild 6.10).

Die Brückenverstimmung für eine Viertelbrücke ist nach Gleichungen (6.7) und (6.8):

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{1}{4} \cdot k \cdot \varepsilon. \quad (6.12)$$

Die Parallelschaltung eines Widerstandes R_p zum DMS-Widerstand R_1 ergibt einen resultierenden Widerstand R_r , und daraus berechnet sich eine Widerstandsänderung von $\Delta R_1 = R_r - R_1$. Diese erzeugt einen Messwert U_{Ap} am Verstärkerausgang und entspricht einer Stauchung ε_p . Aus dem mittels ΔR_1 simulierten Wert ε_p und der gemessenen Ausgangsspannung U_{Ap} berechnet sich dann der Kalibrierfaktor KF , der nur für die bei der Kalibrierung eingestellte Speisespannung U_B gilt:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{R_1} \cdot \left(\frac{R_1 R_p}{R_1 + R_p} - R_1 \right) = \frac{1}{k} \cdot \frac{-R_1}{R_1 + R_p}, \quad (6.13)$$

$$KF = \frac{\varepsilon_p}{U_{Ap}}. \quad (6.14)$$

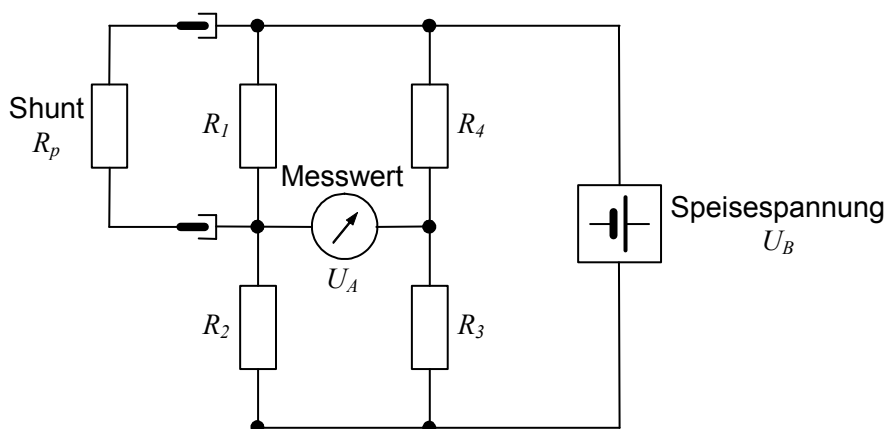


Bild 6.10: Prinzip der Shunt-Kalibrierung.

6.5 Fehlereinflüsse

Genaue und zuverlässige Messungen mittels DMS-Technik sind auch bei sorgfältiger Kalibrierung nur dann möglich, wenn Messfehler vermieden werden. Das gelingt, wenn man die Vielzahl von Fehlereinflüssen kennt und die empfohlenen Maßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung von Störungen genau beachtet. An dieser Stelle sei nur eine Übersicht gegeben (Tabelle 6.3), bezüglich Einzelheiten wird auf eine umfangreiche Fachliteratur verwiesen.

Besondere Aufmerksamkeit verlangt die Kompensation von Temperatureinflüssen. Dabei ist die bereits dargestellte Anwendung einer geeigneten Brückenschaltung das wichtigste Mittel, um temperaturinduzierte Dehnungen von mechanisch verursachten Dehnungen zu trennen. Vor allem bei Langzeitmessungen spielen Temperatureinflüsse auf die Messstelle und auf die Messbrücke eine herausragende Rolle. Sie erfordern oftmals ebenso ausgeklügelte Maßnahmen bei der DMS-Applikation und -Verdrahtung wie den Einsatz temperaturunempfindlicher Messverstärker mit hoher zeitlicher Stabilität von Nullpunkt und Verstärkung.

Tabelle 6.3: Fehlermöglichkeiten bei DMS-Messungen.

Störquelle	Fehlerursachen
Applikation	Auswahl nicht geeigneter DMS-Typen oder Klebstoffe, schlechte Applikation, kalte Lötstellen, mangelnde Isolation
Temperatur	keine temperaturkompensierte Brückenschaltung, ungleichmäßige Verteilung oder Änderung, große Änderungsgeschwindigkeit
Anschlusskabel	Kabelwiderstand und Kabelkapazität, Isolation und Abschirmung
Grenzwerte	Überschreitung der für einen Typ zulässigen Werte für Dehnbarkeit, Temperaturbereich, Schwingspielzahl
Umgebung	Druck, Vakuum, Feuchtigkeit, Chemikalien, elektrische und magnetische Felder, Strahlung
Bauteil	Inhomogenitäten, Risse, Oberflächenkrümmung, anisotrope / rheologische Eigenschaften

6.6 Spannungsermittlung

Die Applikation von DMS an der Oberfläche von Prüfobjekten hat zur Folge, dass sich diese Art der Dehnungsmessung im Allgemeinen auf zweidimensionale, ebene Spannungszustände beschränkt („ $\sigma_3 = 0$ “). Damit sich dabei allerdings die entsprechenden Spannungsgrößen aus den Messsignalen zuverlässig ermitteln lassen, müssen bezüglich der Werkstoffeigenschaften des untersuchten Objektes grundsätzlich mehrere Voraussetzungen gegeben sein:

- homogener Aufbau ohne Diskontinuitäten oder Fehlstellen,
- Isotropie (E-Modul E und Querdehnungszahl ν sind richtungsunabhängig),
- linear-elastisches Verhalten im gemessenen Dehnungsniveau.

Sind diese Bedingungen erfüllt, dann lassen sich mit Hilfe des verallgemeinerten Hookschen Gesetzes (aus der Festigkeitslehre bzw. Elastizitätstheorie) die Hauptspannungen σ_1 und σ_2 aus den Hauptdehnungen ε_1 und ε_2 berechnen:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2) \quad ; \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu \cdot \varepsilon_1). \quad (6.15)$$

Die messtechnische Aufgabe besteht somit primär darin, die Dehnungen an einem oder mehreren Punkten der Oberfläche zu messen und daraus die Hauptdehnungen oder – bei genügend großer Zahl von Messstellen – die Hauptdehnungsfelder zu ermitteln. Dafür finden so genannte DMS-Rosetten (Bild 6.11) Anwendung, bei denen mehrere Messgitter neben- oder übereinander auf einem gemeinsamen Träger aufgebracht sind.

Handelsübliche DMS-Rosetten unterscheiden sich durch die Gitterlängen sowie durch die Anordnung und Orientierung der Einzelstreifen. Bei rechtwinkligen oder 90°-Rosetten sind zwei Streifen unter 90° zueinander angeordnet, während ein dritter Streifen (sofern vorhanden) in die Richtung der Winkelhalbierenden unter 45° zeigt. Bei 120°- oder Delta-Rosetten sind die drei Streifen um jeweils 120° gegeneinander verdreht (Bild 6.11).

Die Applikation erfolgt so, dass beispielsweise eine Rosette mit zwei rechtwinkligen Messachsen und einem dritten Einzelstreifen in „45°-Richtung“ am objektfesten xy -Koordinatensystem orientiert ist. Anhand der gemessenen Dehnungen ε_x , ε_y und ε_{45} können mit Hilfe des Mohrschen Dehnungskreises die Hauptdehnung ε_1 und ε_2 sowie der Winkel φ zwischen den Richtungen von ε_x und ε_1 bestimmt werden (Bild 6.12):

$$\tan 2\varphi = \frac{\frac{\gamma_{xy}}{2}}{\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y - 2\varepsilon_{45}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}, \quad (6.16)$$

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_{45})^2}.$$

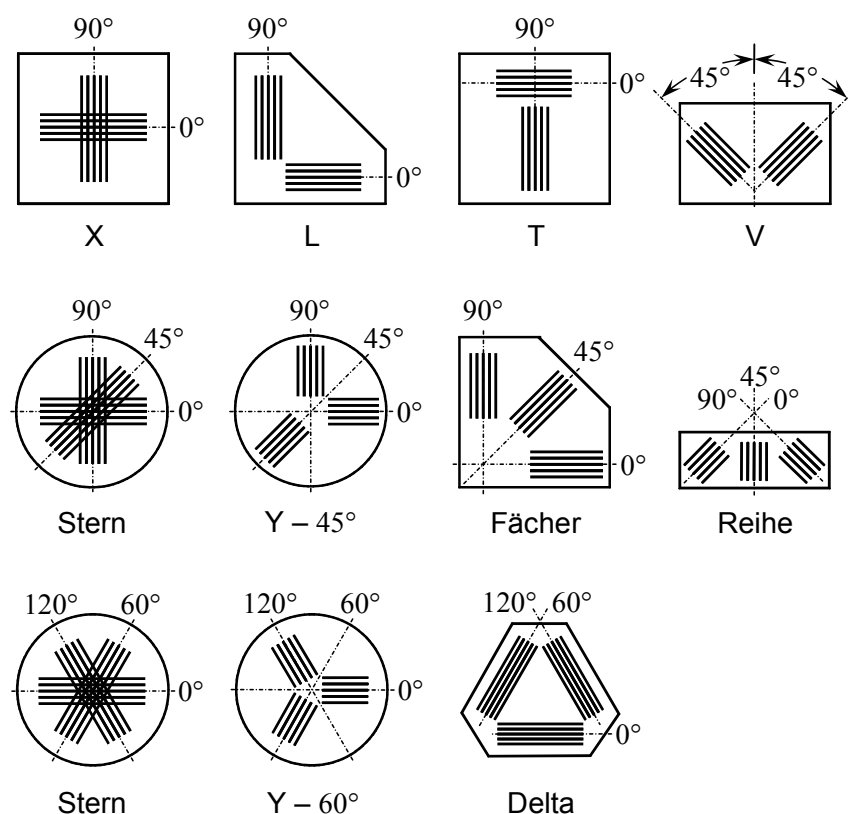


Bild 6.11: Formen typischer DMS-Rosetten.

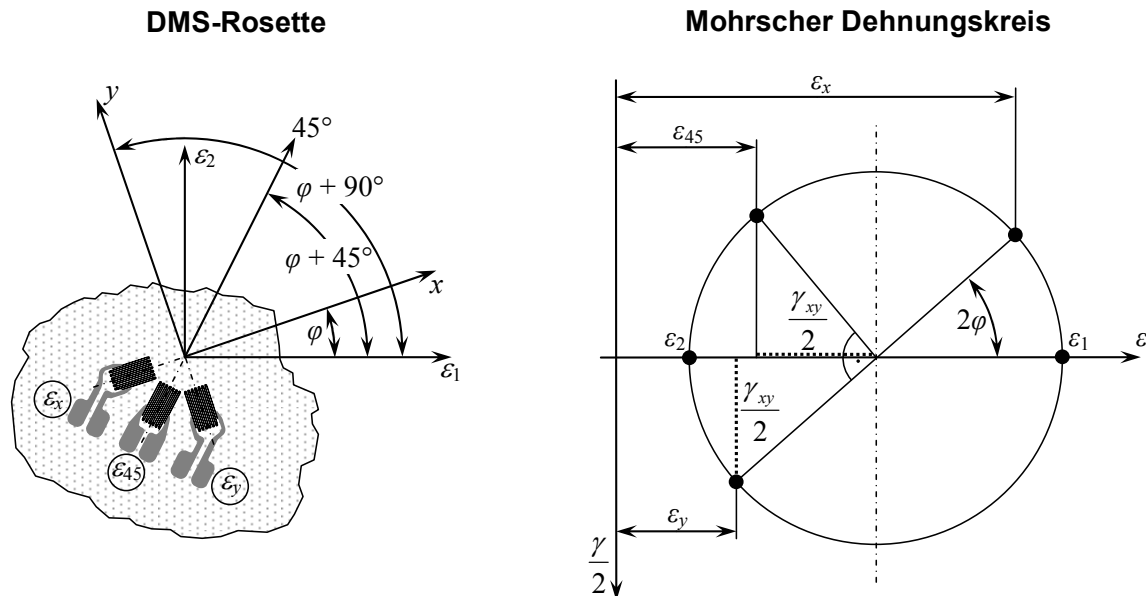


Bild 6.12: Ermittlung von Hauptdehnungen.

Der direkte Zusammenhang zwischen Hauptspannungen, Schubspannung und den gemessenen Dehnungen ergibt sich aus folgenden Beziehungen, die aus dem Einsetzen von Gleichungen (6.16) in (6.15) entstehen:

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2} \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{1-\nu} \pm \frac{\sqrt{2}}{1+\nu} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_y)^2} \right) \quad ; \quad \tau_{xy} = G\gamma_{xy} = 2G \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \varepsilon_{45} \right). \quad (6.17)$$

Grundsätzlich ist zu beachten, dass mit einem DMS eine Dehnung an einem einzelnen *Punkt* der Objektoberfläche nicht messbar ist. Das Messergebnis wird immer ein Mittelwert der Teilfläche sein, die das Messgitter überdeckt. Bei großen Dehnungsgradienten müssen folglich DMS mit kurzen Messgitterlängen zum Einsatz kommen und die Abstände von mehreren DMS möglichst klein gehalten werden. Diese Forderung ist beispielsweise durch DMS-Ketten realisierbar, bei denen eine Serie von Messelementen auf einem gemeinsamen Träger untergebracht ist (Bild 6.13). Der Dehnungsgradient im Bereich einer Messstelle ist auch ausschlaggebend für Auswahl des Typs einer DMS-Rosette (DMS nebeneinander oder übereinander angeordnet).

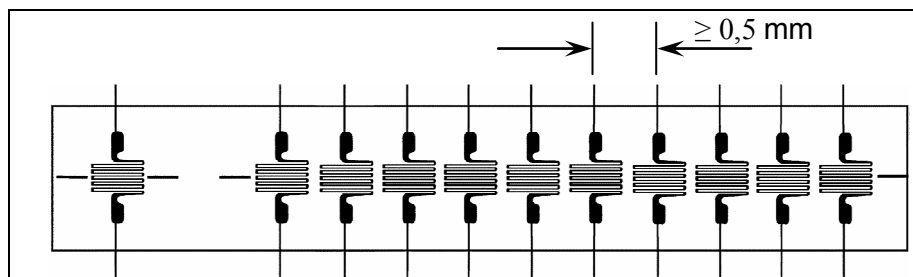


Bild 6.13: Typische DMS-Kette.