

Karl Hoffmann

# Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen



<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
1	<b>Einleitung</b> ..... 1
1.0.1	Metallische DMS ..... 2
1.0.2	Halbleiter-DMS ..... 8
1.0.3	Aufgedampfte DMS (Dünnschicht-DMS) ..... 9
1.0.4	Kapazitive DMS ..... 10
1.0.5	Piezoelektrische DMS ..... 11
1.0.6	Spannungsoptische DMS ..... 11
1.0.7	Mechanische DMS ..... 12
1.0.8	Andere Systeme ..... 12
1.1	Das physikalische Wirkungsprinzip der Dehnungsmessstreifen . 13
1.1.1	Metallische DMS ..... 13
1.1.2	Halbleiter-DMS (HL-DMS) ..... 15
1.2	Die Messkette ..... 17
2	<b>In der DMS-Technik gebräuchliche Begriffe und Maßeinheiten</b> ..... 19
2.1	Die Dehnung; Definition und Maßeinheit ..... 19
2.1.1	Absolute Längenänderung ..... 19
2.1.2	Relative Längenänderung oder Dehnung ..... 21
2.1.3	Die Maßeinheit der Dehnung [2-1] ..... 21
2.2	Die mechanische Spannung; Definition und Maßeinheit ..... 23
2.2.1	Normalspannungen ..... 24
2.2.2	Schub- oder Scherspannungen ..... 25
2.2.3	Eigenstressen, Wärmespannungen ..... 28
2.2.4	Spannungszustände ..... 28
2.3	Werkstoffkennwerte ..... 29
2.3.1	Der Elastizitätsmodul, Definition und Maßeinheit ..... 29
2.3.2	Der Gleit- oder Schubmodul ..... 33
2.3.3	Die Poissonzahl ..... 33
2.3.4	Die thermische Längenausdehnung ..... 35
2.4	Beanspruchungsarten der DMS ..... 37
2.4.1	Statische Messungen (nullpunktbezogen) ..... 37
2.4.2	Quasistatische Messungen ..... 38
2.4.3	Dynamische Messungen (nicht-nullpunktbezogen) ..... 38
3	<b>Der Dehnungsmessstreifen, Auswahlkriterien</b> ..... 39
3.1	Anwendungsbereiche ..... 41
3.1.1	Spannungsanalyse, Modellmesstechnik, Biomechanik ..... 41
3.1.2	Messgrößenaufnehmerbau ..... 42
3.2	Bauformen der DMS ..... 42

3.2.1	Messgitterlänge .....	43
3.2.1.1	Homogenes Dehnungsfeld .....	43
3.2.1.2	Inhomogenes Dehnungsfeld .....	45
3.2.1.3	Dynamische Dehnungszustände .....	48
3.2.2	Mehrfach-DMS, ihre Vorteile und Anwendungsgebiete .....	48
3.2.2.1	DMS-Ketten zur Ermittlung von Spannungsgradienten .....	48
3.2.2.2	DMS-Rosetten zur Ermittlung zweiachsiger Spannungszustände	51
3.2.2.3	DMS-Rosetten für Eigenspannungsuntersuchungen .....	52
3.2.3	Spezial-DMS .....	56
3.2.3.1	Anschweissbare DMS .....	56
3.2.3.2	Freigitter-DMS, Hochtemperatur-DMS .....	56
3.2.3.3	Anschweissbare Hochtemperatur-DMS .....	57
3.2.4	Der elektrische Widerstand .....	58
3.2.5	Der nutzbare Temperaturbereich .....	59
3.3	Technische Daten .....	60
3.3.1	Die Dehnungsempfindlichkeit ( $k$ -Faktor) metallischer DMS ..	61
3.3.2	Die Dehnungsempfindlichkeit der Halbleiter-DMS .....	62
3.3.3	Die Querempfindlichkeit .....	64
3.3.4	Der Temperaturgang einer DMS-Messstelle .....	68
3.3.4.1	Selbst-temperaturgangkompensierende DMS .....	70
3.3.4.2	Thermische Drift .....	76
3.3.5	Die Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit .....	77
3.3.6	Die statische Dehnbarkeit .....	78
3.3.7	Die dynamische Dehnbarkeit .....	81
3.3.7.1	Das Dauerschwingverhalten .....	81
3.3.7.2	Die Grenzfrequenz .....	85
3.3.8	Die elektrische Belastbarkeit .....	91
3.3.9	Das Kriechen .....	92
3.3.10	Die mechanische Hysterese .....	99
3.4	Umwelteinflüsse .....	102
3.4.1	Temperatur .....	103
3.4.2	Feuchtigkeit .....	103
3.4.3	Hydrostatischer Druck .....	104
3.4.4	Vakuum .....	110
3.4.5	Energiereiche Strahlung (ionisierende Strahlung) .....	113
3.4.5.1	Die Einwirkung ionisierender Strahlung auf DMS-Messstellen	115
3.4.6	Magnetische Felder .....	118
3.4.7	Lagerung .....	121
4	<b>Applikationsmittel für Dehnungsmessstreifen</b> .....	123
4.1	Befestigungsmittel .....	123
4.2	Applikations-Hilfsmittel .....	128
4.2.1	Reinigungsmittel .....	128

4.2.2	Lötmittel .....	129
4.2.2.1	Lötgerät .....	129
4.2.2.2	Lote und Flussmittel .....	130
4.2.3	Anschlussmittel .....	132
4.2.3.1	Lötstützpunkte .....	132
4.2.3.2	Leitungsmaterial .....	133
4.2.4	Prüfmittel .....	135
4.2.4.1	Visuelle Inspektion .....	135
4.2.4.2	Durchgangswiderstand .....	135
4.2.4.3	Isolationswiderstand .....	136
4.3	Mittel zum Messstellenschutz .....	138
5	<b>Die Wheatstone'sche Brückenschaltung</b> .....	145
5.1	Das Schaltbild der Wheatstone'schen Brücke .....	145
5.2	Die Wirkungsweise der Wheatstone'schen Brückenschaltung ..	146
5.3	Brückenspeisung und Verstärkung der Brücken- Ausgangsspannung .....	152
6	<b>Das Kalibrieren einer Messeinrichtung</b> .....	155
6.1	Die Wirkungsweise der Abgleich- und Kalibriereinrichtungen eines Messverstärkers .....	157
6.2	Das Kalibrieren mit dem vom Messverstärker gelieferten Kalibriersignal .....	161
6.3	Die Nebenschluss(Shunt-)Kalibrierung .....	162
6.4	Kalibrierung mit einem Kalibriergerät .....	165
6.5	Berücksichtigung eines von Nährungswert 2 abweichenden $k$ -Faktors .....	168
7	<b>Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Messfehlern</b> .....	171
7.1	Temperaturgangkompensation .....	173
7.1.1	Temperaturgangkompensation bei einfacher Viertelbrückenschaltung .....	174
7.1.2	Temperaturgangkompensation einer Viertelbrücke in Dreileiterschaltung .....	176
7.1.3	Temperaturgangkompensation einer Viertelbrücke mit Kompensations-DMS .....	178
7.1.4	Temperaturgangkompensation bei der Zweiviertel- oder Diagonalbrücke .....	180
7.1.5	Temperaturgangkompensation bei der Halbbrückenschaltung ..	181
7.1.6	Temperaturgangkompensation bei der Vollbrückenschaltung ..	182
7.2	Der Einfluss der Leitungswiderstände .....	183
7.2.1	Einfache Viertelbrückenschaltung .....	184

7.2.2	Viertelbrücke in Dreileiterschaltung	187
7.2.3	Viertelbrücke mit Kompensations-DMS	188
7.2.4	Zwei Viertel- oder Diagonalbrücke	189
7.2.5	Halbbrückenschaltung	190
7.2.6	Vollbrückenschaltung	190
7.2.7	Fehlerkorrektur mit dem $k$ -Faktor-Wähler	192
7.3	Eliminierung der Kabeleinflüsse durch spezielle Messgeräte-Schaltungen	193
7.3.1	Die HBM-Brücke (Kreuzerschaltung)	193
7.3.2	Die Sechseleierschaltung	196
7.4	Der Einfluss der Kabelkapazitäten	197
7.4.1	Kapazitive Unsymmetrie	199
7.4.2	Die Phasendrehung	203
7.5	Korrektur der Querempfindlichkeit der DMS	204
7.5.1	Korrekturen für einzelne Messgitter	206
7.5.2	Korrekturen für DMS-Rosetten	216
7.5.2.1	X-Rosetten $0^\circ/90^\circ$	212
7.5.2.2	R-Rosetten $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ und $0^\circ/60^\circ/120^\circ$	214
<b>8</b>	<b>Das Hooke'sche Gesetz zur Ermittlung von Werkstoff- spannungen aus Dehnungsmessungen</b>	<b>216</b>
8.1	Der einachsige Spannungszustand	216
8.2	Der zweiachsige Spannungszustand	220
8.2.1	Der zweiachsige Spannungszustand mit bekannten Hauptrichtungen	220
8.2.2	Der zweiachsige Spannungszustand mit unbekanntem Hauptrichtungen	223
8.2.2.1	Messungen mit der $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ -Rosette	224
8.2.2.2	Messungen mit der $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ -Rosette	225
8.2.2.3	Die Bestimmungen der Hauptrichtungen	225
8.2.2.4	Andere Möglichkeiten zur Ermittlung der Hauptnormal- spannungen und deren Richtungen	228
8.2.3	Der Mohr'sche Spannungskreis	228
8.3	Ermittlung von Eigenspannungen nach dem Bohrlochverfahren	232
8.4	Dehnungsmessungen und Spannungsanalysen für unterschiedliche Lastfälle	235
8.4.1	Messungen an einem Zug-/Druck-Stab	236
8.4.2	Messungen an einem Biegestab	239
8.4.3	Messungen an einem mit Normalkraft und Biegemoment beanspruchten Stab mit symmetrischem und asymmetrischem Querschnitt	242
8.4.4	Messungen an einem Torsionsstab (Verdrehstab)	249
8.4.4.1	Zur Übertragung des Messsignals von rotierenden Wellen	253

8.4.5	Messungen an einem mit Normalkraft und Biegemoment überlagerten Torsionsstab . . . . .	257
8.4.6	Messungen am Scherstab . . . . .	259
8.4.7	Messung von Wärmespannungen . . . . .	262
8.4.7.1	Vergleich zweier Messungen am freien und eingespannten Objekt . . . . .	264
8.4.7.2	Messungen mit einem Kompensationsstück . . . . .	265
8.4.7.3	Separate oder nachträgliche Ermittlung des Temperaturgangs .	265
9	<b>Betrachtungen zur Messgenauigkeit</b> . . . . .	266
9.1	Ursachen für Messabweichungen . . . . .	267
9.2	Rechnerische Erfassung der Zufallsstreuung von Messwerten einer Messreihe . . . . .	268
9.2.1	Versuchsvoraussetzungen . . . . .	268
9.2.1.1	Die Gauß-Verteilung . . . . .	269
9.2.2	Arithmetischer Mittelwert . . . . .	271
9.2.3	(Empirische) Standardabweichung $s$ und Variationskoeffizient $\nu$	271
9.2.4	Vertrauensgrenze und Vertrauensbereich für den Erwartungswert $\mu$ . . . . .	272
9.2.5	Messunsicherheit $u$ . . . . .	275
10	<b>Schrifttum</b> . . . . .	276
11	<b>Stichwortverzeichnis</b> . . . . .	288
	<b>Verzeichnis der Tafeln</b> . . . . .	292

## **1 Einleitung**

Die übliche Art, Teile von Maschinen, Bauwerken, Fahrzeugen, Flugzeugen u. dgl. (allgemein gesprochen: von Bauteilen) zu bemessen, basiert auf der Festigkeitsrechnung.

Diese Methode befriedigt, solange die Bauteilbelastung nach Art und Betrag bekannt ist. Probleme ergeben sich insbesondere dort, wo die Belastung unbekannt ist oder nur näherungsweise abgeschätzt werden kann. Früher begegnete man der Gefahr einer Überlastung durch Sicherheitszuschläge, d. h. durch Überdimensionierung. Moderne Entwurfsstrategien verlangen jedoch weitgehende Werkstoffeinsparung, teils aus Kostengründen, teils zur Gewichtsreduzierung. Um dennoch den Forderungen nach Sicherheit und ausreichender Lebensdauer der Bauteile zu genügen, muss man die Werkstoffbeanspruchung kennen. Dazu sind Messungen unter Betriebsbedingungen notwendig.

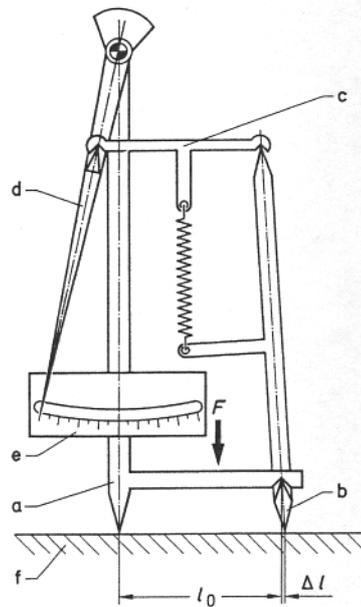
Die zur Beurteilung der Werkstoffbeanspruchung heranzuziehende Größe ist die mechanische Spannung, welcher der Werkstoff ausgesetzt ist. Mechanische Spannungen sind unter Betriebsbedingungen kaum zu ermitteln. Das dazu geeignete röntgenographische Verfahren unterliegt anwendungstechnisch bedingten Einschränkungen. Eine praktikable Methode zur experimentellen Bestimmung von Werkstoffspannungen gründet sich auf eine Entdeckung, die schon im Jahre 1678 von dem englischen Naturwissenschaftler Robert Hooke (1635 - 1703) gemacht wurde [1-1]. Er fand einen Zusammenhang zwischen der Werkstoffspannung und der von ihr abhängigen Verformung. Diese Verformung, „Dehnung“ genannt, tritt auch an der Oberfläche der Objekte auf und ist damit der Messung zugänglich.

Auf dem Prinzip der Dehnungsmessung basiert ein bedeutender Zweig der experimentiellen Spannungsanalyse.

Zunächst benutzte man zur Dehnungsmessung sehr diffizile mechanische Geräte, welche die Dehnungen mit tausendfacher oder noch größerer Übersetzung anzeigen. Ein Beispiel zeigt das Bild 1.0-1.

Geräte dieser Art oder ähnliche Ausführungen waren lange Zeit das Mittel, mit dem die für Spannungsanalysen notwendigen Messungen durchgeführt werden mußten. Trotz ihrer z. T. genialen Konstruktionen und präzisen Ausführungen besaßen sie systemimmanente Nachteile, die ihren Anwendungsbereich stark einschränkten und ihre Bedeutung schwinden ließen:

- Es können nur statische Vorgänge beobachtet werden.
- Um das Verrutschen der Geräte infolge von Erschütterungen zu verhindern, bedarf es hoher Aufspannkräfte.
- Das Messobjekt muss relativ zum Beobachter ortsfest sein.
- Die Größe der Geräte schränkt deren Anwendung an kleinen Messobjekten ein oder macht sie unmöglich.
- Relativ große Längen der Messbasis liefern nur bei gleichförmigem Dehnungszustand ein richtiges Ergebnis; eng begrenzte Spannungskonzentrationen können nicht erfasst werden.
- Die örtlichen Bedingungen können für den Beobachter unzumutbar sein.
- Automatische Registrierung der Messwerte ist nicht möglich.



- a Gerätekörper mit fester Schneide
- b Hebel mit beweglicher Schneide
- c Koppel
- d Hebelzeiger
- e Skala
- f Messobjekt
- $l_0$  Basislänge
- $\Delta l$  Messbereich

**Bild 1.0-1: Tensometer nach Huggenberger mit doppelter Hebelübersetzung in schematischer Darstellung.**

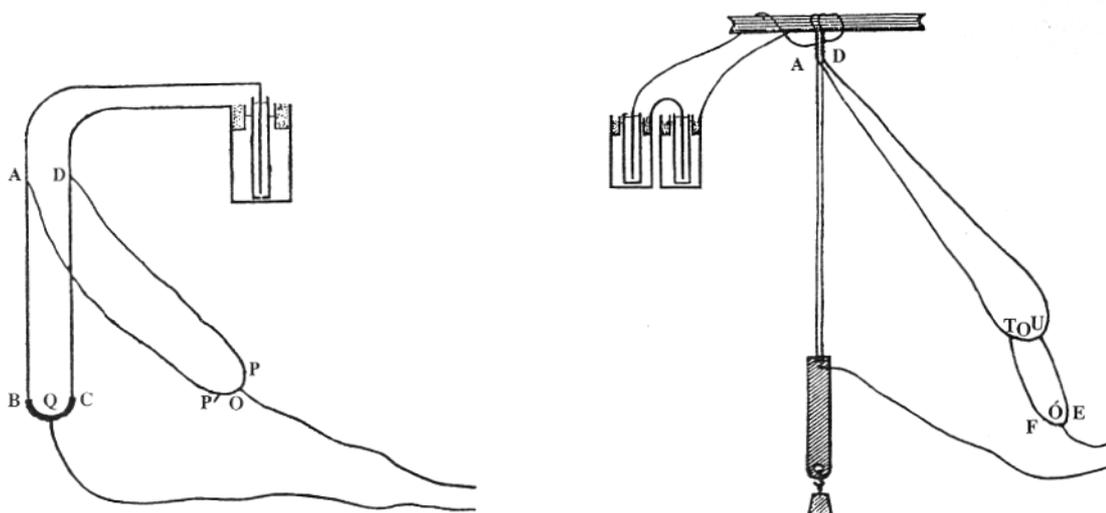
Unter all diesen Unzulänglichkeiten wurde die Beschränkung auf statische Messungen als größter Mangel empfunden. Hier konnten nur elektrische Messverfahren Abhilfe schaffen.

### 1.0.1 Metallische DMS

In der zweiten Hälfte der dreißiger Jahre erinnerte man sich eines Effektes, den Charles Wheatstone schon 1843 in seiner ersten Veröffentlichung [1-2] über die von ihm erfundene Brückenschaltung erwähnt. Es ist die Veränderung des Widerstandes eines elektrischen Leiters durch Einwirkung mechanischer Beanspruchung. William Thomson (1824 -1905, seit 1892 Lord Kelvin) geht in einer 1856 veröffentlichten Arbeit [1-3] näher darauf ein.

Dass bis zur technischen Nutzung dieses Phänomens mehr als 80 Jahre vergingen, hat mehrere Gründe.

Die Widerstandsänderung eines mit Zugkraft beanspruchten Drahtes ist sehr klein. Thomson benutzte hochempfindliche Galvanometer für seine Messungen, die sich für die allgemeine technische Anwendung oder gar für den industriellen Einsatz nicht eignen. Darüberhinaus sind sie ebenfalls nur zur Messung statischer Vorgänge geeignet. Erst die Entwicklung der elektrischen Verstärker schuf die notwendigen Voraussetzungen.



**Bild 1.0-2: Versuchsaufbau von William Thomson zur Untersuchung der Widerstandsänderung elektrischer Leiter unter mechanischer Spannung. (Entnommen aus [1-3].)**

In Deutschland wurden erste Untersuchungen zur Klärung des Effekts an der Versuchsanstalt für Luftfahrt angestellt, aber nicht weiter verfolgt. Von der AEG entwickelte Kohleschichtstreifen zur Messung von Dehnungen erwiesen sich als wenig brauchbar.

In den Vereinigten Staaten von Amerika verfolgten um das Jahr 1938 zwei Leute fast gleichzeitig, aber unabhängig voneinander; die Idee, den „Thomson-Effekt“ für Messzwecke zu nutzen. Die Entwicklung, die zur Entstehung des Dehnungsmessstreifens und zu seiner Verbreitung führte, ist in [1-4] anschaulich beschrieben.

In Kalifornien war es Edward E. Simmons. Er machte aus Seidenfäden als Kette und dünnem Widerstandsdraht als Schuss ein Gewebe, klebte es isoliert auf einen Stahlzylinder, und schuf so eine elektrische Kraftmessereinrichtung zur Messung des von einem Pendelschlagwerk auf die Probe ausgeübten Kraftstoßes, Bild 1.0-3.

In Massachusetts arbeitete Arthur Claude Ruge im seismologischen Institut des Massachusetts Institute of Technology und wollte am Modell eines erdbeben-

festen Wassertanks die Beanspruchung durch simulierte Erdbebenerstütterungen messen. An dem sehr dünnwandigen Modell war die Anwendung bekannter Dehnungsmessgeräte nicht möglich. Keines der zahlreichen verschiedenen Geräte war geeignet. Als letzten Versuch nahm Ruge einen dünnen Widerstandsdraht, klebte ihn in Mäanderform auf ein Stückchen dünnes Seidenpapier und versah die Enden mit dickeren Anschlüssen. Um die Eigenschaften dieses Gebildes untersuchen zu können, klebte er es auf einen Biegestab und verglich dessen

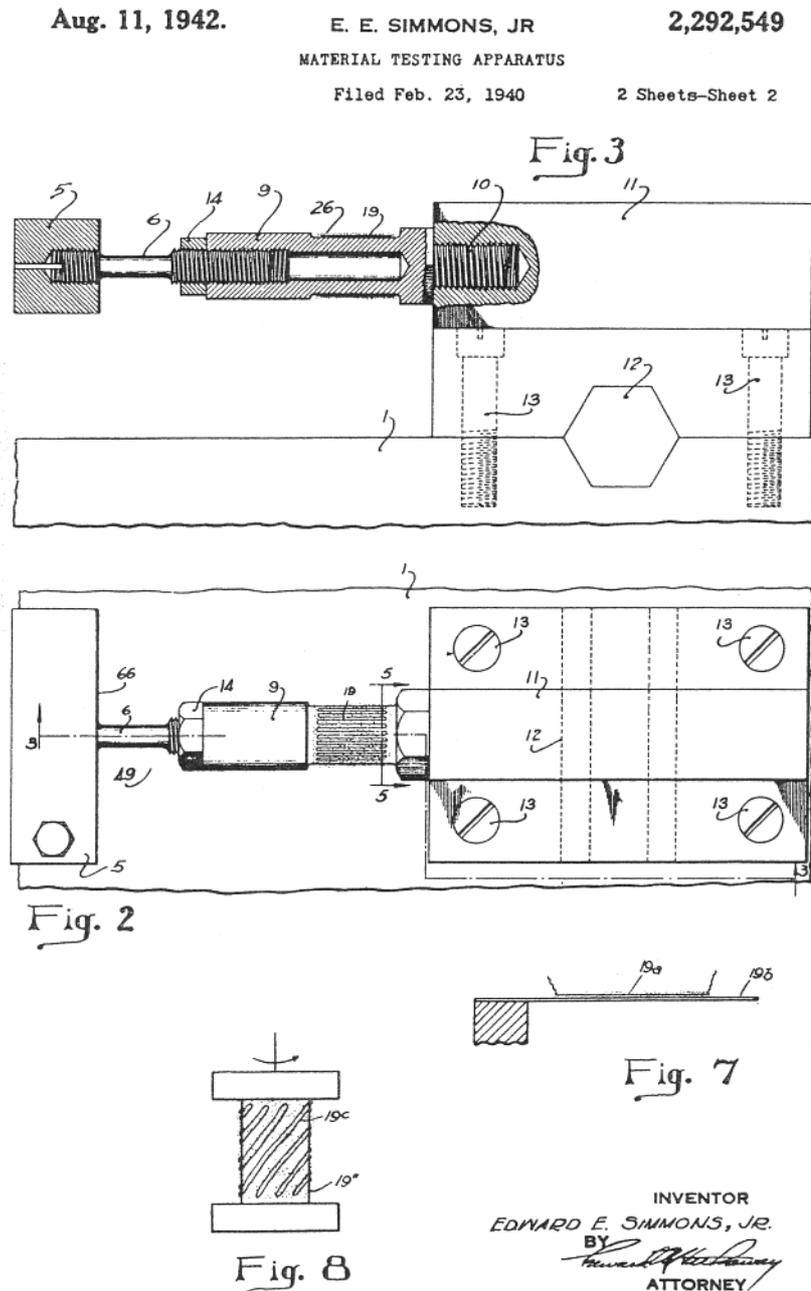
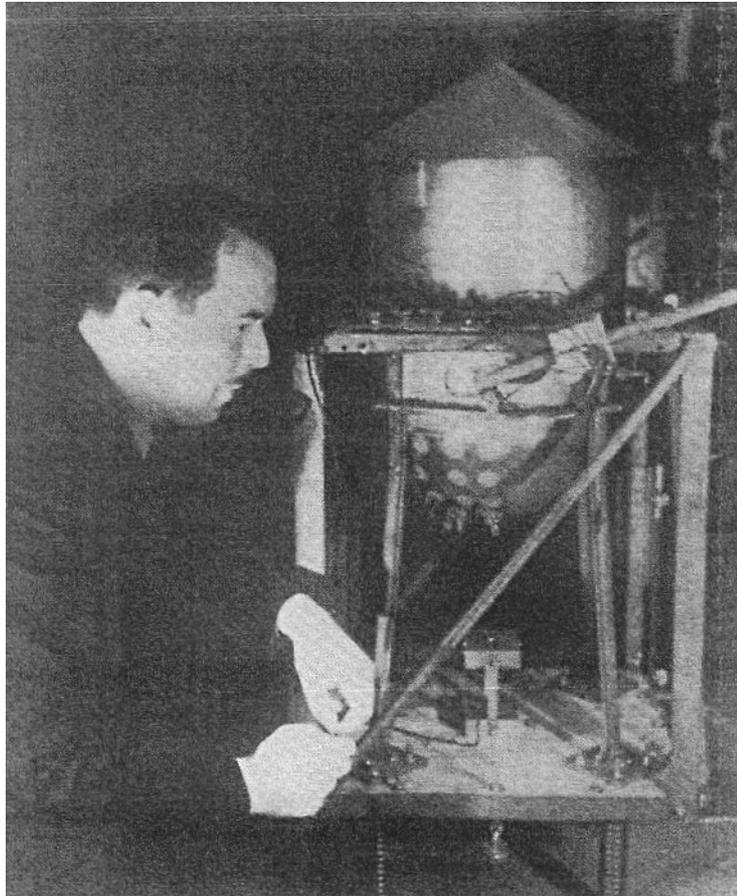


Bild 1.0-3:Kraftmesseinrichtung nach E. E. Simmons, Auszug aus [1-5]. Die zu messende Schlagkraft wirkt in axialer Richtung.

Messwerte mit denen eines herkömmlichen Dehnungsmessgerätes. Er fand gute Übereinstimmung und einen linearen Zusammenhang zwischen Dehnung und Anzeige über den gesamten Messbereich, sowohl bei positiven als auch bei negativen Dehnungen (Stauchungen), und eine gute Nullpunktstabilität. Damit war der „elektrische Widerstands-Dehnungsmessstreifen mit gebundenem Gitter“, wie die volle Bezeichnung lautet, erfunden. Er hatte bereits im ersten Anlauf seine im Prinzip auch heute noch übliche Form gefunden.

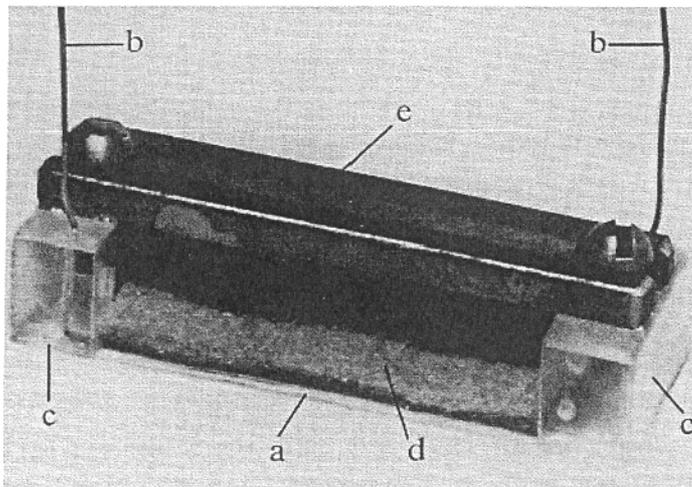


**Bild 1.0-4: Arthur Claude Ruge, der Erfinder des Dehnungsmessstreifens, bei seinen Messungen.**

Ruges entscheidende Idee, in der er sich von Simmons unterschied, war die Befestigung des Messdrahtes auf einer Trägerfolie, wodurch ein selbständiges, frei zu handhabendes Messinstrument entstand, das an jeder beliebigen Oberfläche angeklebt werden konnte. Es war sehr dünn und leicht, bedurfte keiner Anpresskraft und hatte praktisch keine Rückwirkung, so dass auch an dünnen Objekten Messungen möglich wurden. Bei Anwendung elektrischer Verstärker waren statische und dynamische Messungen möglich. Schon die ersten Versuchsexemplare des Dehnungsmessstreifens zeigten sich allen bis dahin gebräuchlichen Dehnungsmessgeräten überlegen.

Ein zweites Verdienst Ruges war die Weiterentwicklung des Dehnungsmessstreifens, kurz DMS genannt, zur Produktionsreife. Und das war letztlich die entscheidende Tat, welche den Siegeszug des Dehnungsmessstreifens einleitete. Somit ist es berechtigt, Ruge den Vater des DMS zu nennen. Er hatte nicht nur die Idee, sondern auch den Weitblick für die immensen Anwendungsmöglichkeiten, und das nötige Durchhaltevermögen, um den DMS zu einem zuverlässigen Instrument der Spannungsanalyse zu machen. Dazu gehörten auch seine wissenschaftlichen Arbeiten.

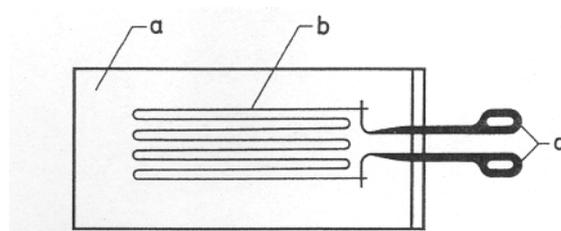
Anfangs glaubte man noch, man müsse das grazile Gebilde mit einem festen Rahmen stützen und die feinen, nur 25 µm dünnen Drähte mit einer Filzabdeckung schützen. Das Bild 1.0-5 zeigt ein Exemplar der ersten serienmäßig hergestellten DMS.



- a Messgitter, mit Zelluloselack auf Papier geklebt
- b Anschlussdrähte
- c Isolierstoffböckchen
- d Filzabdeckung zum Schutz des Messgitters
- e Hilfsbügel, nach der Applikation zu entfernen

**Bild 1.0-5: Erster serienmäßig hergestellter DMS System Ruge**

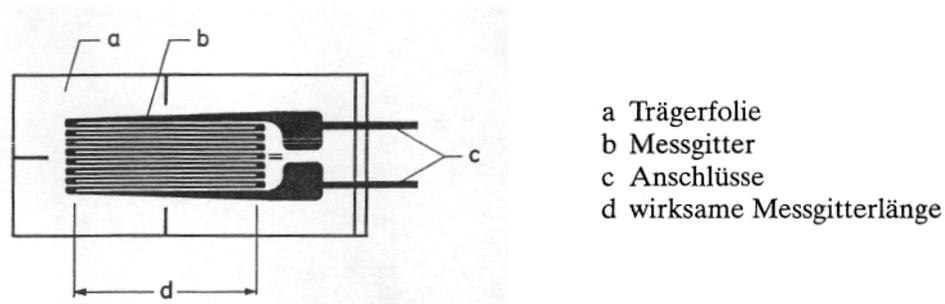
Die Nachfrage, insbesondere seitens der amerikanischen Flugzeugindustrie, wurde aber so groß, dass man diese Konstruktion verlassen musste. (Tatnall [1-4] nennt im Jahr 1941 einen Umsatz von 50.000 Stück in 2 Monaten!) Schließlich zeigte auch die Erfahrung, dass die aufwendige Stützkonstruktion unnötig war und man kam zu der im Bild 1.0-6 dargestellten vereinfachten Ausführung, die mit nur geringfügigen Modifikationen über mehrere Jahrzehnte beibehalten wurde. Zahlreiche Patente berichten von Ruges ständigen Bemühungen um Verbesserung der messtechnischen Eigenschaften.



- a Trägerfolie
- b Messgitter
- c Anschlüsse

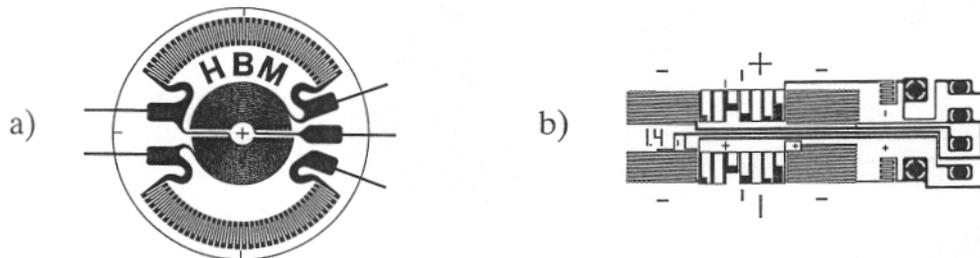
**Bild 1.0-6: Charakteristische Bauform eines DMS mit aus Draht gewickeltem Messgitter.**

In der Folgezeit versuchte man unterschiedliche technologische Abwandlungen zur Rationalisierung der Fertigungstechnik. Hier ist vor allem die Übertragung der von Paul Eisler erfundenen Technik der „gedruckten Schaltung“ zu nennen, die in wesentlich verfeinerter Form ab etwa 1952 zur Entwicklung des sogenannten „Folien-DMS“ führte [1-6].



**Bild 1.0-7: Charakteristische Bauform eines DMS mit aus Metallfolie geätztem Messgitter.**

Diese Technik erlaubt gegenüber der Drahtwickeltechnik eine wesentliche Erweiterung der konstruktiven Möglichkeiten; es sind alle in der Ebene darstellbaren Formen ohne zusätzlichen Aufwand realisierbar. Spiralige Formen sind ebenso bequem herstellbar wie ganze Netzwerke, wie sie z. B. in Messgrößenaufnehmern für Kräfte, Drücke, Drehmomente und andere mechanische Größen benutzt werden.



**Bild 1.0-8: Beispiele zur Gestaltung von DMS in der Folien-Ätztechnik**  
a) vierteilige Membranrosette in Brückenschaltung zum Bau von Druckaufnehmern.  
b) komplette DMS-Brückenschaltung inklusive aller Verbindungen und Abgleichelemente.

DMS werden in zahllosen verschiedenen Ausführungen hergestellt. Daraus ergibt sich eine beispiellose Anpassungsfähigkeit des Verfahrens an unterschiedliche Messaufgaben, auch unter schwierigen Nebenbedingungen.

Die wesentlichen Anwendungsgebiete der DMS-Technik sind:

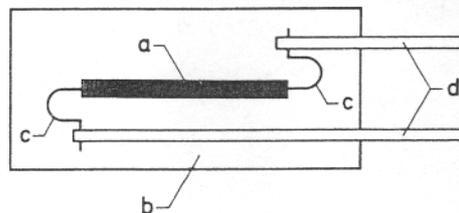
- die experimentelle Spannungsanalyse einschließlich der Modellmesstechnik und der Biomechanik,
- der Messgrößenaufnehmerbau.

Während die Anpassungsfähigkeit des DMS zu seiner raschen Ausbreitung auf dem Gebiet der experimentellen Spannungsanalyse beitrug, war es die erreichbare hohe Messgenauigkeit, die ihn für den Messgrößenaufnehmerbau attraktiv machte. Beide Ausführungsformen - Drahtwickeltechnik und Folientechnik - liefern DMS, die man wegen ihres aus einer Metallegierung bestehenden Meßgitters metallische DMS nennt.

### 1.0.2 Halbleiter DMS

Neben den metallischen DMS gibt es noch andere Arten elektrischer Widerstands-DMS. Dazu gehören die Halbleiter-DMS, kurz HL-DMS. Sie erweitern den Anwendungsbereich der DMS-Technik. Ihr Messeffekt beruht auf dem von C. S. Smith im Jahre 1954 entdeckten Piezo-Widerstandseffekt der Halbleiter. Als Ausgangsmaterial diente ursprünglich Germanium, das später von Silizium abgelöst wurde.

Im Aufbau ähnelt der HL-DMS weitgehend dem metallischen DMS. Das messende Element besteht aus einem wenige Zehntel Millimeter breiten und wenige Hundertstel Millimeter dicken Streifen, das auf einer isolierenden Trägerfolie befestigt und mit Anschlüssen versehen ist. Gleichrichtereffekte vermeidet man durch eine sperrschichtfreie Kontaktierung des Halbleiters, die durch einen dünnen Golddraht als Verbindung zwischen dem Halbleiter-Element und den Anschlüssen erzielt wird.



- a „Messgitter“
- b Trägerfolie
- c Zwischenleiter aus Gold
- d Anschlussbänder

**Bild 1.0-9: Aufbau eines Halbleiter-DMS, schematisch**

Die Dehnungsempfindlichkeit (das ist das Zahlenverhältnis zwischen der zu messenden Dehnung und dem vom DMS gelieferten Signal) beträgt bei handelsüblichen HL-DMS etwa das Fünfzig- bis Sechzigfache der Empfindlichkeit metallischer DMS. Sie werden deshalb vorwiegend zum Bau von Aufnehmern zur Messung anderer physikalischer Größen eingesetzt, die mit einfachen elektronischen Einrichtungen zu Transmittern ergänzt werden können.

In der experimentellen Spannungsanalyse konnten sich HL-DMS nicht durchsetzen, wofür es mehrere Gründe gibt.

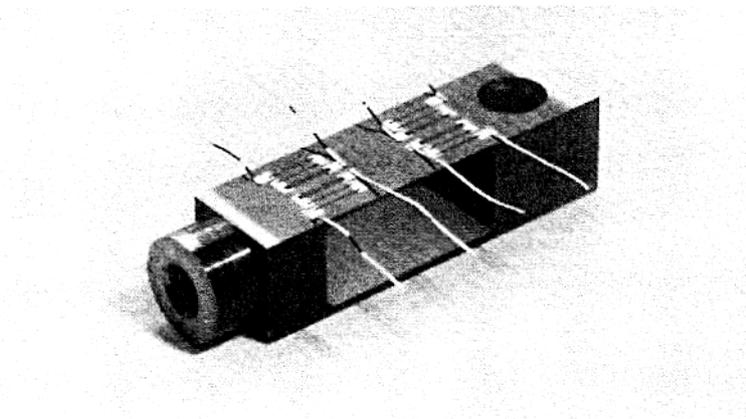
- Die nichtlinearen Charakteristiken der HL-DMS machen für Messungen mit höheren Genauigkeitsansprüchen Korrekturen der Anzeigewerte notwendig.
- HL-DMS sind wesentlich teurer als metallische DMS.
- Temperaturabhängige Störeinflüsse sind - auch unter Berücksichtigung der großen Empfindlichkeit - bei HL-DMS meist größer als bei metallischen DMS und schwerer zu kompensieren.
- Infolge der Sprödigkeit des Halbleitermaterials ist die Handhabung schwieriger.

Andererseits ist die große Empfindlichkeit ein Argument, HL-DMS zur Messung sehr kleiner Dehnungen einzusetzen. Vorteilhaft ist das große Signal der HL-DMS auch dann, wenn große Störfelder einwirken.

Neben den konventionellen DMS gibt es noch andere Ausführungen, die der Vollständigkeit halber erwähnt, aber nicht weiter behandelt werden.

### 1.0.3 Aufgedampfte DMS (Dünnschicht-DMS)

Eine dritte Art elektrischer Widerstands-DMS liefert die Aufdampftechnik. Dabei wird das messende Element unter Vakuum durch Verdampfen der Legierungsbestandteile unmittelbar an der Messstelle deponiert. Das Anwendungsgebiet beschränkt sich auf die Aufnehmerproduktion [1-7].



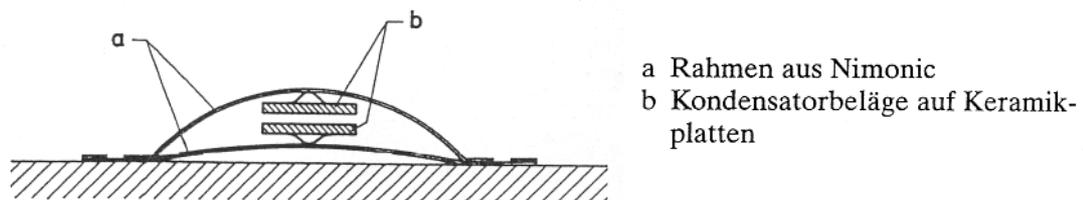
**Bild 1.0-10: Dünnschicht-DMS auf dem Federkörper eines Kraftaufnehmers.**

Die Herstellung applizierbarer DMS nach dem Aufdampfverfahren wurde versucht [1-8, 1-9], brachte aber keine befriedigenden Ergebnisse. Die Versuche wurden eingestellt. Andere Versuche zur Herstellung aufgedampfter HL-DMS werden in [1-10] beschrieben. Eine Verbreitung auf dem Markt konnte in den letzten Jahren nicht festgestellt werden.

### 1.0.4 Kapazitive DMS

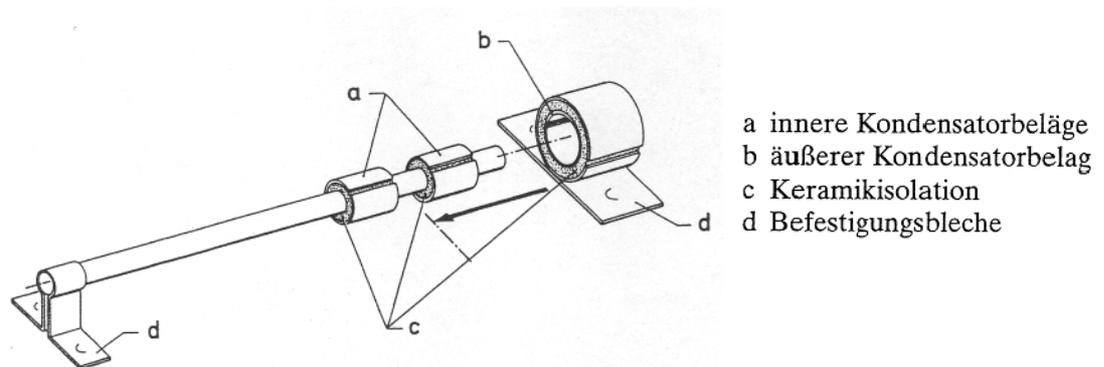
Kapazitive DMS sind eine neuere Entwicklung, die hauptsächlich als Alternative zu den konventionellen DMS für Dehnungsmessungen im Bereich hoher Temperaturen zu sehen sind, wo die metallischen DMS an ihre Grenzen kommen. Es sind bisher drei unterschiedliche Versionen bekannt geworden.

1. Eine englische Entwicklung der Central Electricity Research Laboratories (C.E.R.L.) zusammen mit der Firma Planer. Es handelt sich um einen Plattenkondensator, bei dem sich der Plattenabstand in Abhängigkeit von der zu messenden Dehnung ändert.



**Bild 1.0-11: Schema eines kapazitiven DMS von CERL-Planer**

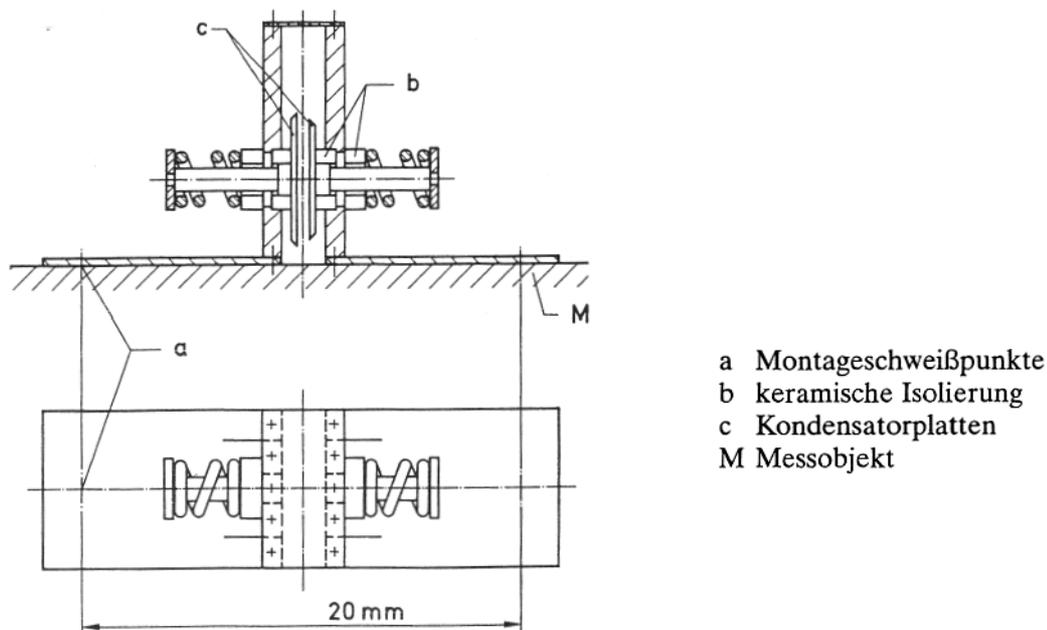
2. Eine amerikanische Entwicklung von Boeing Aircraft ist als Differentialkondensator ausgeführt.



**Bild 1.0-12: Schema eines kapazitiven DMS von Boeing**

3. Eine deutsche Entwicklung von Interatom. Sie ist ebenfalls als Plattenkondensator ausgeführt. Die kapazitiven Aufnehmer werden im Punktschweißverfahren am Messobjekt befestigt.

Mit kapazitiven DMS konnten gute Ergebnisse im Temperaturbereich bis ca. 500 °C gewonnen werden. Im Bereich bis 800 °C waren die Ergebnisse noch



**Bild 1.0-13: Schema eines kapazitiven DMS von Interatom**

brauchbar. Wegen des gegenüber ohmschen (resistiven) DMS andersartigen Messverfahrens werden die kapazitiven DMS hier nicht weiter behandelt. Interessenten werden auf die Literatur [1-11 bis 1-15] verwiesen.

### 1.0.5 Piezoelektrische DMS

Piezoelektrische DMS sind aktive DMS. Als dehnungsempfindliches Material wird Bariumtitanat verwendet. Ähnlich den piezoelektrischen Aufnehmern mit Quarz als Sensormaterial liefert der DMS eine der Dehnung proportionale elektrische Ladung an seinen Oberflächen, die mit Ladungsverstärkern zu messen ist. Statische Messungen sind nur bedingt möglich.

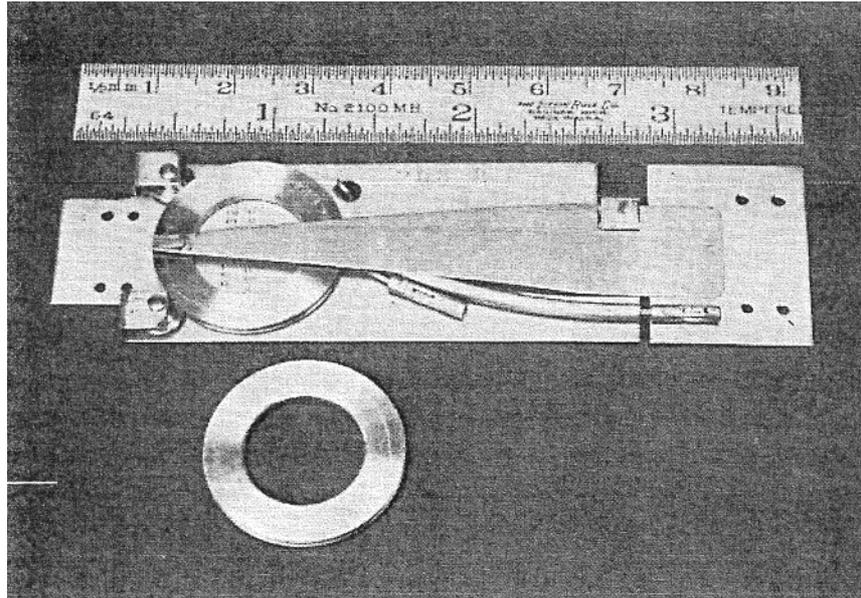
Die piezoelektrischen DMS hatten nur eine geringe Bedeutung erlangt und scheinen, nach Kenntnis des Verfassers, ganz aus dem Gebrauch gekommen zu sein.

### 1.0.6 Spannungsoptische DMS

Ein aus spannungsoptisch aktivem Material hergestellter Streifen zeigt infolge einer „eingefrorenen“, stetig ansteigenden Spannung ein Isochromatenfeld. Infolge einwirkender Dehnung verschieben sich die Isochromaten. Die an einer Skala ablesbare Verschiebung ist ein Maß der Dehnung. DMS dieser Art wurden in den USA gebaut. Sie haben keine praktische Bedeutung erlangt und sind nicht mehr im Handel.

### 1.0.7 Mechanische DMS

Diese relativ selten anzutreffenden Geräte haben eine lange Tradition. Sie sind aufgrund ihres Aufbaus meist nur an größeren Objekten anzubringen. Als Messeffekt entsteht eine Kratzspur auf einem Metallplättchen oder auch auf einem Glaszylinder, die allerdings erst nach Beendigung der Messung unter dem Mikroskop ausgewertet werden kann. Diesem Nachteil steht der große Temperaturbereich der Anwendbarkeit gegenüber. Der Schrieb ist auch dann noch lesbar, wenn der Aufnehmer z. B. bei einem Unfall in Feuer gerät [1-16].



**Bild 1.0-14: Mechanischer Dehnungsmesser (nach [1-6]).**

### 1.0.8 Andere Systeme

Unter der Bezeichnung „Dehnungsaufnehmer“ werden noch zahlreiche andere Geräte angeboten. Hierzu gehören mit DMS arbeitende ohm'sche Systeme, induktive Systeme (Differential-Drossel- und Differential-TransformatorSysteme), das Schwingsaiten-Verfahren und einige optisch oder mechanisch arbeitende Geräte. Zu letzteren zählt auch das im Bild 1.0-1 gezeigte Huggenberger-Tensometer.

In den meisten Fällen ist deren Signal nicht der Dehnung (= relativen Längenänderung) proportional, sondern der absoluten Längenänderung. Die Dehnung muss durch Division des Messwertes mit der Basislänge errechnet werden. Diese Geräte sind keine Dehnungsmessstreifen und werden deshalb nicht behandelt.

## 1.1 Das physikalische Wirkungsprinzip der Dehnungsmessstreifen

Eine Dehnungsmessung mittels DMS setzt voraus, dass die Dehnung des zu untersuchenden Objekts verlustlos auf den DMS übertragen wird. Dazu bedarf es einer innigen Verbindung zwischen DMS und Messobjekt. In den weitaus meisten Fällen sind nur die offenliegenden Flächen eines Messobjekts der Messung zugänglich (die sich sowohl außen als auch in Innenräumen des Objekts befinden können). Die geforderte innige, flächenhafte Verbindung zwischen Messobjekt und DMS wird durch spezielle Klebstoffe am besten erfüllt. Im Innern eines Objekts, d. h. innerhalb seiner massiven Teile, sind Messungen mit DMS nur ausnahmsweise möglich, z. B. bei Kunststoffobjekten (Modelltechnik), wenn der DMS bereits bei der Herstellung des Teiles eingegossen werden kann, oder auch bei Betonbauten, wenn der DMS beim Schütten des Betons mit eingebettet werden kann. Im zweiten Falle sind spezielle, gekapselte Dehnungsaufnehmer erforderlich.

Andere Bindemittel und -methoden sind meist auf Sondergebiete beschränkt, wie z. B. die keramischen Bindemittel\* auf den Hochtemperaturbereich und das Punktschweißen auf Anwendungen im Stahlbau und dgl.; beide benötigen Spezial-DMS.

Die verschiedenen Befestigungsmethoden sind im Abschnitt 4 beschrieben.

Die vom Messobjekt auf den DMS übertragene Dehnung verursacht bei den elektrischen Widerstands-DMS, die nachfolgend ausschließlich besprochen werden, eine messbare Veränderung ihres elektrischen Widerstandes.

In der Einleitung wurde bereits auf die Existenz zweier verschiedener Arten elektrischer Widerstands-DMS hingewiesen:

metallische DMS und  
Halbleiter-DMS.

Ihre Wirkungsweise basiert auf unterschiedlichen physikalischen Vorgängen, die nachfolgend kurz erläutert werden.

### 1.1.1 Metallische DMS

Die Wirkungsweise metallischer DMS beruht auf dem von Wheatstone und Thomson gefundenen Dehnungs-Widerstands-Effekt elektrischer Leiter (s. Abschnitt 1.0.1).

Jeder elektrische Leiter ändert seinen Widerstand infolge mechanischer Beanspruchung, z. B. durch Zug- oder Druckkräfte. Die Widerstandsänderung beruht zum Teil auf der Verformung des Leiters, zum Teil auf einer Änderung des

\*) Nicht mehr im HBM-Programm

spezifischen Widerstands  $\varrho$  des Leiterwerkstoffes infolge von Gefügeänderungen. Diesen Vorgang beschreibt die Beziehung

$$\frac{dR}{R_0} = \underbrace{\varepsilon (1 + 2\nu)}_{\text{geometrischer Anteil}} + \underbrace{\frac{d\varrho}{\varrho}}_{\text{Gefügeanteil}} \quad (1.1-1)$$

$R$  = elektrischer Widerstand

$\varepsilon$  = Dehnung

$\nu$  = Querszahl

$\varrho$  = spezifischer Widerstand

In [1-17] sind die Ergebnisse einer Untersuchung verschiedener Werkstoffe veröffentlicht. In dem daraus entnommenen Diagramm Bild 1.1-1 bezeichnen die den Kurven beige-schriebenen Zahlen die Steigung  $S$ ; das ist der Quotient aus relativer Widerstandsänderung  $\Delta R/\Delta_0$  und Dehnung  $\varepsilon$  :

$$S = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \quad (1.1-2)$$

Die Messungen wurden an frei gespannten Drähten durchgeführt.

Das Diagramm weist auf zwei Eigenarten hin:

1. Die Anfangssteigung der Kurven zeigt erhebliche Unterschiede. Sie reicht von +6,5 bei Platin-Iridium 95/5 bis -10 bei Nickel. Diese Unterschiede sind mit dem stark unterschiedlichen, werkstoffabhängigen Gefügeanteil der Widerstandsänderung zu erklären.
2. Von gewissen Dehnungen an ändern sich die Steigungen bei jenen Kurven, deren Anfangssteigung vom Wert 2 abweicht. Die Veränderung erfolgt bei unterschiedlich großen Dehnungen, und zwar immer beim Übergang vom elastischen in den plastischen Verformungszustand. Wenn man davon ausgeht, dass im plastischen Verformungsbereich die Querdehnzahl den Wert  $\nu = 0,5$  annimmt (Volumenkonstanz), dann ergibt sich allein aus dem geometrischen Anteil der Gleichung (1.1-1)

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \varepsilon (1 + 2\nu) = \varepsilon (1 + 2 \cdot 0,5) = 2 \varepsilon.$$

Der Gefügeanteil wird null.

Als besonders vorteilhaft erscheinen demnach Werkstoffe, deren Kennliniensteigung von Anfang an den Wert

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 2 \frac{\Omega/\Omega}{m/m}$$

besitzt und diesen über den gesamten Dehnungsbereich beibehält. Man findet sie bei manchen Legierungen und verwendet diese deshalb vorzugsweise zur Herstellung von DMS.

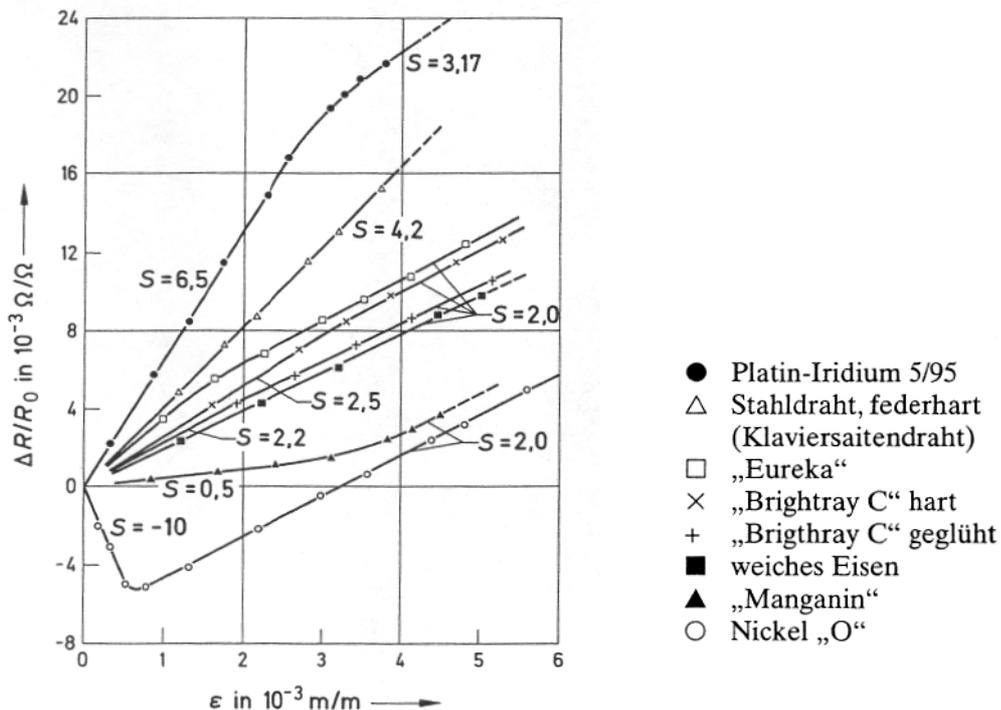


Bild 1.1-1: Widerstands-Dehnungs-Charakteristik freigespannter Drähte (nach [1-17])

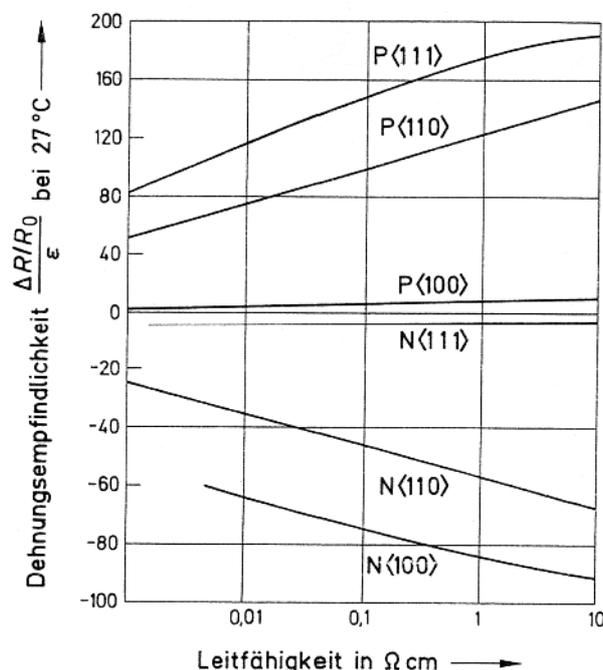
### 1.1.2 Halbleiter-DMS (HL-DMS)

Beim HL-DMS beruht der Messeffekt - wie beim metallischen DMS - auf der Veränderung des elektrischen Widerstandes. Anders als beim metallischen DMS erklärt sich der Dehnungs Widerstands-Effekt hauptsächlich aus einer veränderlichen Elektronenbeweglichkeit. Der geometrische Anteil an der Widerstandsänderung ist demgegenüber klein und beträgt weniger als 2 % .

Aus Silizium (nur dieses wird gegenwärtig zur Herstellung von HL-DMS verwendet) zieht man Einkristalle nach dem Czochralsky-Verfahren [1-18]. Um die erforderliche Reinheit zu erzielen, entfernt man die im Kristall noch enthaltenen Fremdatome mit dem Zonenreinigungsverfahren, bis eine Reinheit von etwa 1 Fremdatom auf  $10^{10}$  Siliziumatome erreicht ist. Danach werden durch Diffusion bestimmte Fremdatome in den Kristallverband des Siliziums eingebaut. Diesen Vorgang nennt man „dotieren“. Verwendet man dreiwertige Atome (Akzeptoren) zum Dotieren des vierwertigen Siliziums; z. B. Bor- oder Gallium, dann entsteht Elektronenmangel, man erhält p-Leitfähigkeit. Dotiert man mit fünfwertigen Atomen (Donatoren), z. B. Phosphor oder Arsen, dann entsteht Elektronenüberschuss, man erhält n-Leitfähigkeit. Der Grad der Dotierung bestimmt die elektrische Leitfähigkeit.

Es ist eine Eigenart dieser so vorbehandelten Einkristalle, dass sich ihr ohmscher Widerstand unter dem Einfluss einer erzwungenen Dehnung ändert, und zwar unterschiedlich stark in den drei Kristallgitterachsen. Der Effekt ist anisotrop. Bei jeweils positiver Dehnung entsteht bei p-leitendem Silizium in der  $\langle 111 \rangle$  Achse eine positive Widerstandsänderung, bei n-leitendem Silizium hingegen in der  $\langle 100 \rangle$  Achse eine negative Widerstandsänderung. Bei negativer Dehnung sind die Effekte entgegengesetzt. Während in den beiden genannten Achsrichtungen die Wirkungen recht deutlich in Erscheinung treten, sind sie in den übrigen Achsrichtungen sehr viel schwächer.

Aus dem Bild 1.1-2 geht hervor, dass die Dehnungsempfindlichkeit (das ist die



**Bild 1.1-2:** Dehnungsempfindlichkeit von p- und n-leitendem einkristallinem Silizium in den 3 Kristallgitterachsen in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit (nach [1-19]).

Widerstandsänderung in Abhängigkeit von der Dehnung) wesentlich von der Leitfähigkeit des Siliziums und damit vom Grad der Dotierung abhängt.

Zur Herstellung von DMS zerlegt man den dotierten Einkristall in Streifen, deren Längsrichtung mit der Gitterachse höchster Dehnungsempfindlichkeit übereinstimmt.

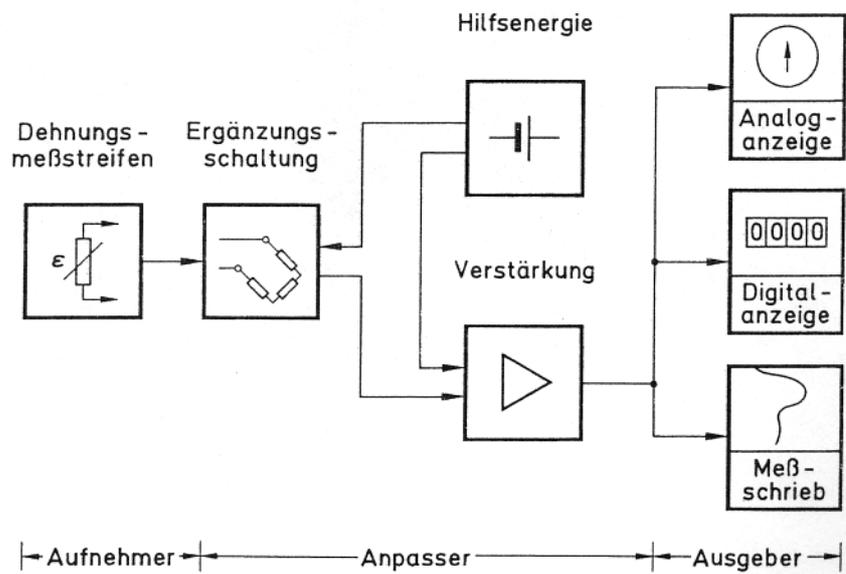
Halbleiter-DMS gehorchen der Beziehung

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \varepsilon \frac{T_0}{T} + C\varepsilon^2 \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \dots \quad (1.1-3)$$

Die Parameter  $k$ ,  $\varepsilon$ ,  $T$  und  $C$  bestimmen die Kennlinie.

## 1.2 Die Messkette

Die mit DMS zu messenden Dehnungen sind normalerweise sehr klein. Infolgedessen sind die Widerstandsänderungen ebenfalls sehr klein und lassen sich auf direkte Weise, etwa mit einem Ohmmeter, nicht mehr messen. Es ist deshalb notwendig, den DMS in eine sogenannte Messkette einzubeziehen, wodurch eine genaue Bestimmung der Widerstandsänderung des DMS möglich wird.



**Bild 1.2-1:** Schema einer Messkette zur Messung von Dehnungen mit DMS.

Das erste Glied der Messkette bildet der DMS selbst. Er wandelt die mechanische „Dehnung“ in die elektrische „Widerstandsänderung“.

Das zweite Glied der Kette ist eine Messschaltung (hier eine Wheatstone'sche Brückenschaltung), von welcher der DMS einen Zweig bildet. Sowohl der DMS als auch die Messschaltung sind (im physikalischen Sinne) passive Glieder. Es muss ihnen eine Energie zugeführt werden, damit man ein verwertbares Signal erhält. Diese Hilfsenergie wird einer separaten Quelle entnommen. Üblicherweise benutzt man eine konstante (eingepreßte) elektrische Spannung, manchmal auch einen konstanten (eingepreßten) elektrischen Strom.

Wenn sich der Widerstand des DMS infolge einer Dehnung ändert, dann kommt die Brückenschaltung aus ihrer Symmetrie, sie wird verstimmt, und liefert eine der Brückenverstimmung proportionale Brückenausgangsspannung (s. Abschn. 5).

Als drittes Glied ist ein Verstärker in die Messkette eingefügt, welcher die Brückenausgangsspannung auf eine zum Betrieb von Anzeigeeinstrumenten ausreichende Höhe verstärkt. Gelegentlich sind die Verstärker auch so ausgelegt, dass sie einen der Brückenausgangsspannung proportionalen Strom liefern oder auch wahlweise beides. Bei einem linear arbeitenden Verstärker ist dessen Ausgangsspannung bzw. Ausgangsstrom der Verstärker-Eingangsspannung (das ist die Brücken-Ausgangsspannung) und damit wiederum der zu messenden Dehnung proportional.

Das vierte Glied der Messkette bildet die Anzeige. Sie formt das Ausgangssignal des Verstärkers in eine den menschlichen Sinnen zugängliche Form um. Im einfachsten Fall dient der Zeigerausschlag eines Spannungs- oder Strommessers oder die Ziffernfolge eines digitalen Messgerätes zur Anzeige des Messwertes. Soll eine zeitlich veränderliche Dehnung, ein dynamischer Vorgang also, erfasst werden, so sind schreibende Geräte besser geeignet als nur anzeigende. Manche Verstärker erlauben den Anschluss beider Gerätearten, entweder alternativ oder, wie im Beispiel des Bildes 1.2-1, parallel.

Die vorstehende Beschreibung der Messkette erwähnt nur skizzenhaft die unbedingt notwendigen Glieder. In der Praxis erfährt die Messkette oft vielfältige Erweiterungen durch zusätzliche Geräte, wie z. B. Messstellenumschalter, Filter, Spitzenwertspeicher, Grenzwertschalter, Transientenrecorder und andere. Es können außerdem anstelle der anzeigenden Geräte die üblichen elektronischen Datenverarbeitungssysteme angeschlossen und deren vielfältige Möglichkeiten genutzt werden.

## 2 In der DMS-Technik gebräuchliche Begriffe und Maßeinheiten

### 2.1 Die Dehnung; Definition und Maßeinheit

In der Umgangssprache bezeichnet man mit dem Begriff „Dehnung“ die Verlängerung einer Strecke. Eine Dehnung kann verursacht werden durch die Einwirkung einer Kraft. So wird z. B. ein Gummiband gedehnt, wenn man daran zieht. Eine Dehnung kann aber auch ohne Krafteinwirkung entstehen, nämlich dann, wenn ein Gegenstand erwärmt wird.

Im 1. Fall sprechen wir von mechanischer  
Im 2. Fall von Wärmedehnung.

Der entgegengesetzte Vorgang wird „Stauchung“ genannt. Eine Stauchung entsteht ebenfalls als Folge einer Krafteinwirkung, und zwar einer Druckkraft. Wenn ein Körper abkühlt, entsteht ebenfalls eine Stauchung, doch spricht man dann meist von einer „Zusammenziehung“ oder „Kontraktion“.

Aus der umgangssprachlichen Benutzung des Begriffes „Dehnung“ ergeben sich bisweilen Missverständnisse dadurch, dass man sowohl die „absolute Längenänderung“ als auch die „relative Längenänderung“ mit diesem Begriff belegt. Diese Begriffsverwirrung hat historische Wurzeln. Die nachstehend gegebenen Erläuterungen sollen die unterschiedlichen Bedeutungen darlegen.

#### 2.1.1 Absolute Längenänderung

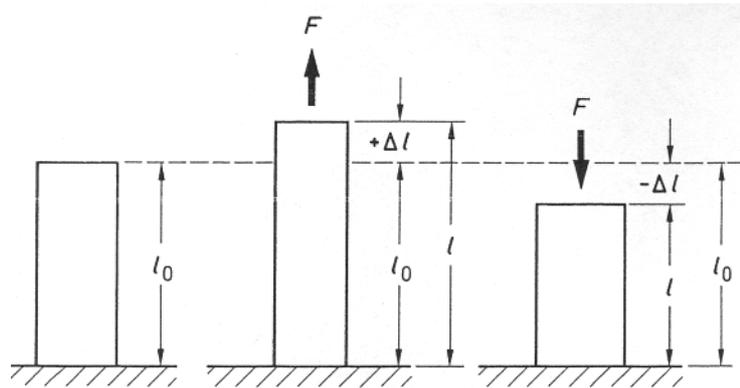
Die früher üblichen und zum Teil heute noch benutzten Verfahren messen die absolute Längenänderung eines Objekts. Dafür benutzte man den Begriff „Dehnungsmessung“. Auch heute noch werden die Geräte „Dehnungsmesser“ genannt.

Die absolute Längendehnung  $\Delta l$  ist die Differenz zwischen der Länge  $l$  einer Strecke zum Zeitpunkt der Messung und ihrer ursprünglichen Länge, der Basislänge oder Bezugslänge  $l_0$  :

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2.1-1)$$

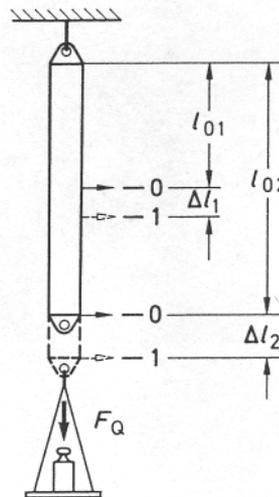
Absolute Längenänderungen misst man mit Längenmessgeräten oder mit Längenänderungs-Messgeräten.

Die Längenänderung  $\Delta l$  kann positives oder negatives Vorzeichen haben, Bild 2.1.1.



**Bild 2.1-1: Absolute Längenänderungen  $\Delta l$  und deren Vorzeichen.**

Die Gl. (2.1-1) zeigt, dass die absolute Längenänderung, und damit das Ergebnis der Messung, von der gewählten Bezugslänge abhängt. Im Bild 2.1-2 ist ein Versuch dargestellt, der dies veranschaulichen soll.



**Bild 2.1-2: Modellversuch „absolute Längenänderung“  
Erläuterung im Text.**

An dem frei aufgehängten, bandförmigen Objekt werden die Länge  $l_{01}$  und die doppelt so große Länge  $l_{02}$  als Basislänge markiert. Alsdann wird das Band mit der Gewichtskraft  $F_Q$  belastet. Eine Messung zeigt, dass die Längenzunahme  $\Delta l_2$  doppelt so groß ist wie  $\Delta l_1$ . Die Längenänderung ist demnach eine Funktion der Basislänge:

$$\Delta l = f(l_0) \quad (2.1-2)$$

Setzt man jedoch die Längenänderung zur Basislänge ins Verhältnis, dann ergibt sich für beide Fälle der gleiche Wert:

$$\frac{\Delta l_2}{l_{02}} = \frac{2 \Delta l_1}{2 l_{01}} = \frac{\Delta l_1}{l_1}.$$

### 2.1.2 Relative Längenänderung oder Dehnung

Im Abschnitt „absolute Längenänderung“ wurde festgestellt, dass die Längenverhältnisse  $\Delta l_1:l_{01}$  und  $\Delta l_2:l_{02}$  gleich groß sind (das gilt natürlich nur bei einem gleichförmigen Dehnungszustand). Aus diesem Grund verwendet man in der Festigkeitslehre und in der Dehnungsmesstechnik das Längenverhältnis, die relative Längenänderung, als Messgröße. Für die relative Längenänderung wurde das Formelzeichen  $\varepsilon$  eingeführt.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.1-3)$$

und die Bezeichnung „Dehnung“ als technisches Fachwort (Terminus technicus) festgelegt. Diese Festlegung findet sich in der deutschen Norm DIN 1304. Das Fachwort „Dehnung“ wird als Oberbegriff sowohl für den Vorgang der Verlängerung als auch den der Verkürzung angewandt; im ersten Falle spricht man von „positiver Dehnung“, im zweiten von „negativer Dehnung“.

$\varepsilon$  wird positiv, wenn  $\Delta l$  positiv ist,  
 $\varepsilon$  wird negativ, wenn  $\Delta l$  negativ ist.

### 2.1.3 Die Maßeinheit der Dehnung [2-1]

Längen werden mit der Längeneinheit Meter [m] gemessen. Die Dehnung  $\varepsilon$  ist definiert als Quotient aus einer Längenänderung  $\Delta l$  und einer Bezugslänge  $l_0$  (s. Abschnitt 2.1.2). Demzufolge erhält die Dehnung die Einheit m/m:

$$(\varepsilon) = \left\{ \frac{\Delta l}{l_0} \right\} \left[ \frac{\text{m}}{\text{m}} \right].$$

Man nennt dies ein Größenverhältnis.

Da die Längenänderungen in den hier betrachteten Fällen in der Regel sehr klein sind, verwendet man zu ihrer Benennung genormte Unterteilungen des Meters:

$$\begin{aligned} 10^{-6} \text{ m} &= \mu\text{m} \\ 10^{-3} \text{ m} &= \text{mm} \\ 10^{-2} \text{ m} &= \text{cm} \end{aligned}$$

Je nach dem Betrag der Längenänderung wird man eine der vorstehenden Unterteilungen benutzen, um mit bequemen Zahlen rechnen zu können. Es ist freigestellt, den Zahlenwert als Zehnerpotenz zu schreiben oder ein entsprechendes, in DIN 1301 genormtes Vorsatzzeichen zu verwenden. Beide Schreibweisen sind gleichwertig (siehe Beispiel).

Beispiel: Schreibweisen für die Maßeinheit der Dehnung

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= 180 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{m}} = 180 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \\ \varepsilon_2 &= 2,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{m}} = 2,5 \frac{\text{mm}}{\text{m}} = 2500 \mu\text{m}/\text{m}. \\ \varepsilon_3 &= 3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{m}} = 3 \frac{\text{cm}}{\text{m}} = 30000 \mu\text{m}/\text{m}.\end{aligned}$$

Häufig trifft man noch auf die Bezeichnungen

$$\begin{aligned}\% &\text{ anstelle } 10^{-2} \text{ m/m} = \text{cm/m} \\ \text{‰} &\text{ anstelle } 10^{-3} \text{ m/m} = \text{mm/m}.\end{aligned}$$

Prozent- und Promille-Angaben sollte man ausschließlich den Toleranzangaben vorbehalten. Für Dehnungsangaben sollte man sie vermeiden, weil sie zusammen mit Toleranz- oder Messfehler-Angaben missverständlich sind und mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer falschen Interpretation führen, wie das nächste Beispiel zeigt.

Beispiel: Bedeutung von Prozentangaben in Verbindung mit Dehnungswerten.

- a)  $\varepsilon = 2,72 \text{ cm/m} \pm 0,5 \%$  bedeutet:  
 $27200 \mu\text{m}/\text{m} \pm 136 \mu\text{m}/\text{m}.$
- b)  $\varepsilon = 2,72 \% \pm 0,5 \%$  bedeutet aber, wenn man Prozent als Maß der Dehnung verwendet:  
 $27200 \mu\text{m}/\text{m} \pm 5000 \mu\text{m}/\text{m}!$

Pseudo-Einheiten, wie „Micro-Dehnung“, „ $\mu\text{D}$ “ oder „ $\mu\varepsilon$ “, haben keine mathematische Grundlage und widersprechen dem Größenskalkül. Besonders die aus Amerika stammende Bezeichnung  $\mu\varepsilon$  führt zu widersinnigen Ergebnissen, wie sie das Beispiel „ $\varepsilon = 250\mu\varepsilon$ “ zeigt. Es widerspricht den mathematischen Gepflogenheiten, ein Formelzeichen ( $\varepsilon$  für Dehnung) als Maßeinheit zu verwenden.

Anmerkung

Größenverhältnisse sind gekennzeichnet durch die gleiche Einheit im Zähler und im Nenner des Bruches, z. B. m/m: Man könnte in mathematisch korrekter Weise den Bruch kürzen. Dadurch entstünde eine unbenannte Maßzahl. Die physikalische Information über ihre Herkunft ginge verloren, es sei denn, man schriebe immer:  $\varepsilon = \dots 10^{-6}$  und zeigte durch das Formelzeichen die Bedeutung der Maßzahl an. Gerade in der DMS-Technik treffen oftmals verschiedene Größenverhältnisse zusammen; wie z. B. die relative Widerstandsänderung der DMS oder die relative Ausgangsspannung der Wheatstone'schen Brückenschaltung (siehe Beispiel). Um Irrtümern vorzubeugen, ist es ratsam, die Einheitenbezeichnung bei der Maßzahl zu belassen.

Beispiel: Zusammentreffen verschiedener Größenverhältnisse.

Ein Dehnung von	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = 0,001 \frac{\text{m}}{\text{m}}$
erzeugt in einem DMS (k-Faktor = 2)	
eine relative Widerstandsänderung	$\frac{\Delta R}{R_0} = 0,002 \frac{\Omega}{\Omega}$
Dadurch entsteht am Ausgang der Wheatstone'schen Brückenschaltung (Viertelbrücke)	
eine relative Ausgangsspannung	$\frac{U_A}{U_B} = 0,0005 \frac{\text{V}}{\text{V}}$

## 2.2 Die mechanische Spannung ; Definition und Maßeinheit

Als „mechanische Spannung“ bezeichnet man die durch Kräfte verursachte Beanspruchung von Werkstoffen. Sie entsteht üblicherweise infolge äußerer Krafteinwirkung, oftmals aber auch durch Krafteinwirkungen innerhalb eines Werkstoffs oder innerhalb größerer Systeme. Man unterscheidet

- nach ihrer Art: Normalspannungen und Schubspannungen;
- nach ihrer Entstehung: Zug-, Druck-, Biege-, Torsions-, Eigen- und Wärmespannungen.

Die unter b) genannten Spannungen sind ihrer Art nach den unter a) genannten Spannungen zugehörig. Für Festigkeitsbetrachtungen ist die Art der Spannung von Interesse, unabhängig von ihrer Entstehungsursache.

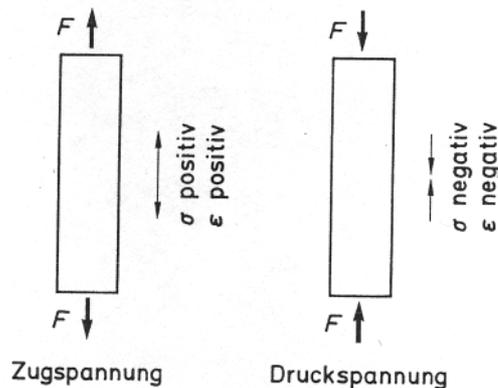
Daneben unterscheidet man nach ihren Wirkungsrichtungen einachsige, zweiachsige oder ebene sowie dreiachsige oder räumliche Spannungszustände.

Mechanische Spannungen sind der direkten Messung nicht zugänglich. (Ausnahme: Das röntgenographische Verfahren. Mit ihm lassen sich Werkstoffspannungen im mikroskopischen Bereich aus den ermittelten Verzerrungen der Kristallgitterstruktur, d. h. aus der relativen Änderung der Atomabstände, ermitteln. Das Verfahren ist beschränkt auf oberflächennahe Schichten von ca. 5 bis 15  $\mu\text{m}$  Tiefe [2-2]).

Spannungen werden entweder nach den Methoden der technischen Mechanik und der Festigkeitslehre oder aus Dehnungsmessungen errechnet. Die Grundlage zu letzterem bildet das Hooke'sche Gesetz (siehe Abschnitt 8).

### 2.2.1 Normalspannungen

Unter diesem Begriff fasst man Zug- und Druckspannungen zusammen. Normalspannungen entstehen, wenn Zugkräfte oder Druckkräfte gegeneinander wirken. Das Bild 2.2-1 erläutert die Entstehung von Zug- bzw. Druckspannungen. Das Formelzeichen für Normalspannungen ist  $\sigma$ .



**Bild 2.2-1: Normalspannungen und ihre Vorzeichen.**

Die im Werkstoff sich aufbauende Spannung wird bei gleichbleibendem Querschnitt um so größer, je größer die Kräfte sind.

Bei gleichbleibender Kraft ändert sich die Spannung im umgekehrten Verhältnis zum Querschnitt:

großer Querschnitt  $\rightarrow$  kleine Spannung,

kleiner Querschnitt  $\rightarrow$  große Spannung.

Damit der im Bild 2.2-1 gezeichnete Stab nicht weggeschoben wird, muss eine gleichgroße, entgegengesetzt wirkende Kraft vorhanden sein. Die Gegenkraft ist oftmals nicht erkennbar, weil sie von Befestigungsteilen oder Unterstützungen aufgebracht wird. Normalspannungen können natürlich auch in bewegten Objekten auftreten, z. B. in der Trosse zwischen Schlepper und gezogenem

Schiff. Dort wirkt der Zugkraft des Schleppers die durch die Wasserströmung entstehende Kraft entgegen.

Die mechanische Spannung  $\sigma$  wird ausgedrückt durch den Quotienten aus der Kraft  $F$  und dem beanspruchten Bauteilquerschnitt  $A$ :

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (2.2-1)$$

Zugspannungen erhalten positive Vorzeichen,  
Druckspannungen erhalten negatives Vorzeichen.

Als Maßeinheit der mechanischen Spannung wurden früher benutzt  
im Maschinenbau vorwiegend  $\text{kp/mm}^2$   
im Bauwesen vorwiegend  $\text{kp/cm}^2$ .

Nach dem „Internationalen Einheitensystem“ (Systeme International d'Unites, kurz SI-System) [2-3 bis 2-5] ergibt sich für mechanische Spannungen die Einheit  $[\text{N/m}^2]$ , für die es noch den besonderen Namen „Pascal“  $[\text{Pa}]$  gibt.

$$1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}.$$

Diese Einheit führt zu außerordentlich großen Zahlenwerten. Deshalb wird die Kraft oft in dezimalen Vielfachen angegeben, wie z. B.  $\text{daN}$  oder  $\text{kN}$ , und die Fläche in dezimalen Unterteilungen, wie z. B.  $\text{cm}^2$  oder  $\text{mm}^2$ . Das ist nach den gesetzlichen Vorschriften zulässig.

$$1 \text{ N/mm}^2 = 100 \text{ N/cm}^2$$

$$1 \text{ N/mm}^2 = 10^6 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ N/cm}^2 = 10^4 \text{ Pa}$$

Gelegentlich findet man auch die Bezeichnung  $\text{daN/mm}^2$ . Das ergibt Zahlenwerte ähnlich den früher üblichen  $\text{kp/mm}^2$ .

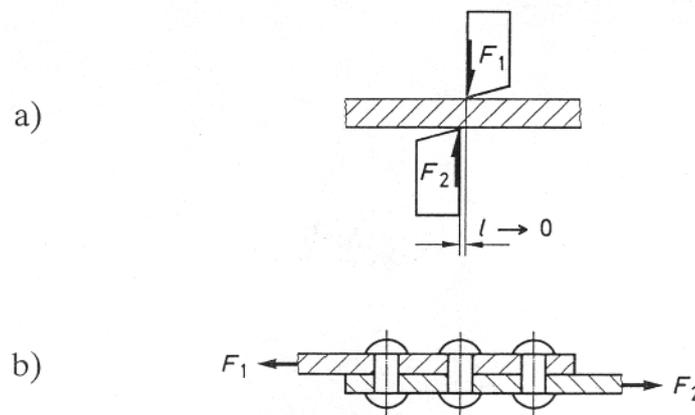
$$1 \text{ daN/mm}^2 = 10 \text{ N/mm}^2 \approx 1 \text{ kp/mm}^2$$

Diese Bezeichnung ist nicht glücklich gewählt und nur als Konzession an alte Gewohnheiten zu verstehen. In dieser Schrift wird bei der Angabe von Zahlenwerten für Spannungen immer die Bezeichnung  $\text{N/mm}^2$  verwendet.

### 2.2.2 Schub- oder Scherspannungen

Bei den Normalspannungen wirken die in entgegengesetzten Richtungen auftretenden Zug- oder Druck-Kräfte immer in der gleichen Achse. Sie versuchen den Werkstoff zu zerreißen oder zusammenzudrücken, je nachdem ob sie voneinander weg oder aufeinander zu gerichtet sind. Von grundsätzlich anderer Art sind die Schub- oder Scherspannungen. Will man sich deren Entstehung

anschaulich vorstellen, dann denke man sich zwei Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  in entgegengesetzter Richtung wirkend, jedoch mit einem sehr kleinen Abstand voneinander, etwa so, wie sie von den Schneiden einer Schere erzeugt werden. Das Bild 2.2-2 zeigt zwei Beispiele.



**Bild 2.2-2: Entstehung von Scherspannungen.**

**a) Beispiel Bleischere**

**b) Beispiel Nietverbindung**

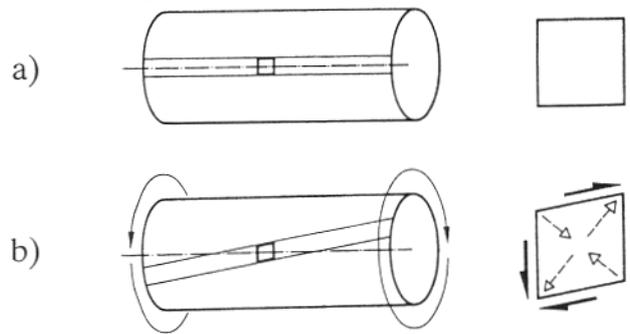
Werden die Kräfte so groß, dass sie die Werkstoff-Festigkeit überschreiten, dann schieben sich die benachbarten Werkstoffteile über den gesamten Querschnitt aneinander vorbei, der Teil wird „abgeschert“.

Im Bild 2.2-2a sind die Kräfte durch Halbpfeile gekennzeichnet, Halbpfeile deshalb, weil der Abstand  $l$  sehr klein ist und sich dem Wert Null nähert. Auch dann, wenn der Abstand  $l$  größer wird (s. Abschn. 8.4.4 bis 8.4.6), spricht man von Schubspannungen. Scher- oder Schubspannungen werden mit dem Formelzeichen  $\tau$  bezeichnet.

Das Beispiel Bild 2.2-2b zeigt eine ganz ähnliche Situation, wie sie bei einer Nietverbindung auftritt.

Schubspannungen wirken im Inneren des beanspruchten Objektes und sind äußerlich nicht erkennbar. Jedoch lassen sich Schubbeanspruchungen, die z. B. bei Torsionsbeanspruchung einer Welle entstehen, an Verzerrungen der Oberfläche (Mantelfläche) nachweisen. Ein Beispiel zeigt das Bild 2.2-3.

Ein auf der Mantelfläche der unbelasteten zylindrischen Welle markiertes quadratisches Flächenelement, das von parallel zur Wellenachse laufenden Mantellinien begrenzt ist, wird nach der Belastung der Welle mit einem Drehmoment zu einem Rhombus verzerrt. Die aufgezeichneten Mantellinien verlaufen immer noch parallel zueinander, jedoch in Form einer sehr steilen Schraubenlinie. Man mag sich den Vorgang folgendermaßen vorstellen:



**Bild 2.2-3: Oberflächenverzerrung infolge Schubbeanspruchung durch**

- a) **Unbelastetes Wellenstück. Mantellinien verlaufen parallel zur Achse; das Oberflächenelement ist quadratisch.**  
 b) **Auf Torsion beanspruchtes Wellenstück. Mantellinien verlaufen schief zur Achse; das Oberflächenelement wird zum Rhombus.**

Die Welle sei aus einer sehr großen Zahl, parallel zur Querschnittsebene angeordneter, kreisförmiger Scheiben zusammengesetzt, von denen jede Scheibe eine Molekülstärke dick ist. Die gegeneinander wirkenden Drehmomente versuchen nun, die Scheiben gegeneinander zu verdrehen (wie bei einer Rutschkupplung). Da die Scheiben aber von ihren Kohäsionskräften elastisch zusammengehalten werden, entsteht nur eine winzige Winkelverschiebung gegeneinander.

Die zwischen den einzelnen Scheiben entstehenden Schubspannungen lassen sich nicht messen. Die Schubspannung  $\tau$  lässt sich aus den beiden Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  berechnen:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}. \quad (2.2-2)$$

Schubspannungen treten immer gemeinsam mit Normalspannungen auf (s. Abschnitt 8.2-3).

Die Hauptnormalspannungen des ebenen (d. h. flächenhaften) Spannungszustandes sind die beiden unter einem Winkel von  $90^\circ$  zueinander stehenden Spannungsextreme (positiv und negativ, Maximum und Minimum) in einer Ebene z. B. in der Oberfläche eines Objektes. Im Beispiel des Bildes 2.2-3 tritt in Richtung der großen Rhombusdiagonale des Flächenelementes eine maximale positive Normalspannung auf, in Richtung der kleinen Diagonale eine negative Normalspannung.

Für Schubspannungen gelten die gleichen Maßeinheiten wie für Normalspannungen.

### 2.2.3 Eigenspannungen, Wärmespannungen

Die Bezeichnungen sagen schon, dass hier die Ursache ihrer Entstehung gekennzeichnet wird. Ihrer Art nach sind es ebenfalls Normal- und Schubspannungen. Was sie von anderen, nach ihrer Entstehungsursache gekennzeichneten Spannungen (z. B. Biegespannungen, Torsionsspannungen) unterscheidet ist die Tatsache, dass sie ohne die Einwirkung äußerer Kräfte entstehen.

So können Eigenspannungen aus inneren Kraftwirkungen im Werkstoff entstehen, z. B. durch ungleiche Volumenänderungen wärmebehandelter Teile beim Härten von Stahl, durch ungleichmäßiges Abkühlen gegossener oder gespritzter Gegenstände aus Metall und Kunststoff, bei geschweißten oder geschmiedeten Teilen, durch mechanische Bearbeitungsvorgänge oder auch durch das Eigengewicht größerer Objekte [2-6]. Eine Abart der Eigenspannungen sind die „Wärmespannungen“. Sie entstehen innerhalb von Systemen, in welchen Teile mit unterschiedlicher Wärmedehnung so miteinander verbunden sind, dass deren freie Wärmedehnung behindert wird, oder infolge ungleichmäßiger Erwärmung. Eigenspannungen und Wärmespannungen belasten den Werkstoff so wie Lastspannungen. Sie setzen seine Belastbarkeit durch von außen einwirkende Kräfte herab. Fragen der Betriebssicherheit von Bauteilen sind deshalb nur dann ausreichend zu beantworten, wenn die Eigenspannungen nach Betrag und Richtung bekannt sind. Ihre Ermittlung ist mit allgemein praktikablen Methoden nur möglich, wenn sie „ausgelöst“ werden und die dabei entstehenden Rückfederungen des Werkstoffs in den entspannten Zustand gemessen werden. Das Auslösen der Spannungen kann auf verschiedene Weise erfolgen.

Bei wissenschaftlichen Untersuchungen geht man gelegentlich so weit, den Prüfling in kleine Teile zu zerlegen und an jedem dieser Teile die Rückfederung zu messen [2-7]. Man erhält so ein vollständiges Bild der Spannungsverteilung, allerdings unter Verlust des Objektes. Deshalb sind solche zerstörenden Methoden für die normalen Aufgaben der Spannungsanalyse ungeeignet. Man benötigt vielmehr Verfahren, die nur geringfügige Eingriffe in das Messobjekt erfordern. Dazu gehören das Bohrlochverfahren ([3-6 und 3-7] und Abschnitt 8.3) sowie das Ringkernverfahren [3-5]. Rosetten für Eigenspannungsmessungen sind im Abschnitt 3.2.2.3 beschrieben.

### 2.2.4 Spannungszustände

Man unterscheidet

- a) den einachsigen Spannungszustand,
- b) den zweiachsigen oder ebenen Spannungszustand,
- c) den dreiachsigen oder räumlichen Spannungszustand.

Der einachsige Spannungszustand ist der einfachste Fall. Er tritt in Zug- und in Druckstäben auf, s. Bild 2.2-1.

Von einem zweiachsigen oder ebenen Spannungszustand spricht man, wenn die Kräfte, welche die Spannungen erzeugen, in zwei zueinander senkrecht stehenden Achsen auftreten. Die Zerlegung der Kraftwirkungsrichtungen in zwei unter  $90^\circ$  zueinander stehende Hauptachsen ergibt sich aus theoretischen Überlegungen. Die Wirkungsrichtungen verschiedener, zwar in der gleichen Ebene, aber unter verschiedenen Winkeln angreifender Kräfte können dabei ganz verschieden sein. Sie lassen sich aber immer in die beiden Hauptrichtungen zerlegen.

Ein dreiachsiger oder räumlicher Spannungszustand liegt vor, wenn die Kräfte in beliebigen Richtungen angreifen. Ähnlich wie beim ebenen Spannungszustand definiert man hier drei Hauptachsen, die alle senkrecht zueinander stehen. Die Dehnungsmessungen beschränken sich notgedrungen auf die zugänglichen Oberflächen der Bauteile und können demzufolge auch nur Informationen über den Spannungszustand in der Bauteiloberfläche vermitteln. Während sich einachsige und ebene Spannungszustände mit Hilfe der Dehnungsmesstechnik, insbesondere mit der Dehnungsmessstreifentechnik auf elegante Weise analysieren lassen, bereitet der räumliche Spannungszustand Probleme insofern, als notwendige Messungen in der dritten Achsrichtung, also ins Innere des Objektes hinein, meist nicht durchführbar sind. In einem dreidimensionalen Körper, der durch äußere Kräfte beansprucht wird, entstehen jedoch die maximalen Spannungen gerade in der Oberfläche! (Ausnahme: Hertzsche Probleme.) Für den Konstrukteur, den für Festigkeitsbetrachtungen im allgemeinen nur die Spannungsmaxima interessieren, genügt deshalb die Ermittlung der Spannungen in der Oberfläche. Ihr Verlauf im Inneren ist von untergeordnetem Interesse.

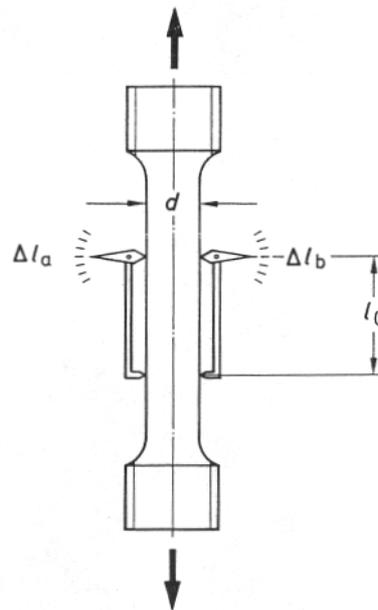
Räumliche Spannungszustände lassen sich aus Dehnungsmessungen nur dann analysieren, wenn auch in der dritten Achsrichtung, also in die Tiefe des Objektes hinein, Dehnungen gemessen werden können. Diese Möglichkeit ist beispielsweise in der Modellmesstechnik zu finden, wenn Dehnungsmessstreifen beim Guss von Kunststoffmodellen mit eingegossen werden können. Im Bauwesen ergeben sich entsprechende Möglichkeiten, wenn Dehnungsmessgeräte beim Schütten von Beton mit eingebettet werden können.

## 2.3 Werkstoffkennwerte

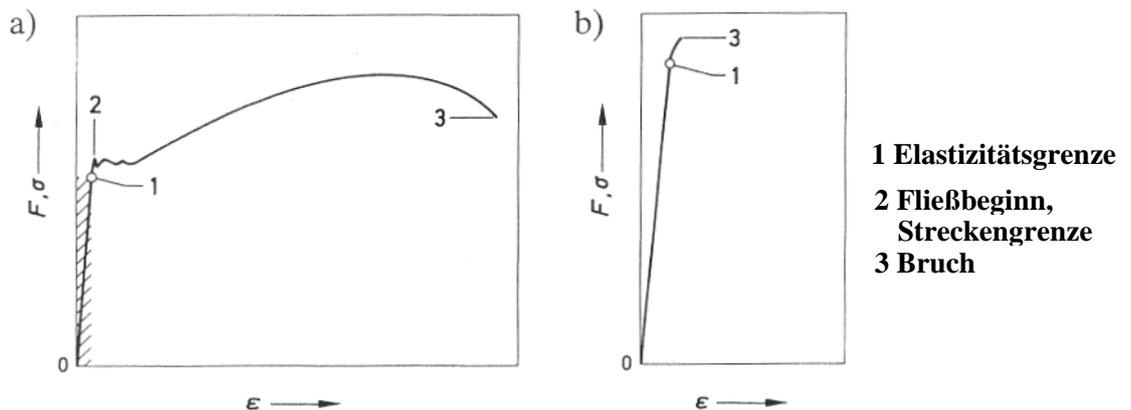
### 2.3.1 Der Elastizitätsmodul, Definition und Maßeinheit

Eine fundamentale Angabe zur Kennzeichnung der mechanischen Belastbarkeit von Werkstoffen ist die Zugfestigkeit. Sie wird im Prüflabor an Proben mit

genormten Abmessungen [2-8] ermittelt. Das Bild 2.3-1 zeigt das dabei anzuwendende Verfahren in schematischer Darstellung.



**Bild 2.3-1:** Schema zur Ermittlung der Zugfestigkeit und des statischen Elastizitätsmoduls von Werkstoffen.



**Bild 2.3-2:** Beispiele von Kraft/Dehnungs- bzw. Spannungs/Dehnungs-Diagrammen.

- a) Kennlinie eines Werkstoffs mit großem  
b) Kennlinie eines spröden Werkstoffs

Die Werkstoffprobe wird in eine Prüfmaschine eingespannt, zügig belastet und die dabei auftretende Werkstoffdehnung  $\epsilon$  in Abhängigkeit von der einwirkenden Kraft gemessen. Das Ergebnis wird in Form eines Diagramms aufgezeichnet. Anstelle der Kraft  $F$  kann man auch die Nennspannung  $\sigma$  auftragen; sie wird nach Gl. (2.2-1) aus dem bei Versuchsbeginn vorhandenen Probenquer-

schnitt  $A_0$  berechnet. Das Bild 2.3-2 zeigt ein Beispiel eines  $F/\varepsilon$ - bzw.  $\sigma/\varepsilon$ -Diagramms. Der Verlauf einer  $\sigma/\varepsilon$ -Kurve ist werkstoffabhängig. So zeigen duktile (plastisch verformbare) Werkstoffe einen großen Fließbereich. Bild 2.3-2a, während spröde Werkstoffe und hochfeste Stähle nicht oder nur sehr wenig fließen, Bild 2.3-2b.

Bei sogenannten „linearelastischen“ Werkstoffen findet man im elastischen Verformungsbereich einen linearen Anstieg der  $\sigma/\varepsilon$ -Kurve. Die Steigung dieses Diagrammteils kennzeichnet die Steifigkeit des Werkstoffs. Sie wird ausgedrückt als das Verhältnis zwischen  $\sigma$  und  $\varepsilon$  und Elastizitätsmodul genannte, Formelzeichen  $E$ .

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (2.3-1)$$

Der Elastizitätsmodul (kurz: E-Modul) wird angegeben mit dem Zahlenwert des  $\sigma/\varepsilon$ -Verhältnisses und mit den Maßeinheiten [Pa] oder [N/cm<sup>2</sup>] oder [N/mm<sup>2</sup>] benannt.

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-4} \text{ N/cm}^2 = 10^{-6} \text{ N/mm}^2 \\ \text{oder } 1 \text{ N/mm}^2 = 10^2 \text{ N/cm}^2 = 10^6 \text{ N/m}^2 = 10^6 \text{ Pa}.$$

Diese Benennung schafft für „Nichteingeweihte“ manches Problem, insbesondere dann, wenn die Forderung nach dem Einheitenkalkül erfüllt werden soll. Streng genommen müsste die Benennung heißen

$$(E) = \left\{ \frac{\sigma}{\varepsilon} \right\} \quad \left[ \frac{\text{N/mm}^2}{\text{m/m}} \right] \quad \text{oder} \quad \left[ \frac{\text{N/cm}^2}{\text{mm}} \right] \quad \text{oder} \quad \left[ \dots \right].$$

Wie in der Mathematik üblich, wird die Benennung der Verhältnisgröße  $\varepsilon$  [m/m] weggekürzt und verschwindet somit. Auf diese Weise bleibt für den E-Modul die gleiche Benennung übrig, wie sie für die Werkstoffspannung  $\sigma$  gilt, sowohl es sich um zwei vollkommen verschiedene Dinge handelt.

Beispiel:

$$E = \frac{70 \text{ N/mm}^2}{1000 \text{ } \mu\text{m/m}} = \frac{70 \text{ N/mm}^2}{10^{-3} \text{ m/m}} = 70000 \frac{\text{N/mm}^2}{\text{m/m}} = 70000 \text{ N/mm}^2$$

Jeder Werkstoff besitzt einen für ihn selbst gültigen E-Modul. Die unterschiedlichen Zahlenwerte ergeben sich aus den unterschiedlichen Steigungen der  $\sigma/\varepsilon$ -Diagramme. Im Bild 2.3-3, das einige Beispiele zeigt, sind nur die linearen Kurventeile gezeichnet.

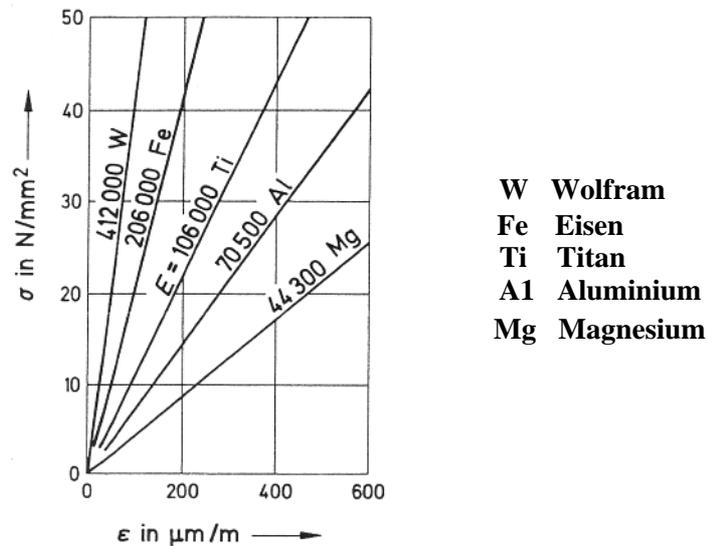


Bild 2.3-3: Beispiel einiger Elastizitätsmoduli

In Tabellenwerken findet man Auflistungen der E-Moduli verschiedenster Werkstoffe. Dazu ist zu bemerken, dass Tabellenwerte immer nur Mittelwerte aus einer größeren Anzahl von Messungen sein können. Infolge von Legierungs-

Werkstoff	$E$ [kN/mm <sup>2</sup> ] (0 ... 100 °C)	Werkstoff	$E$ [kN/mm <sup>2</sup> ] (0 ... 100 °C)
Aluminium	66	Molybdän	330
AlCuMg	77	Monelmetall	156
AlMgSi	69	Nickel	193
AlMg5	68	Rotguss Rg5	93
AlCuNi	70	Stahl C15	204
G-AlSi	75	C35	202
G-AlSiMg	75	C60	200
Bronze SnBz 6	109	41Cr4	203
G-Sn Bz 12	79	X 10 Cr 13	216
AlBz 5	123	X 12 CrNi 188	191
AlBz 8	122	36 % Ni-Stahl	142
FeAlBz 10	123	Titan	103
Kupfer	123	TiAl6V4	108
CeBe (Kupfer-Beryllium)	131	DMS-Klebstoffe	$E$ [kN/mm <sup>2</sup> ] (0 ... 50 °C)
CuNi55/45 (Konstantan)	161	X60 (Acrylharz, gefüllt)	4,5 ... 6
Magnesium	44	Z70 (Zyanacrylat)	3
MgAl 7	43	H (Polyester)	3,5
Messing Ms 58	88	EP 250, EP 310 (Epoxidharz)	2,8
Ms 60	88	Cr 760 (keramischer Kitt)	20 ... 21
Ms 72	88		

Tafe12.3-1: E-Moduli einiger Werkstoffe

modifikationen u. dgl. muss man im konkreten Fall mit Abweichungen von mehreren Prozent vom Tabellenwert rechnen. Wird höhere Genauigkeit gefordert, dann ist eine Messung entsprechend der eingangs erwähnten Methode vorzunehmen.

Weiterhin ist zu bedenken, dass die E-Moduli temperaturabhängig sind.

Die Tafel 2.3-1 gibt als Beispiel für einige gebräuchliche Werkstoffe die Zahlenwerte.

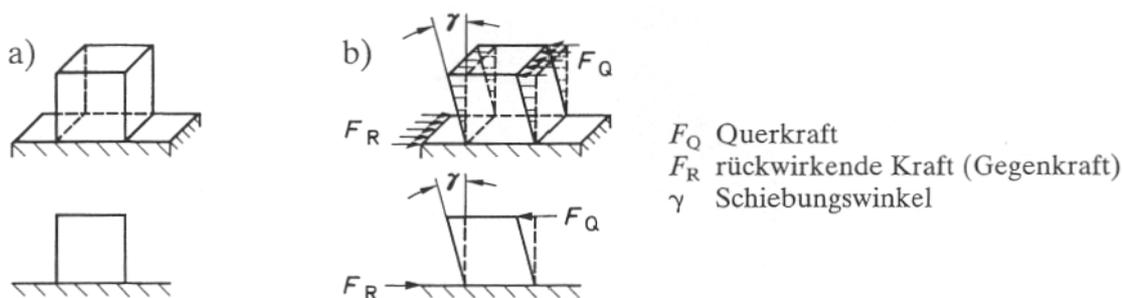
### 2.3.2 Der Gleit- oder Schubmodul

Der Gleit- oder Schubmodul  $G$  vereinfacht die Berechnung der Schubspannung. Er ist kein selbständiger Werkstoffkennwert wie der Elastizitätsmodul  $E$  (Abschnitt 2.3.1) und die Querszahl  $\nu$  (Abschnitt 2.3.3), sondern wird von diesen hergeleitet.

$$G = \frac{E}{2} \cdot \frac{1}{1+\nu} = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 0,385 E \text{ für } \nu = 0,3. \quad (2.3-2)$$

Der Gleitmodul wird, wie der E-Modul, mit  $\text{N/mm}^2$  usw. benannt (Abschnitt 2.3.1). Er beschreibt das Verhältnis der Schubspannung  $\tau$  zu dem im Bogenmaß [rad] gemessenen Schiebungswinkel  $\gamma$ :

$$G = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (2.3-3)$$



**Bild 2.3-4: Lage des Schiebungswinkels  $\gamma$  an einem schubbeanspruchten Werkstoffelement**

- a) unbelastet  
b) belastet

### 2.3.3 Die Poissonzahl

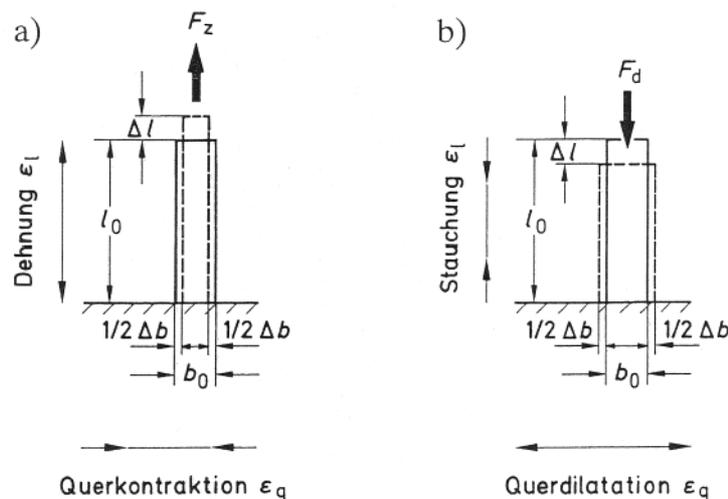
Zieht man an einem Gummiband, dann wird es länger, aber gleichzeitig schmaler und dünner;

drückt man einen Gummikörper, dann wird er kürzer, aber gleichzeitig breiter und dicker.

Der französische Wissenschaftler Simeon Denis Poisson (1781 -1840) hat bei seinen Untersuchungen folgendes festgestellt:

Wird ein Stab mit der Zugkraft  $F_z$  beansprucht, dann dehnt er sich um  $\Delta l/l_0 = \varepsilon_l$  (Längsdehnung); gleichzeitig vermindert sich seine Breite und Dicke um  $\Delta b/b_0 = \varepsilon_q$  (Querkontraktion).  $\varepsilon_l$  ist positiv,  $\varepsilon_q$  ist negativ, Bild 2.3-5a.

Wird ein Stab mit der Druckkraft  $F_d$  beansprucht, dann staucht er sich um  $\Delta l/l_0 = \varepsilon_l$  („negative Längsdehnung“); gleichzeitig vergrößert sich seine Breite und Dicken um  $\Delta b/b_0 = \varepsilon_q$  (Querdilatation).  $\varepsilon_l$  ist negativ,  $\varepsilon_q$  ist positiv, Bild 2.3-5b.



**Bild 2.3-5: Entstehung der Querkontraktion/Querdilatation**  
Erläuterung im Text

Es gilt:

$$\left| \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_q} \right| = m \text{ (Poissonzahl)} \quad (2.3-4)$$

In der Festigkeitslehre wird meist mit dem Kehrwert der Poissonzahl gerechnet, nämlich mit der Querszahl, welcher man ursprünglich das griechische  $\mu$  (my) als Formelzeichen gab. Weil der Buchstabe  $\mu$  in der Technik recht häufig mit anderen Bedeutungen belegt ist, verwendet man zunehmend den Buchstaben  $\nu$  (ny). Derzeit findet man beide Formelzeichen im Schrifttum. In diesem Buch wird einheitlich der Buchstabe  $\nu$  benutzt.

$$\frac{1}{m} = \left| \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} \right| = \nu \text{ (Querszahl)} \quad (2.3-5)$$

Die Querszahl ist werkstoffabhängig und gilt für den elastischen Verformungsbereich des betreffenden Werkstoffs. Ihr Zahlenwert liegt bei Metallen um 0,3. Er kann jedoch von diesem Nährungswert erheblich abweichen, wie die Tafel 2.3-2 zeigt. Bei Kunststoffen liegt  $\nu$  um 0,4; bei inkompressiblen Medien, z. B. Gummi und Wasser, sowie im plastischen Verformungsbereich der Metalle wird  $\nu = 0,5$ .

Werkstoff	$\nu$	Werkstoff	$\nu$
Aluminium-Legierungen	0,33	Silber, gegläht	0,37
Columbium	0,38	hart	0,39
Glas	0,22	Stahl	0,28
Gummi	0,5	Baustahl, warm gewalzt	0,26
Gusseisen, grau	0,25	17-7 PH	0,28
Inconel	0,29	PH 15-7 Mo	0,28
Kupfer	0,33	Invar, 36 % Ni	0,29
Magnesium	0,35	XCrNi 18.9 (SS 304)	0,305
Messing	0,33	XCrNiMo 18.12 (SS 316)	0,33
Molybdän	0,32	Titan	0,34
Monel	0,32	Vanadium	0,36
Nickel	0,31	Wolfram	0,284
Platin	0,39	Zircaloy 2	0,39
Rhenium	0,49		

**Tafel 2.3-2: Elastische Querszahlen  $\nu$  einiger Werkstoffe**

Anmerkung:

Die Tafel 2.3-2 enthält Zahlenwerte für die Querszahl  $\nu$  aus verschiedenen Quellen. Die dabei angetroffene Streubreite der Zahlenwerte lässt es geraten sein, höheren Genauigkeitsforderungen die Querszahl im Versuch zu ermitteln, z. B. durch Messung der Längsdehnung und der Querkontraktion unter identischen Bedingungen mit DMS. Dabei sollten die Messwerte nach der im Abschnitt 7.5 beschriebenen Methoden für Fehler infolge der Querempfindlichkeit der DMS korrigiert werden.

Wichtiger Hinweis: Die Querszahl  $\nu$  wird immer nur mit ihrem Zahlenwert angegeben; d. h. ohne das negative Vorzeichen, auch in Tabellenbüchern. Das gilt auch für die Tafel 2.3-2. Diese historisch zu begründende Eigenart muss bei der Aufstellung von Formeln berücksichtigt werden.

### 2.3.4 Die thermische Längenausdehnung

Jeder Körper ändert seine Abmessungen, wenn sich seine Temperatur ändert.

Erwärmung erzeugt Ausdehnung oder Expansion,  
Abkühlung erzeugt Zusammenziehung oder Kontraktion.

Temperaturbedingte Längenänderungen erzeugen keine mechanische Spannungen im Werkstoff; wenn

- die freie Expansion oder Kontraktion der Objekte nicht behindert wird, z. B. durch Einspannungen,
- das Objekt in seiner ganzen Ausdehnung völlig gleichmäßige Temperatur hat

Werkstoff	$\vartheta$ [°C]								
	-196	100	200	300	400	500	600	800	
<b>Metalle</b>									
Aluminium (99,5 %)	-22,6	23,8	24,5	25,5	26,5	27,4	28,3		
AlZnMgCu 1,5	-17,8	23,4	24,4	22,5					
Duralumin (95 Al; 0,04 Cu; Rest Mg, Mn, Si, Fe)		23,5	24,5	26,0	26,7	27,3			
Blei	-26,8	29,0	29,6	31,1					
Bronze (85 Cu; 95 Mn, 6 Sn)	-14,9	17,5	17,9	18,3	18,8	19,2			
Gusseisen	- 8,4	10,4	11,1	11,6	12,3	12,9	13,5	14,7	
Konstantan (60 Cu; 40 Ni)	-11,9	15,2	15,6	16,0	16,4	16,7			
Kupfer	-13,9	16,5	16,9	17,2	17,7	18,1	18,5		
Magnesium	-21,1	26,0	27,1	27,9	28,8	29,8			
Messing (62 Cu; 38 Zb)	-16,4	18,4	19,3	20,1	21,0				
Molybdän	- 4,2	5,2	5,4	5,5	5,6				
Nickel	-10,0	13,0	13,6	14,3	14,9	15,2	15,5	16,1	
Stahl									
Flussstahl	- 8,8	12,0	12,6	13,1	13,6	14,1	14,7		
Invarstahl (64 Fe; 36 Ni)		1,5	3,8	5,3	7,8	9,4	10,8	13,1	
1.4301 (X5CrNi 18.9)		16,1	17,1						
Titan (TiAl6 V4)		8,4	8,6	8,9	9,0	9,2			
Wolfram	- 3,8	4,5	4,5	4,7	4,7	4,5	4,5	4,5	
<b>Glas</b>									
Jenaer 16 III	- 5,9	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3			
Jenaer 1565 III		3,5	3,6	3,7	3,9	4,1			
Quarzglas	+ 0,16	0,50	0,60	0,63	0,62	0,62	0,6	0,56	
Zerodur® Glaskeramik	- 0,18	0,02	0,02						
<b>Kunststoffe</b>	$\vartheta = 50$ °C						$\vartheta = 50$ °C		
Acetylzellulose	80 – 90		Polyamid				90 – 100		
Acrylharz	70 – 80		Polyester				100 – 150		
Epoxidharz	60		Polystyrol				60 – 80		
Phenolharz	50 – 80		Polystyrol schlafest				80 – 100		
Polyacetal	90		Polyurethan				190		
Polyethylen hohe Dichte	160 – 180		Polyvinylchlorid				70		
Polyaethylen niedr. Dichte	230		Polyvinylchlorid schlagfest				80 – 100		

**Tafel 2.3-3: Mittlere thermische Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  für verschiedene Werkstoffe für unterschiedliche Temperaturbereiche zwischen 20 und  $\vartheta$  °C in  $10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{m}} \cdot \frac{1}{\text{K}}$ .**

Wird die Wärmedehnung behindert, dann entstehen Wärmespannungen im Werkstoff (s. Abschnitt 2.2.3 und 8.4.7).

Man definiert eine Längenausdehnung, eine Flächenausdehnung und eine Raumausdehnung. Für die Dehnungsmesstechnik ist die thermische Längenausdehnung von Interesse.

Der Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha$  (auch linearer Wärmeausdehnungskoeffizient genannt) gibt die relative Längenänderung an in  $10^{-6}$  m/m je K:

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \cdot \frac{1}{\Delta\vartheta} = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta\vartheta} \text{ in } \left[ \frac{\text{m/m}}{\text{K}} \right] = \left[ \frac{1}{\text{K}} \right] \quad (2.3-6)$$

$l_1 = l_0 =$  Anfangslänge vor der Temperaturänderung (Bezugslänge)

$l_2 =$  Endlänge nach der Temperaturänderung

$\Delta l =$  Längenänderung infolge der Temperaturänderung

$\Delta\vartheta =$  Temperaturänderung (positiv bei Erwärmung, negativ bei Abkühlung)

Auch hierbei wird das Verhältnis m/m gekürzt, so dass die Maßzahl nur noch mit 1/K benannt wird.

Man beachte: Der Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha$  ist materialabhängig und temperaturabhängig. Deshalb findet man in Tabellen unterschiedliche Zahlenwerte für unterschiedliche Temperaturspannen. Die sich dadurch ergebenden Unterschiede der Zahlenwerte dürfen nicht als sprunghafte Veränderung des Ausdehnungsverhaltens der Werkstoffe gedeutet werden.

## 2.4 Beanspruchungsarten der DMS

Die Art, wie ein DMS während einer Messung beansprucht wird, hat Rückwirkungen auf seine Eigenschaften. Deshalb werden für manche Eigenschaften verschiedene Grenzwerte angegeben, z. B. unterschiedliche Temperaturgrenzen, unterschiedliche Dehnbarkeitsgrenzen u. a. Hier soll gesagt werden, wie die Begriffe „statische Messung“, „quasistatische Messung“ und „dynamische Messung“ in der DMS-Literatur und in Prospektangaben zu interpretieren sind.

### 2.4.1 Statische Messungen (nullpunktbezogen)

„Der Begriff statische ‚Messung‘ umfasst in der DMS-Technik alle Messungen zeitlich konstanter Dehnungen oder Dehnungsanteile. Er wird also z. B. auch für einen zeitlich konstanten Vorgang verwendet, dem ein schwingender überlagert ist.“ (Zitat nach [2-1]). Auf den DMS bezogen bedeutet dies, dass Ver-

fälschungen des Messsignals infolge von Störeinflüssen aus dem DMS in einer (meist nicht näher bezeichneten) Zeitspanne einen akzeptablen Fehler nicht überschreiten. Das Messsignal kann dem zu Beginn der Messung vorhandenen Nullpunkt zugeordnet werden. Zur Bezeichnung dieser Qualitätsmerkmale des DMS wäre es sinnvoll, von „nullpunktbezogenen Messungen“ zu sprechen.

#### 2.4.2 Quasistatische Messungen

„Quasistatische Messungen“ nennt man langsam veränderliche Vorgänge, deren Änderungsgeschwindigkeit so klein ist, dass ein Anzeigegerät noch ohne besondere Hilfsmittel mit genügender Genauigkeit abgelesen werden kann.

#### 2.4.3 Dynamische Messungen (nicht-nullpunktbezogen)

„Alle Messungen veränderlicher Dehnungsvorgänge, bei denen lediglich die dynamische Komponente ermittelt wird, z. B. die Amplitude einer Schwingung, gelten als dynamische Messung.“ (Zitat nach [2-1].)

Diese Definition verdient besondere Beachtung. Wenn bei technischen Daten von DMS für „dynamische Messungen“ andere Angaben gemacht werden als für statische Messungen, dann gelten diese Werte nur für die schnellverlaufenden Vorgänge, bei welchen sich zeitliche Veränderungen des DMS nicht auswirken können. Wenn einem Schwingungsvorgang ein statischer Grundwert oder Mittelwert zugeordnet ist, dann gelten die Grenzen für statische, d. h. „nullpunktbezogene“ Messungen, wenn dieser Grundwert oder Mittelwert ebenfalls bestimmt werden muss. Es wäre sinnvoller, anstatt von „dynamischen Messungen“ von „nicht-nullpunkt bezogenen Messungen“ zu sprechen.

### 3 Der Dehnungsmessstreifen, Auswahlkriterien

Vielfältig wie die Aufgaben, die an DMS gestellt werden, und zahlreich wie die Einwirkungen, denen DMS während ihres Einsatzes unterliegen, sind auch die Gesichtspunkte, die bei der Auswahl eines DMS-Typs aus dem Herstellerangebot zu berücksichtigen sind. Es gibt keinen DMS, der allen Anforderungen optimal gerecht würde. Aus diesem Grunde werden zahlreiche verschiedene DMS-Typen angeboten und im Bedarfsfall durch Sonderausführungen ergänzt. Es ist eine Frage der Geschäftspolitik des Herstellers, ob ein Programm in übersichtlicher Größe gehalten oder zur Mammutgröße erweitert wird. Mit einem wohldurchdachten Sortiment überschaubaren Umfangs lassen sich die meisten Problemstellungen lösen, ohne zu Sonderanfertigungen Zuflucht nehmen zu müssen. Gleichzeitig erleichtert man damit dem Anwender die Auswahl. Das gilt besonders für Anwender mit durchschnittlicher oder geringer Erfahrung. Es hat sich gezeigt, dass mit einer kleinen Kollektion von vielleicht zwei Dutzend DMS-Typen die Hälfte aller Messaufgaben gelöst werden kann.

Die nachfolgenden Ausführungen sollen es dem Interessenten ermöglichen, nach logischen Gesichtspunkten einen geeigneten DMS-Typ auszuwählen. Dass es dabei dennoch zu widerstreitenden Argumenten kommen kann, die zum Kompromiss zwingen, liegt in der Natur der Technik und ist keineswegs allein für die DMS-Technik typisch.

Der Verfasser hat oft erfahren, dass ein Anwender nur sehr vage Vorstellungen von dem hatte, was an seiner Messstelle passieren wird. Eine gründliche Überlegung vor Beginn der Messung wird manchen kostspieligen Fehlschlag vermeiden helfen und manchmal sogar zu besseren Lösungen führen. Die hier vorgestellte Auswahl-Systematik verlangt vom Anwender eine Analyse seiner Messaufgabe. Um sie anwenden zu können, müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Voraussetzung: Die Messaufgabe muss in ihren Zielen klar und in den Einzelheiten des Ablaufs und den sie beeinflussenden Randbedingungen bekannt sein.
2. Voraussetzung: Die Eigenschaften der DMS müssen bekannt sein.

Als eine Entscheidungshilfe zur Erfüllung der 1. Voraussetzung soll die Tafel 3.0-1 dienen. In ihr sind in fünf Gruppen die wesentlichsten Gesichtspunkte, die auf die Wahl eines DMS-Typs Einfluss haben können, als Stichworte aufgeführt. Die Tafel mag als eine Art, „Checkliste“ dienen, eine Hilfe für Anwender, damit kein wichtiger Punkt übersehen wird. Je sorgfältiger alle Umstände und Rand-

1.	<b>Messaufgabe</b> Primär: Dehnungsmessung Sekundär: experimentelle Spannungsanalyse – Messgrößenaufnehmerbau – Betriebsüberwachung – Sicherheitseinrichtungen
2.	<b>Mechanische Bedingungen an der Messstelle</b>
2.1	<b>Spannungszustand</b> einachsig – zweiachsig – Hauptrichtung bekannt – unbekannt
2.2	<b>Topographie des Spannungsfeldes</b> homogen – inhomogen – schroff veränderlich (Kerbspannungen) Mittelwert- oder Spitzenwertbestimmung
2.3	<b>Art der Beanspruchung</b> statisch: Betrag – Richtung (positiv, negativ) – Anzahl der Belastungen dynamisch: stoßartig – stochastisch – zyklisch – Wechsellast – Schwelllast (positiv, negativ) – Amplitude – Anzahl Lastspiele – Messwerte nullpunktbezogen – nicht nullpunktbezogen
2.4	<b>Verhältnis Nutzgröße zu Störgröße</b> z. B. Normalkraft als Nutzgröße mit überlagertem Biegemoment als Störgröße
3.	<b>Nebenbedingungen</b>
3.1	<b>Dauer der Messung</b> einmalig – kurzzeitig – wiederholt kurzzeitig – langfristig – erwünschte Betriebsdauer – erwünschte Lebensdauer der Applikation
3.2	<b>Temperatur</b> Wert – Bereich (vor, während und zwischen den Messungen) – Änderungsgeschwindigkeit – einseitige Strahlung – Wärmedehnungskoeffizient des Bauteilwerkstoffes
3.3	<b>Störeinflüsse</b> Intensität – Einwirkungsdauer
3.3.1	Luftfeuchte – Wasser – Druckwasser – Dampf – Eis
3.3.2	Öl (Transformatoröl, Parafinöl, Maschinenöl, Hydrauliköl)
3.3.3	Chemikalien (fest, flüssig, gasförmig, aggressiv, inert)
3.3.4	Druck – Vakuum
3.3.5	Elektrische Felder – magnetische Felder – Energiefluss (z. B. Schweißstrom, Blitzschlag)
3.3.6	Energiereiche Strahlung
3.3.7	Äußere Gewalt (Stoß, Schlag, Erddruck, große Beschleunigung)
4.	<b>Elektrische Bedingungen an der Messstelle</b>
4.1	<b>Schaltung der Messstelle</b> Viertelbrücke – Dreileiterschaltung – Halbbrücke – Zweiviertelbrücke – Vollbrücke
4.2	<b>Speisung der DMS</b> Gleichspannung – Wechselspannung (Trägerfrequenz) – Potential gegen Masse (Erde) – Dauer-/Impulsspeisung (Zeit – Tastverhältnis)
4.3	<b>Kabel</b> Länge – Widerstand – Isolation – Kapazität – Beständigkeit gegen äußere Einwirkungen (mechanische, thermische, chemische) – Verbindungselemente (Stecker, Kabeldurchführungen)
5.	<b>Applikationsbedingungen</b>
5.1	<b>Bauteilwerkstoff</b> Bearbeitbarkeit – Klebe- oder ggf. Schweißbarkeit
5.2	<b>Applikationsmöglichkeiten</b> Zugänglichkeit – Einsatz von Sandstrahl o. a. Oberflächenbehandlung – Lösungsmittel- und Temperaturbeständigkeit
5.3	<b>Leitungsführung</b>
5.4	<b>Platzverhältnisse</b> DMS – Kabel – Abdeckmittel – Schutzkappen

Tafe13.0-1: Schema zur Analyse der Bedingungen, denen eine DMS-Messstelle genügen muss.

bedingungen einer Messung vorab erkundet werden, um so besser lässt sich der erforderliche Aufwand abschätzen und um so größer ist die Sicherheit gegen Misserfolge. Zwar sind Überraschungen durch unvorhersehbare Ergebnisse nie ganz auszuschließen, sie lassen sich aber auf ein Minimum begrenzen.

Zur **2.Voraussetzung**, einen optimalen DMS zu wählen, gehört die Kenntnis der DMS-Eigenschaften.

Die Ermittlung der DMS-Kenngrößen erfolgt nicht überall nach den gleichen Methoden, so dass die Ergebnisse möglicherweise unterschiedlich zu interpretieren sind. Diesem Zustand abzuweichen und zu einem einheitlichen Messverfahren zu kommen, ist der Zweck der Richtlinie 2635, die von der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Regelungstechnik erarbeitet und veröffentlicht wurde [2-1]. Bestrebungen zu einer internationalen Angleichung sind im Gange. Eine Erläuterung zur Zielsetzung und zum Inhalt der Richtlinie ist in [3-1] gegeben. Individualdaten werden in Form von Datenblättern jeder DMS-Packung beigelegt; serienspezifische Angaben sind in Prospektunterlagen enthalten. Im Abschnitt 3.3 (Technische Daten) sind weitere Angaben und Erfahrungswerte zu finden.

Ebensowenig, wie alle Störeinflüsse gleichzeitig auftreten, braucht man auch nicht alle Eigenschaften gleichzeitig zu beurteilen, sondern nur die, welche mit den zuvor (gegebenenfalls unter Verwendung der Tafel 3.0-1) ermittelten Einsatzbedingungen einen Zusammenhang haben. Sinngemäß gilt das auch für die Applikationsverfahren und für Abdeckmittel zum Schutze der Messstelle gegen äußere Einwirkungen mechanischer oder chemischer Art. Hier gilt es nicht nur, die Eignung zu überprüfen, sondern auch die Anwendbarkeit.

### 3.1 Anwendungsbereiche

Grundsätzlich kann man mit allen DMS sowohl die Aufgaben der experimentellen Spannungsanalyse als auch des Messgrößenaufnehmerbaus befriedigen. Dennoch gibt es gewisse Unterschiede zwischen verschiedenen DMS-Serien, welche sie für die eine oder andere Nutzungsart besonders geeignet machen.

#### 3.1.1 Spannungsanalyse, Modellmesstechnik, Biomechanik

Für die experimentelle Spannungsanalyse, wozu die Modellmesstechnik und die Biomechanik zählen, sind besonders robuste und flexible DMS von Vorteil, die auch unter erschwerten Bedingungen noch problemlos anzuwenden sind. DMS mit dem Kunststoff „Polyimid“ als Trägerwerkstoff für das Messgitter und mit dem Serienkennbuchstaben „Y“ sind hier am Platze. Diese Serie enthält eine große Anzahl unterschiedlicher DMS-Typen, mit denen die vielgestaltigen Aufgabenstellungen der Spannungsanalyse zu lösen sind.

Daneben gibt es zahlreiche Spezialausführungen, z. B. Bohrlochrosetten und Ringkernrosetten zur Bestimmung von Eigenspannungen in Bauteilen; DMS-Ketten zur Untersuchung der Spannungsverteilung an kompliziert gestalteten Bauteilen; DMS mit metallischem Träger, die durch Punktschweißen am Messobjekt befestigt werden, und viele andere. Darüber geben die gültigen DMSProspekte Auskunft.

### 3.1.2 Messgrößenaufnehmerbau

Im Messgrößenaufnehmerbau ist diese Typenvielfalt nicht notwendig. Statt dessen werden dort meist höhere Ansprüche an die Messgenauigkeit gestellt. DMS, die auch den extremen Genauigkeitsansprüchen der eichfähigen Wägezellen genügen, sind von gleicher Art wie die DMS der Serie „G“. Der Messgitterträger besteht aus glasfaserverstärktem Phenolharz.

Bei ausreichendem Bedarf können spezielle Ausführungen von DMS auch als Sonderanfertigung hergestellt werden. Darüber sind Vereinbarungen mit dem Hersteller erforderlich.

Die Serie „K“ wurde speziell für die Belange des Messgrößenaufnehmerbaus entwickelt. Über ihre Eigenschaften und Anwendungen unterrichtet eine gesonderte Veröffentlichung.

Bei ausreichendem Bedarf liefert HBM auch Sonderausführungen, die für bestimmte Aufgaben optimal ausgelegt sind. Modernste Einrichtungen zur Herstellung der Negative im eigenen Hause stehen zur Verfügung [3-51]. Sie erlauben die volle Nutzung der vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten, welche die Foto-Ätz-Technik zur Fabrikation von Folien-DMS anbietet. Damit soll der Anwender aber nicht verführt werden, sich unbedingt Sonder-DMS anfertigen zu lassen. Es bestünde auch ein Widerspruch mit der eingangs getroffenen Feststellung, dass die meisten Bedarfsfälle mit einer kleinen Kollektion von DMS-Typen zu befriedigen sind. Sonder-DMS sind nur angebracht, wenn bestimmte Vorteile oder Bedingungen zu erfüllen sind. In solchen Fällen wird eine Anfrage mit möglichst genauer Schilderung des Bedarfsfalles empfohlen. Gegebenenfalls kann mit einer Form aus dem Fundus der vorhandenen Spezialnegative eine Lösung gefunden werden.

## 3.2 Bauformen der DMS

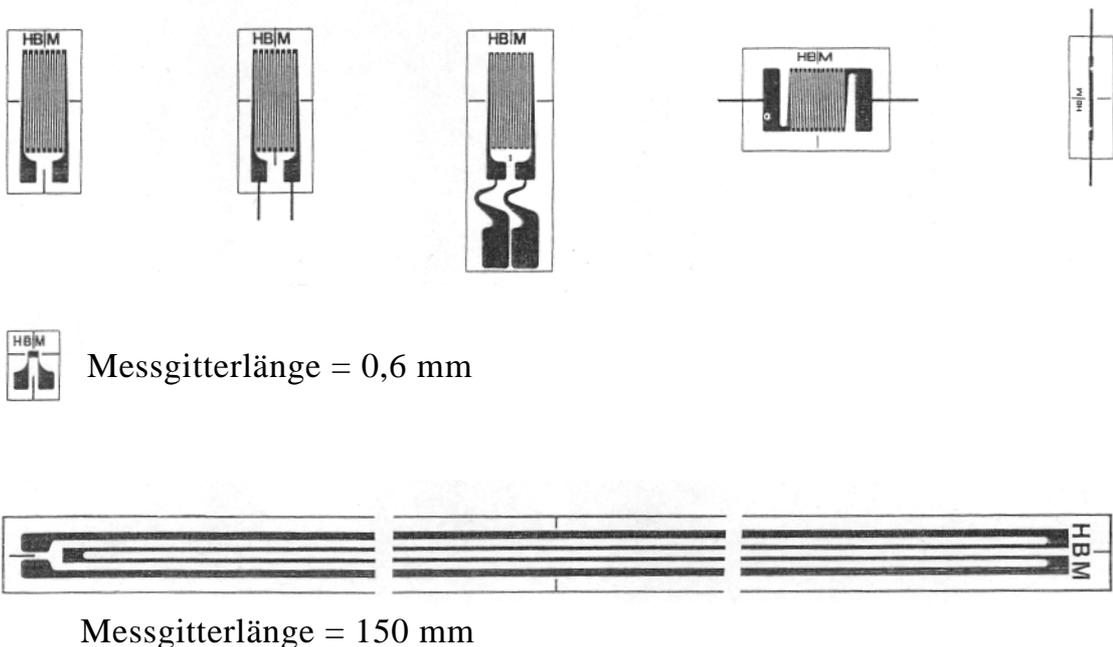
DMS werden in verschiedenen Abmessungen und Formen angeboten. Neben unterschiedlichen Messgitterlängen findet man unterschiedliche Gestalt und Lage der Anschlüsse. Ferner unterscheidet man sogenannte Linear-DMS in einfacher und doppelter (paralleler) Anordnung, X-Rosetten mit unter  $90^\circ$

zueinander angeordneten Messgitterachsen, R-Rosetten mit jeweils 3 unter bestimmten Winkeln zueinander angeordneten Messgitterachsen, DMS-Ketten und zahlreiche andere Spezialformen.

Die Vielfalt der Abmessungen und Formen ist die Folge der notwendigen Anpassung an die unterschiedlichsten Aufgabenstellungen. In den nachfolgenden Abschnitten werden Kriterien zur Auswahl eines geeigneten DMS-Typs behandelt.

### 3.2.1 Messgitterlänge

Das Bild 3.2.1 zeigt in schematischer Darstellung eine Auswahl unterschiedlich langer DMS mit z. T. unterschiedlicher Anordnung der Anschlüsse.



**Bild 3.2-1: Einige typische Messgitterformen sogenannter „Linear-DMS“.**

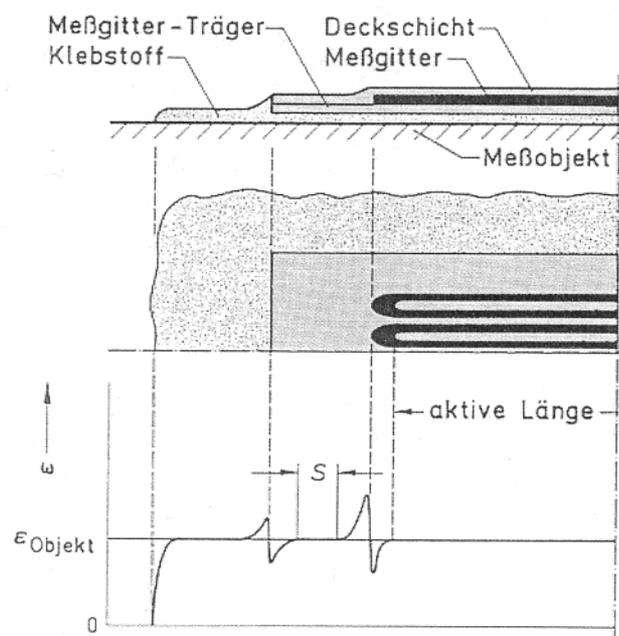
#### 3.2.1.1 Homogenes Dehnungsfeld

Ein erstes Kriterium ist der am Messobjekt verfügbare Platz. Bei ausreichender Objektgröße sind DMS mit 3 bis 6 mm Messgitterlänge optimal, sowohl von ihren Qualitätsmerkmalen her als auch, und vorzugsweise, im Hinblick auf ihre einfache Applikation.

Die Anordnung der Anschlüsse seitlich vom Messgitter und extrem schmale Messgitterausführungen nehmen auf ungünstige Platzverhältnisse an der Applikationsstelle Rücksicht.

Die oftmals anzutreffende Vorstellung, dass die Empfindlichkeit eines DMS von seiner Länge abhänge, ist falsch. Das Messsignal eines metallischen DMS ist der relativen Längenänderung (= Dehnung) proportional und nicht der absoluten Längenänderung. Insofern hat die absolute Länge des DMS keinen Einfluss auf dessen Empfindlichkeit. Dennoch sollte man extrem kleine DMS nur dort anwenden, wo eine technische Notwendigkeit dazu gegeben ist (z. B. bei Kerbspannungsuntersuchungen). Eher sollte man sich überlegen, ob man durch Beschneiden des Messgitterträgers einen großen DMS an den verfügbaren platz anpassen kann. Die Frage lautet dann: Darf man am DMS etwas abschneiden? Antwort: Man darf, aber man muss wissen, wo, und muss mögliche Konsequenzen kennen.

Dazu ein kleiner Exkurs in die Mechanik der Dehnungseinleitung in das Messgitter des DNIS (Bild 3.2-2).



**Bild 3.2-2: Die Dehnungseinleitung in das DMS-Messgitter**  
(schematisch) Erläuterungen im Text

Es wird vorausgesetzt, dass das Messobjekt mit dem Betrag  $\epsilon_{\text{Objekt}}$  gleichförmig gedehnt wird. Diese Dehnung muss über die Klebstoffschicht und den Messgitterträger auf das Messgitter übertragen werden. Dazu sind Kräfte notwendig, die dem Messobjekt entnommen werden. Bei nicht zu dünnen Messobjekten sind die entnommenen Kräfte im Vergleich zu den im Objekt wirksamen Kräfte vernachlässigbar klein.

Zum Aufbau der vollen Messobjekt-Dehnung in den einzelnen Schichten der Applikation bis hin zum Messgitter des DMS sind gewisse Einleitungsstrecken notwendig. Jeweils beim Übergang von einer Schicht zur nächsten entsteht eine solche Einleitungsstrecke, also

- vom Bauteil in die Klebstoffschicht,
- von der Klebstoffschicht in den Messgitterträger,
- vom Messgitterträger in das Messgitter,

jeweils am Anfang und am Ende. Die Länge der Einleitungsstrecken ist von der Dicke der einzelnen Schichten und von der Steifigkeit (dem E-Modul) ihres Werkstoffs abhängig. In dem Diagramm wird gezeigt, wie der Einleitungsphase eine Strecke folgt, in welcher die Messobjektdehnung und die Partialdehnung der DMS-Teile einander gleich sind. An den Übergangsstellen von einem DMS-Teil in den nächsten entstehen Dehnungsüberhöhungen, welche das Nachhinken des folgenden Teiles ausgleichen.

Der Messgitterträger - um ihn geht es im wesentlichen hier - kann nötigenfalls um die im Diagramm mit dem Buchstaben „S“ gekennzeichnete Strecke gekürzt werden, ohne dass dies Rückwirkungen auf die Eigenschaften des DMS hätte. Wird er mehr und mehr gekürzt, dann wird sich die Dehnungseinleitungsstrecke bis in den Bereich der „aktiven“ Messgitterlänge erstrecken. Das führt zu einer scheinbaren Verminderung der Dehnungsempfindlichkeit, die durch den k-Faktor (siehe Abschnitt 3.3.1) ausgedrückt wird. Dieser Einfluss ist bei DMS mit langem Messgitter nur gering, bei sehr kurzen DMS kann eine Empfindlichkeitsminderung von wenigen Prozent entstehen. Zu starkes Kürzen der Dehnungseinleitungs-Strecke des Messgitterträgers kann sich außerdem nachteilig auf das Kriechen des DMS auswirken (siehe Abschnitt 3.3.9).

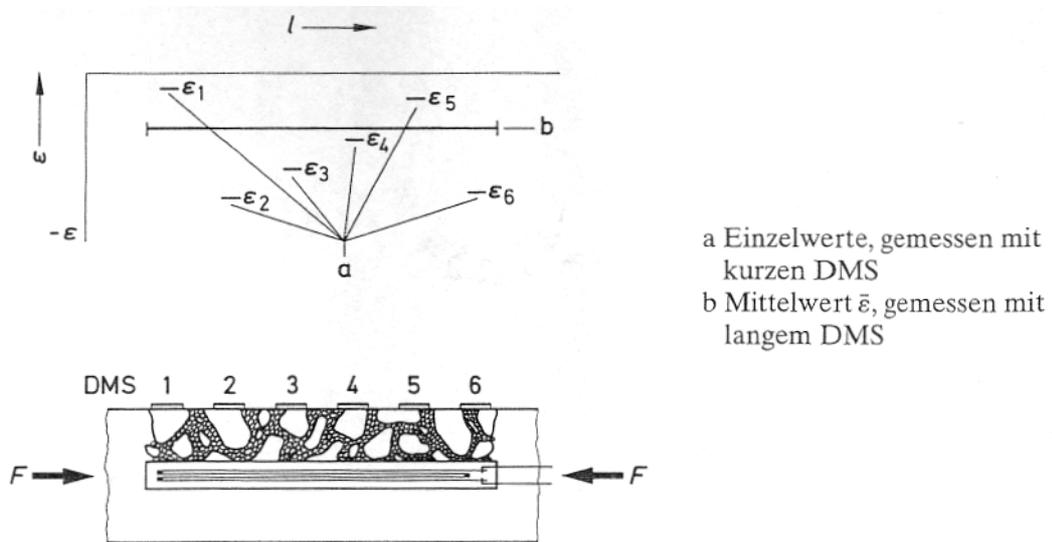
Bei Kunststoffen (Klebstoffen, Messgitterträger-Werkstoffen) ist der E-Modul temperaturabhängig. Das bedeutet, dass bei höherer Temperatur die Einleitungsstrecken länger werden und umgekehrt. Darauf ist gegebenenfalls zu achten. Als Minimum für den Überstand der Trägerfolie über das Messgitter hinaus sollten 1 bis 2 mm eingehalten werden.

Seitliches Beschneiden des DMS - parallel zur Messrichtung - hat einen nur sehr geringfügigen Einfluss auf die Querempfindlichkeit des DMS (siehe Abschnitt 3.3.3). Da die Querempfindlichkeit moderner DMS ohnedies sehr klein ist, kann man diesen Einfluss vernachlässigen und die DMS bedenkenlos bis dicht an die seitlichen Ränder des Messgitters heran beschneiden.

### 3.2.1.2 Inhomogenes Dehnungsfeld

Der DMS bildet den arithmetischen Mittelwert des unter seinem Messgitter vorhandenen Dehnungszustandes. Davon ist auszugehen bei der Beantwortung der Frage nach der zweckmäßigsten Messgitterlänge.

Wird der Mittelwert gesucht, dann verwende man lange Messgitter.  
 Charakteristisches Beispiel: Messungen an Beton (evtl. auch an Holz, faserverstärkten Kunststoffen u. ä.). Mit kurzen DMS würde man die Partialdehnungen erfassen, die im Bereich der Kiesel kleiner, im Bereich des Zementsteins größer wären als der Durchschnittswert [3.2], Bild 3.2-3.



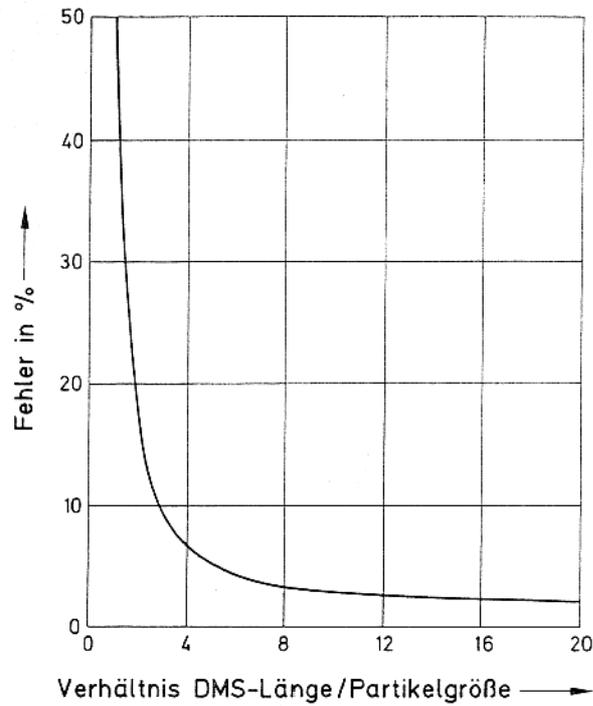
**Bild 3.2-3: Anwendungsbeispiel für DMS mit langem Messgitter: Mittelwertbildung bei inhomogenem Werkstoff, z. B. Beton**

Das Verhältnis zwischen minimalen und maximalen Dehnungswerten kann bei Beton zwischen 1:3 bis 1:15 liegen, je nach Art der verwendeten Zuschlagstoffe. Einen ausreichend gemittelten Wert bekommt man, wenn die Messgitterlänge mindestens das Vierfache, besser das Fünffache der größten Zuschlagkörnung beträgt. Das Diagramm Bild 3.2-4 zeigt die zu erwartenden Messfehler in Abhängigkeit vom Verhältnis DMS-Länge/Partikelgröße.

Das Gegenteil gilt, wenn der Spitzenwert oder der örtliche Dehnungszustand in einem inhomogenen Spannungsfeld gesucht wird, beispielsweise das Maximum einer Kerbspannung. Hier sind kurze Messgitter am Platze. Hier würde ein langer DMS einen unerwünschten Mittelwert bilden.

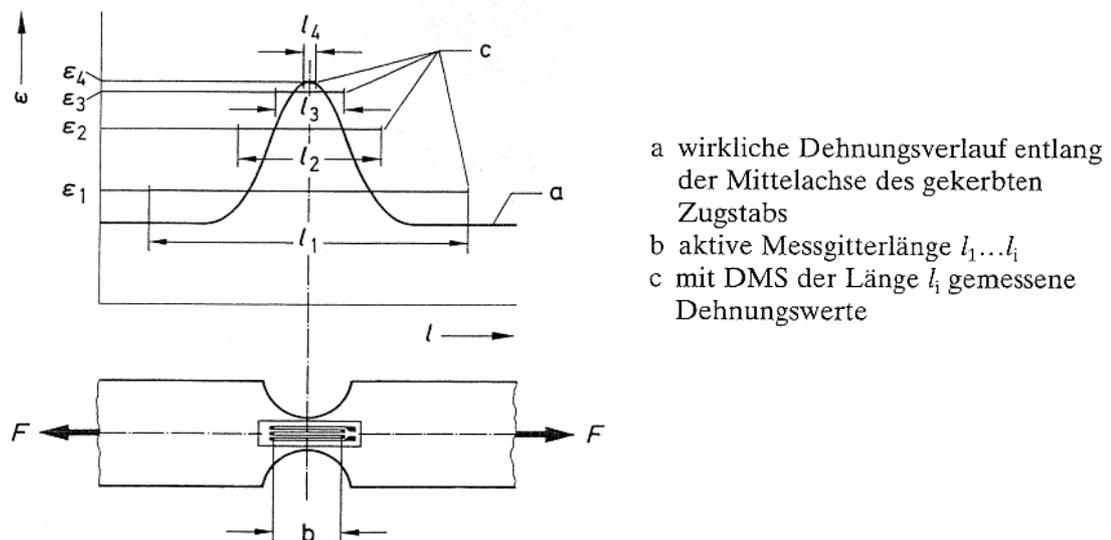
In dem Diagramm Bild 3.2-5 wird schematisch gezeigt, wie Messwert und Messgitterlänge voneinander abhängen. Die Kurve soll den tatsächlichen Dehnungsverlauf entlang der gekerbten Probe darstellen. Die Ordinatenwerte  $\epsilon_1 \dots \epsilon_4$  zeigen an, welchen Messwert man erhielte, wenn das Messgitter der verwendeten DMS die zugeordnete Länge  $l_1 \dots l_4$  hätte. Der Spitzenwert wird nur mit dem kurzen DMS der Länge  $l_4$  richtig wiedergegeben.

Bei dieser Sachlage sollte man annehmen, dass die Messgitterlänge „Null“ ideal wäre. Hier sind natürlich Grenzen gesetzt. Es ist technisch durchaus möglich,



**Bild 3.2-4: Messfehler bei Messungen an inhomogenen Stoffen (z. B. Beton) in Abhängigkeit vom Verhältnis DMS-Länge/Partikelgröße (nach [3-3])**

DMS mit einer Gitterlänge von 0.2 mm herzustellen. Je kürzer das Messgitter wird, um so mehr machen sich Probleme der Dehnungseinleitung in das Messgitter bemerkbar. Sie ergeben sich vor allem aus der Applikation, die gerade in



**Bild 3.2-5: Einfluss der Messgitterlänge  $l$  auf den Messwert infolge Mittelwertbildung bei der Messung von Spannungsspitzen (schematisch)**

Kerben schwierig auszuführen ist und zu größeren Messfehlern führt. Weiterhin ist zu bedenken, dass bei kleiner Messgitterfläche die Wärmeabfuhr über das Messobjekt sehr gering ist. Das bedeutet, dass der die Joulesche Wärme erzeugende Speisestrom sehr klein gehalten werden muss, was bei der Auswahl bzw. Justierung der zur Speisung benutzten Quelle zu beachten ist. Man sollte deshalb den DMS nicht kürzer als notwendig wählen. Als grober Richtwert mag gelten:  
Messgitterlänge  $\leq \frac{1}{2}$  Kerbradius.

### 3.2.1.3 Dynamische Dehnungszustände

DMS sind uneingeschränkt auch zur Messung dynamischer Dehnungszustände geeignet. Handelt es sich um zeitlich veränderliche, jedoch über die Länge der Messstrecke gleichgroße Dehnungen, dann gelten für die Auswahl der DMS-Länge die im Abschnitt 3.2.1.1 gebrachten Argumente. Bei Stoßvorgängen oder hochfrequenten Schwingungsvorgängen ist der Messgitterlänge Aufmerksamkeit zu zollen. Hierzu sei auf den Abschnitt 3.3.7 verwiesen.

### 3.2.2 Mehrfach-DMS, ihre Vorteile und Anwendungsgebiete

Mehrfach-DMS besitzen mehrere Messgitter auf einem gemeinsamen Träger. Typische Ausführungsformen von Mehrfach-DMS sind Doppel-DMS, DMS-Ketten und -Rosetten. Ihr besonderer Vorteil liegt darin, dass die Abstände der Messgitter voneinander bzw. ihre Orientierung zueinander mit großer Genauigkeit eingehalten sind. Ein weiterer Vorteil liegt in der Ersparnis an Applikationsaufwand, weil mehrere Messgitter gleichzeitig in einem Arbeitsgang geklebt werden können. Schließlich sind manche Applikationsaufgaben mit besonders dicht beieinander anzuordnenden Messgittern nur mit Mehrfach-DMS lösbar; weil die Applikation einzelner DMS technisch nicht mehr realisierbar ist.

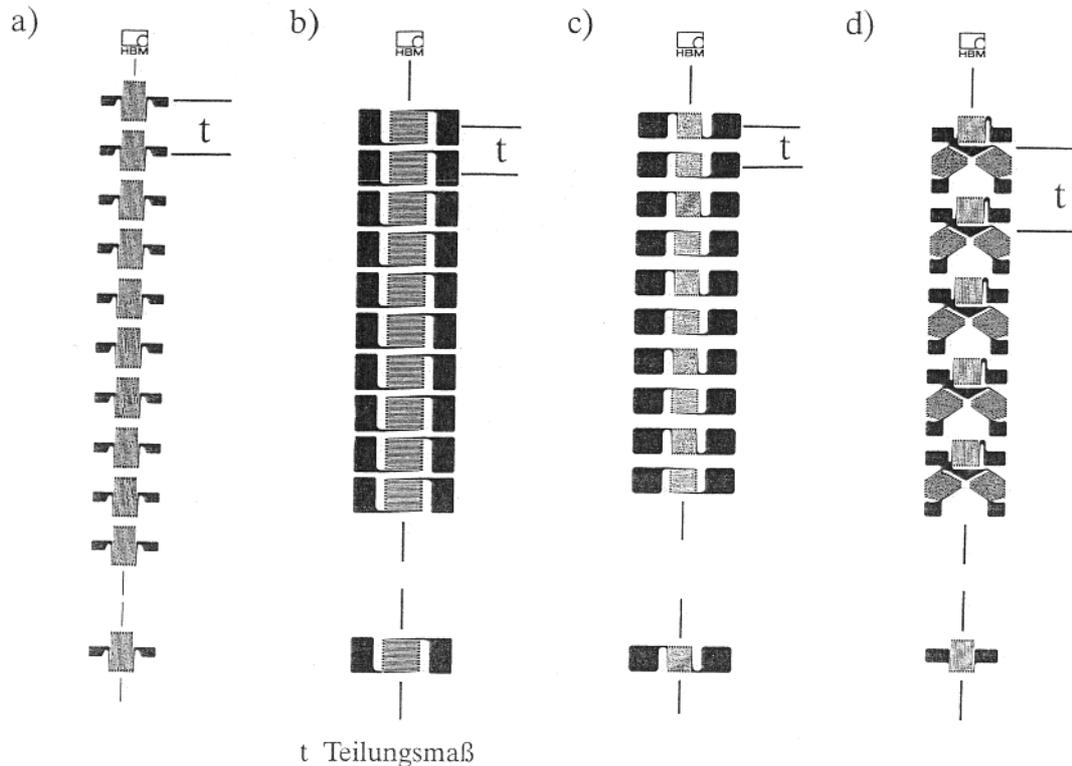
#### 3.2.2.1 DMS-Ketten zur Ermittlung von Spannungsgradienten

Im Abschnitt „Kerbspannungen“ wurde der Einfluss der Messgitterlänge auf das Messergebnis erklärt. In der Praxis sind die Verhältnisse oftmals nicht so klar überschaubar, dass die Stelle maximaler Beanspruchung sicher vorausbestimmt werden könnte. Oder man möchte nicht nur den Spitzenwert wissen, sondern auch den Beanspruchungsverlauf über eine gewisse Strecke oder die Verlagerung des Spitzenwertes unter dem Einfluss eines wandernden Lastangriffspunktes. Zur Lösung solcher Aufgaben wurden DMS-Ketten entwickelt.

DMS-Ketten vereinigen eine Reihe von gleichartigen oder in regelmäßigen Intervallen wechselnden Messgittern auf einem gemeinsamen Träger.

Einige der wichtigsten Ausführungen zeigt das Bild 3.2-6.

Die Ketten enthalten jeweils 10 Einzel-Messgitter bzw. 5 Gruppen mit je 3 Messgittern. Am Ende jeder Kette befindet sich ein zusätzliches Messgitter, das abgetrennt und an geeigneter Stelle als Kompensations- oder Ergänzungs-DMS angebracht werden kann.

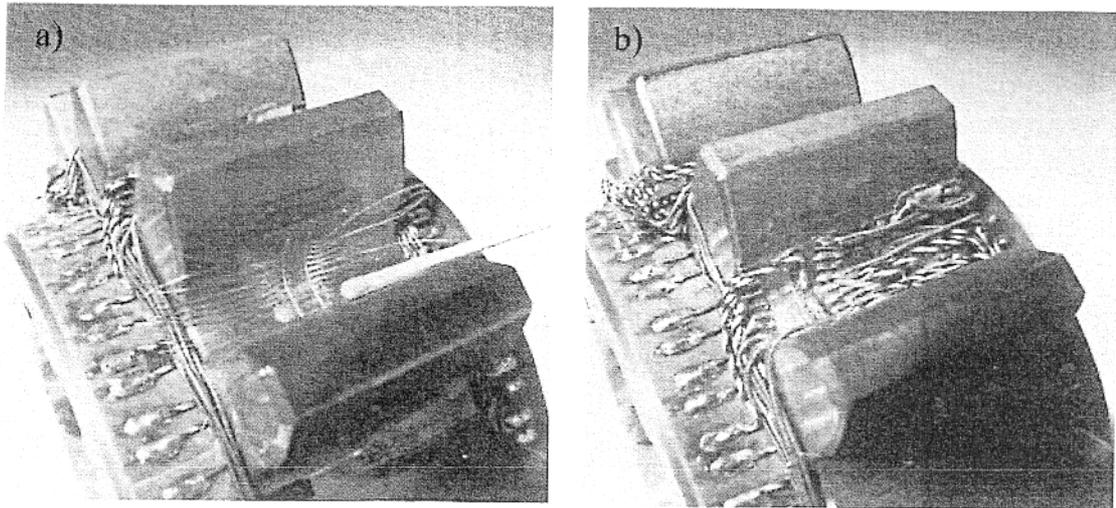


**Bild 3.2-6: Ausführungsformen von DMS-Ketten**

- a) Messgitter-Richtung parallel zur Kettenlängsachse
- b) Messgitter-Richtung senkrecht zur Kettenlängsachse
- c) Messgitter-Richtung alternierend parallel und senkrecht zur Kettenlängsachse
- d) Messgitter in Gruppen je 3 Stück unter  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$  zur Kettenlängsachse (Rosetten-Kette)

DMS-Ketten werden in verschiedenen Größen hergestellt. Das Maß T (Teilung) gibt den Abstand der Mittenachsen zweier benachbarter Messgitter an, bei der Rosetten-Kette den Mittenabstand zweier Messgitter-Gruppen. Ketten werden in unterschiedlichen Teilungen (1 mm, 2 mm, 4 mm) hergestellt. Detaillierte Infos entnehmen Sie den aktuellen Unterlagen.

Das Bild 3.2.7 zeigt als Beispiel die Anwendung von DMS-Ketten zur Ermittlung der Spannungsverteilung in der Zahnfußausrundung eines Zahnrades [3-4]. Dazu wurden mit 5 Ketten an 50 Punkten der Zahnfußausrundung die

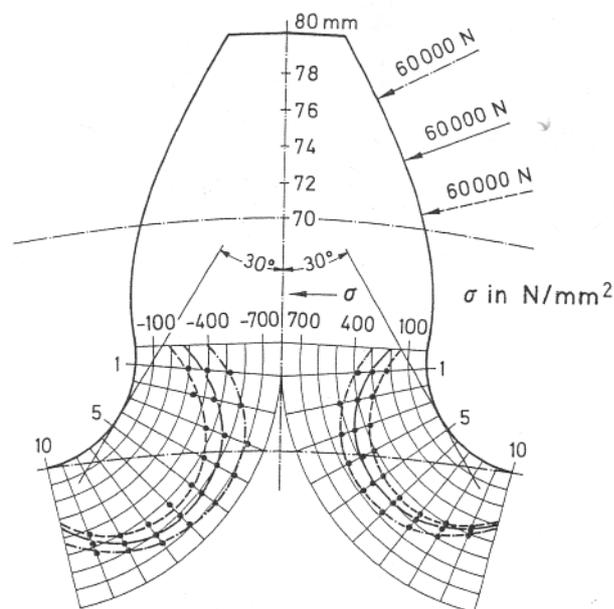


**Bild 3.2-7: Dehnungsmessung mit DMS-Ketten in der Zahnfußausrundung eines Zahnrades nach [3-4])**

- a) angeklebte DMS-Kette mit Streichholz zum Größenvergleich  
 b) fertig verschaltete Messstelle

Tangential- und die Querdehnungen gemessen. Die linke Bildhälfte zeigt eine applizierte DMS-Kette und ein Streichholz zum Größenvergleich, die rechte Bildhälfte die fertig verschaltete Messstelle.

Die an einem Versuchsrad ermittelten Tangentialspannungen zeigt das Diagramm Bild 3.2-5 (links Druckspannungen, rechts Zugspannungen) mit drei verschiedenen Kraftangriffspunkten als Parameter. (Die Untersuchungen wur-

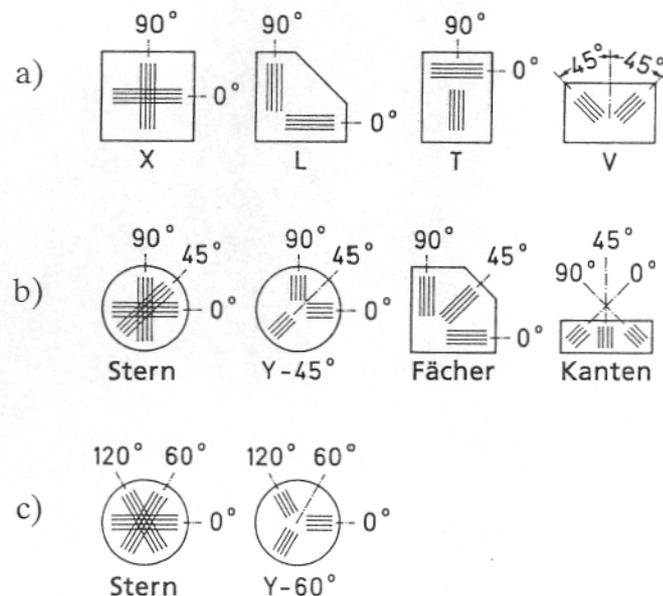


**Bild 3.2-8: Tangentialspannungen in der Zahnfußausrundung eines Zahnrades (nach [3-4])**

den von der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau der TU München ausgeführt.) Bei diesem Beispiel war die Lage des Spannungsmaximums nicht vorhersehbar; außerdem ist eine gewisse Abhängigkeit vom Kraftangriffspunkt erkennbar. Messaufgaben dieser Art sind nur mit DMS-Ketten zufriedenstellend zu lösen.

### 3.2.2.2 DMS-Rosetten zur Ermittlung zweiachsiger Spannungszustände

Die Bezeichnung „Rosette“ leitet sich von der ursprünglichen äußeren Form solcher Mehrfach-DMS her, die auf einem gemeinsamen, kreisrunden Träger mehrere sternförmig gekreuzte Messgitter trugen; sie wurde inzwischen auf alle anderen Mehrfach-DMS mit sich kreuzenden Messgitter-Achsen übertragen. Die gekreuzte Anordnung der Messgitter war ursprünglich wegen der großen Messgitterlänge notwendig; sie wird aber auch heute noch gelegentlich angewandt. Moderne Fertigungstechniken, besonders aber die Folien-Ätztechnik, förderten Rosettenformen mit nebeneinander angeordneten Messgittern, Bild 3.2-9. Beide Ausführungsformen haben ihre Vor- und Nachteile.



**Bild 3.2-9: DMS-Rosetten**

- a) X-Rosette mit unter  $90^\circ$  gekreuzten Achsen  
Anwendung bei zweiachsigen Spannungszuständen mit bekannten Hauptrichtungen (s. Abschnitt 8.2.1)
- b) R-Rosetten mit unter  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  gekreuzten Achsen (auch rechtwinklige Rosetten genannt)
- c) R-Rosetten mit unter  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$  gekreuzten Achsen (auch Delta-Rosetten genannt)

Anwendung von b) und c) bei zweiachsigen Spannungszuständen mit unbekanntem Hauptrichtungen (s. Abschnitt 8.2.2)

Bei sternförmigen oder kreuzförmigen Rosetten sind die Messgitter übereinander angeordnet. Das hat den Vorteil, dass die Dehnungskomponenten möglichst eng am gleichen Ort erfasst werden. Nachteile ergeben sich jedoch infolge des unterschiedlichen Abstands der Messgitter vor der Oberfläche des Messobjekts, insbesondere dann, wenn an dünnen Objekten oder an gekrümmten Flächen Biegebeanspruchungen vorliegen. Die höhere Dehnsteifigkeit (Federrate) infolge des dickeren Aufbaus „gestapelter“ Rosettenformen muss bei dünnen Objekten und vor allem bei solchen aus Werkstoffen mit niedrigem Elastizitätsmodul (Kunststoffen) wegen möglicher Dehnungsbehinderung bedacht werden [3-52]. Dem durch ungünstige Wärmeabfuhr entstehenden Wärmestau im oberen und mittleren Messgitter kann mit verminderter Speisespannung begegnet werden. Vorteilhafter sind in dieser Hinsicht alle Rosettenformen, bei denen die Messgitter in der gleichen Ebene nebeneinander liegen. Ihr größerer Platzbedarf könnte bei kleineren Messobjekten oder bei starkem Spannungsgefälle im Bereich der Rosette Probleme aufwerfen. Deshalb stellt man die Rosetten in verschiedenen Größen und Bauformen her.

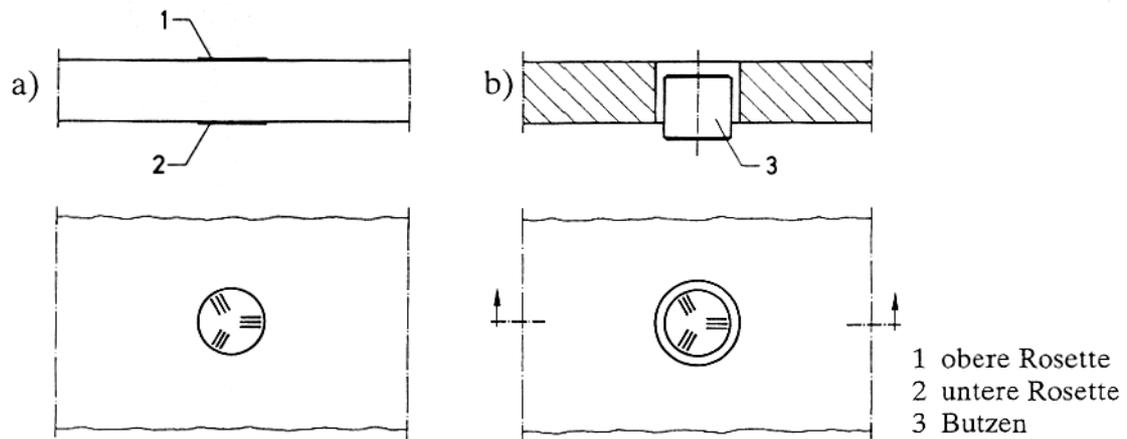
Bei Rosetten mit 2 Messgittern, deren Achsen sich unter  $90^\circ$  schneiden (Bild 3.29a), wird der Buchstabe „X“ als Schlüsselsymbol verwendet. Der Buchstabe X wird als Kennzeichen der gekreuzten Messgitterachsen auch dann verwendet, wenn die räumliche Messgitteranordnung eine T-, L- oder V-Form hat.

In der Spannungsanalyse verwendet man X-Rosetten zur Untersuchung zweiachsiger Spannungszustände mit bekannten Hauptrichtungen. Zum Bau einfacher Messgrößenaufnehmer und zu verwandten Aufgaben (z. B. in der Maschinenüberwachung) erfasst man mit X-Rosetten positive und negative Dehnungen zwecks Summenbildung (s. Abschnitt 8.4).

Das Schlüsselsymbol für Rosetten mit 3 Messgittern ist der Buchstabe „R“. Es gibt zwei Grundformen, die sich durch die Winkelabstände ihrer Messgitter unterscheiden:  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  und  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$  (Bild 3.2-9b und c). Die Winkelangaben beziehen sich immer auf die Richtungen der Messgitterachsen, gleichgültig, ob die Messgitter wie ein Stern, Y, Delta, Fächer oder sonstwie angeordnet sind. R-Rosetten dienen zur Analyse zweiachsiger Spannungszustände mit unbekanntem Hauptrichtungen nach Betrag und Richtung. Anwendungsbeispiele und Auswerteformeln für Messungen mit Rosetten sind im Abschnitt 8.2 enthalten.

### 3.2.2.3 DMS-Rosetten für Eigenspannungsuntersuchungen

Die Methode. Eigenspannungen in Bauteilen zu messen, soll zunächst an einem Beispiel erläutert werden. Man stelle sich eine Platte vor, deren Eigenspannungszustand untersucht werden soll, Bild 3.2-10. Es kann sich um ein- oder zweiachsige Normalspannungen mit unbekanntem Hauptrichtungen handeln, denen möglicherweise noch Biegespannungen überlagert sein können.



**Bild 3.2-10: Beispiel zur Erklärung der Messmethodik zur Bestimmung von Eigenspannungen**

a) Ausgangszustand

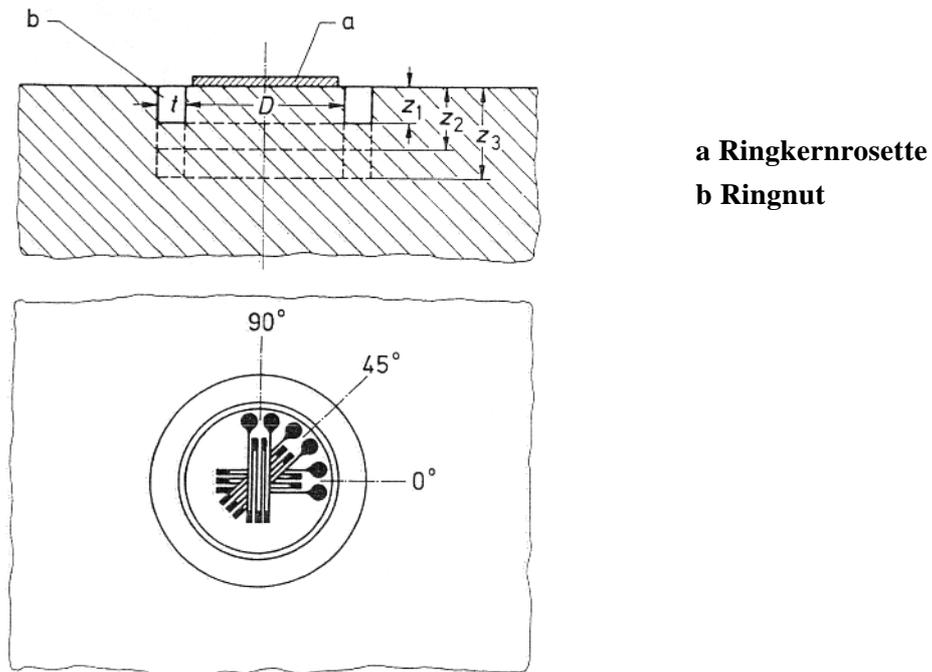
b) Zustand, nachdem ein „Butzen“ herausgetrennt wurde

An die interessierende Stelle wird eine DMS-Rosette geklebt und die Richtung ihrer Messgitter in Bezug auf das Messobjekt festgelegt. Dann werden die Messwerte der einzelnen Messgitter aufgenommen (Ausgangszustand). Wenn mit überlagerten Biegespannungen zu rechnen ist, appliziert man auf der gegenüberliegenden Fläche, der ersten Rosette genau gegenüber, eine weitere Rosette und verfähre gleichermaßen. Danach wird mit einem Ringfräser oder auf eine andere, geeignete Weise das die Rosette tragende Materialstück herausgearbeitet. Der herausgearbeitete Butzen ist nunmehr frei von Kräften, die zuvor von dem umgebenden Werkstoff auf ihn übertragen wurden. Infolgedessen federt er in seine natürliche, ungespannte Lage zurück.

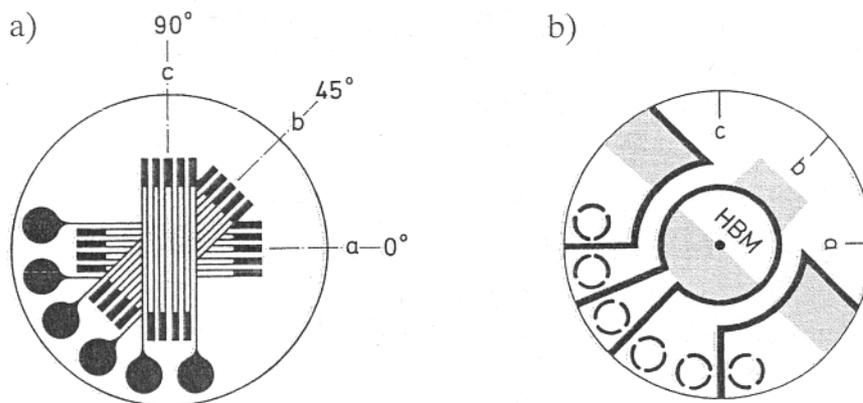
Eine erneute Messung der einzelnen Messgitter zeigt die Veränderungen. Die Auswertung erfolgt nach den im Abschnitt 8.2 gegebenen Formeln für Rosettenmessungen. Zu beachten ist lediglich, dass hierbei die Entspannung gemessen wird; die Eigenspannungen haben entgegengesetztes Vorzeichen.

Man hat herausgefunden, dass es gar nicht notwendig ist, aus dem zu untersuchenden Objekt einen Butzen vollständig herauszufräsen, besonders dann, wenn es sich um kompakte Bauteile handelt und die nur bei Platten gegebene Zugänglichkeit von beiden Seiten fehlt. Es genügt bereits, die ringförmige Nut bis zu einer relativ geringen Tiefe vorzutreiben, um den stehenbleibenden Kern an seiner Oberfläche ausreichend zu entspannen, Bild 3.2-11.

Beim „Ringkern-Verfahren“, wie es genannt wird, entfallen die Einschränkungen der Butzenmethode hinsichtlich der Bauteildicke. Die Tiefe der Ringnut hat Einfluss auf den Grad der Entspannung, was bei der Auswertung der Messergebnisse zu berücksichtigen ist. Die theoretischen Grundlagen und die Auswertung der Messergebnisse sind in [3-5] beschrieben. Eine Spezial-Ringkern-Rosette, die für die Belange des Verfahrens optimal gestaltet ist, zeigt Bild 3.2-12.



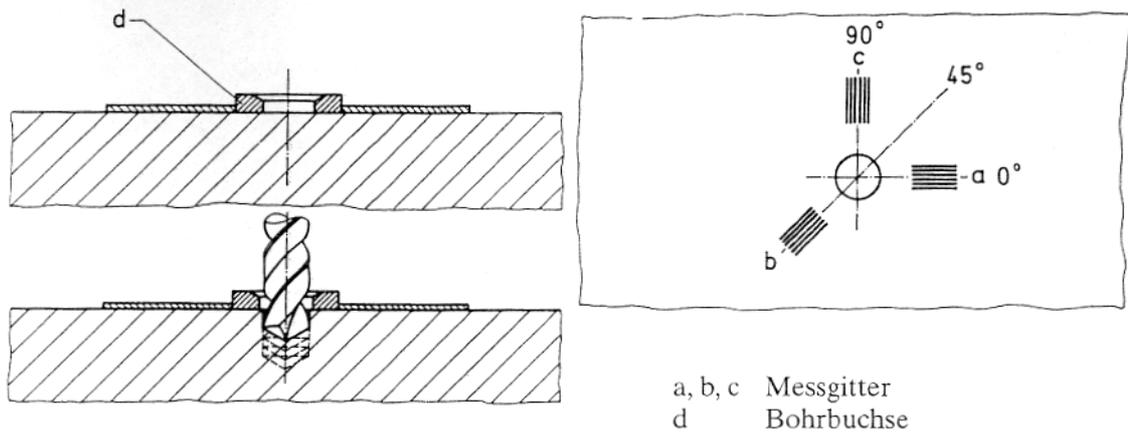
**Bild 32-11: Das Ringkernverfahren nach Böhm und Wolf (schematisch)**



**Bild 3.2-12: Spezial-DMS-Rosette für das Ringkernverfahren nach Böhm und Wolf**

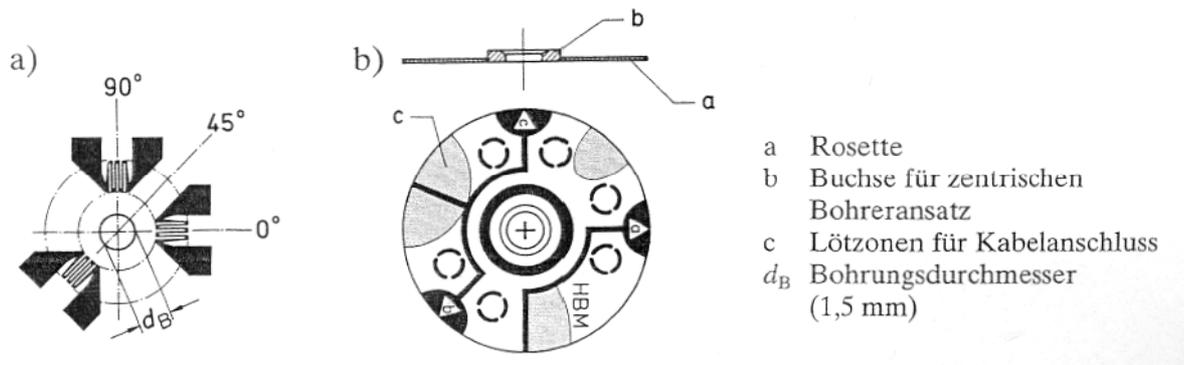
- a) Messgitter-Anordnung
- b) Außenansicht mit Printplatte

Ein älteres Verfahren zur Messung von Eigenspannungen ist das „Bohrloch-Verfahren“. Man bohrt ein kleines Loch und verursacht so eine Störung des bestehenden Spannungszustandes. Dadurch wird der durchlaufende Kraftfluss verändert und die Bohrung an ihren Rändern deformiert, Bild 3.2-13.



**Bild 3.2-13: Das Bohrlochverfahren (schematisch)**

Es genügt, die Bohrung bis zu einer Tiefe gleich dem Lochdurchmesser zu führen. Eine Spezial-Bohrloch-Rosette besitzt 3 unter  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  angeordnete Messgitter, so dass eine Spannungsanalyse nach Betrag und Richtung ausgeführt werden kann. Eine kleine Bohrbuchse sorgt für zentrische Lage der Bohrung, eine wichtige Voraussetzung für genaue Ergebnisse. Das Bild 3.2-14 zeigt eine Ausführungsform einer Bohrlochrosette.



**Bild 3.2-14: Spezial-DMS-Rosette RY 61 für das Bohrlochverfahren**

a) Messgitteranordnung c) b) komplette Rosette

Grenzen des Verfahrens ergeben sich durch die Spannungsüberhöhung an den Bohrungsrändern infolge der Kerbwirkung. Dadurch kann der Werkstoff schon bis in den Fließbereich verformt werden, obwohl die Eigenspannungen noch unterhalb dieser Grenze liegen.

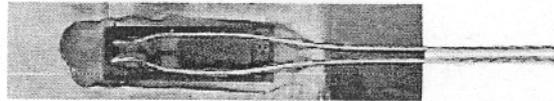
Die Grundlagen des Verfahrens und die Auswertungsmethode sind in [3-6,3-7] und im Abschnitt 8.3 behandelt.

### 3.2.3 Spezial-DMS

Neben unterschiedlichen, auf den Anwendungszweck zugeschnittenen Messgitterformen gibt es noch Spezial-DMS, die sich z. B. durch die Art ihrer Befestigung am Messobjekt von den Standard-DMS unterscheiden. Davon sollen 3 Beispiele erwähnt werden. Daneben gibt es noch andere Sonderformen, die in diesem Rahmen nicht abgehandelt werden können. Es muss deshalb auf Prospektinformationen verwiesen werden.

#### 3.2.3.1 Anschweißbare DMS

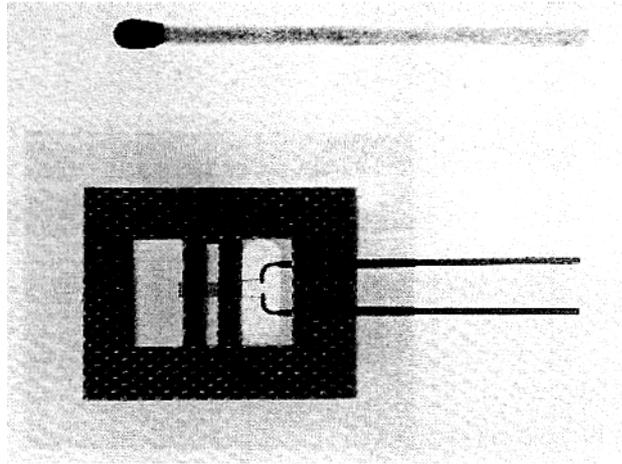
Sie besitzen eine metallische Basis, z. B. aus nichtrostendem Stahl. Die Befestigung erfolgt durch Punktschweißen. Das Bild 3.2-15 zeigt ein Beispiel. Infolge der Stahlbasis besitzen diese DMS eine recht große Dehnsteifigkeit. Sie können deshalb nur an dickwandigen, kräftigen Objekten, z. B. im Stahlbau, angewandt werden.



**Bild 3.2-15: Anschweißbarer DMS  
mit Stahlbasis, Anschlusslitzen und Schutzabdeckung**

#### 3.2.3.2 Freigitter-DMS, Hochtemperatur-DMS

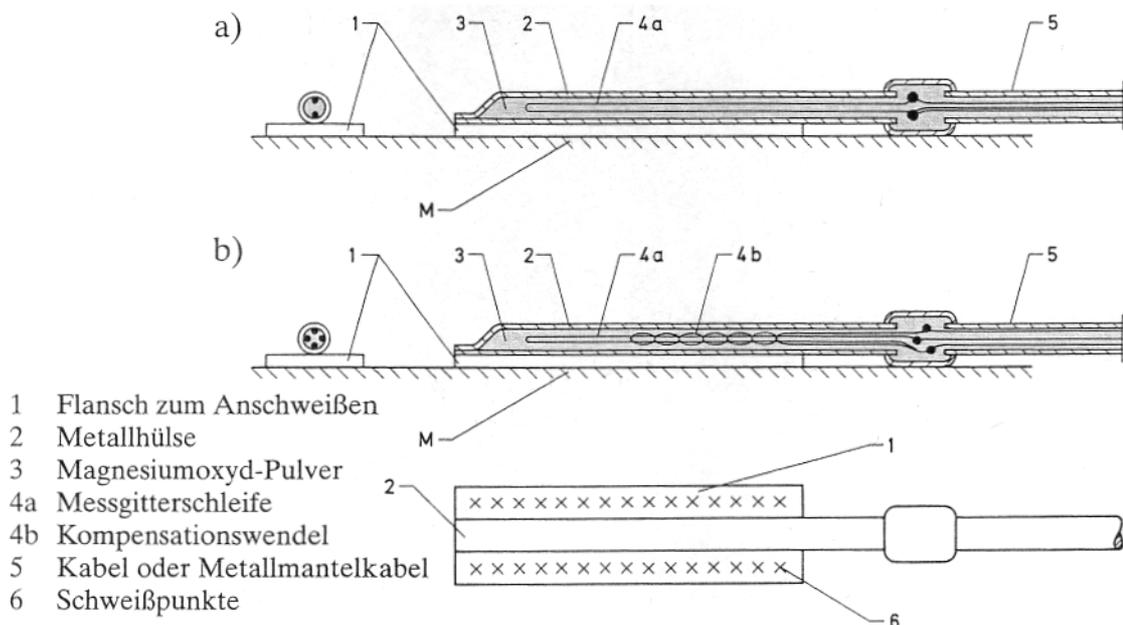
Freigitter-DMS werden vorzugsweise in extrem hohen oder tiefen Temperaturbereichen eingesetzt. Das Messgitter ist an einem Hilfsträger befestigt, der im Laufe der Applikation entfernt wird, Bild 3.2-16. Zur Befestigung dienen keramische Mittel; diese sowie die Platin-Wolfram-Legierung des Messgitters erlauben (nicht-nullpunktbezogene) Messungen im Hochtemperaturbereich bis 800 °C.



**Bild 3.2-16: Hochtemperatur-Freigitter-DMS; geeignet zum Applizieren mit keramischen Bindemitteln. \*)**

### 3.2.3.3 Anschweißbare Hochtemperatur-DMS

Gegenüber den vorgenannten Freigitter-DMS, deren Applikation recht schwierig ist, haben die durch Punktschweißen applizierbaren DMS System Ailtech Vorteile. Sie werden in Viertelbrücken- und Halbbrücken-Versionen hergestellt.



**Bild 3.2-17: Anschweißbare, gekapselte Hochtemperatur-DMS System Ailtech/Eaton (schematisch)**

**a) Viertelbrücken-Ausführung**

**b) Halbbrücken-Ausführung (messende Drahtschleife und passive Drahtwendel zur Temperaturgangkompensation)**

\*) Nicht mehr im HBM-Programm

Der Messdraht ist in verdichtetes MgO-Pulver eingebettet und mit einem metallischen Schutzrohr umgeben (Bild 3.2-17). Ausführungen mit Metallmantelkabel sind ebenfalls erhältlich. Der nutzbare Temperaturbereich von DMS mit PtW-Messgitter reicht von ca.  $-260\text{ °C}$  bis  $+550\text{ °C}$ , für nicht-nullpunktbezogene Messungen bis ca.  $700\text{ °C}$ . Weitere Informationen in [3-8 bis 3-10, 3-14, 3-18,3-19,3-23,3-50].

### 3.2.4 Der elektrische Widerstand

DMS werden mit verschiedenen Widerständen hergestellt. Die Zahlenwerte haben historischen Ursprung. Da sie sich bewährt haben hat man sie beibehalten. Der Wert  $120\ \Omega$  herrscht eindeutig vor. In dieser Widerstandsgruppe findet man die größte Auswahl an verschiedenen DMS-Typen. Sie werden vorzugsweise zur Spannungsanalyse, für Überwachungsaufgaben u. dgl. eingesetzt. Daneben findet man serienmäßig noch  $350\ \Omega$ -,  $700\ \Omega$ - und  $1000\ \Omega$ -DMS, die in größerem Umfang im Messgrößenaufnehmerbau eingesetzt werden, sowie andere Widerstandswerte.

Auf die Frage nach dem optimalen Wert gibt es keine eindeutige Antwort. Bestimmend für die Wahl des DMS-Widerstandes sind drei Punkte:

- die Anpassung an das anzuschließende Messgerät,
- Einflüsse der Übertragungswege zwischen DMS und Messgerät,
- die zulässige elektrische Belastbarkeit des DMS.

Gelegentlich treten gegensätzliche Forderungen auf, die zum Kompromiss zwingen.

Die HBM-Messverstärker haben einen so breiten Anpassungsbereich, dass seitens des elektrischen Widerstandes keine Schwierigkeiten entstehen.

Wird dem DMS ein Gleichspannungsverstärker nachgeschaltet, so tragen hochohmige DMS, mit hoher Speisespannung betrieben, zu einer relativen Verbesserung der verstärkerbedingten Nullpunktdrift bei. Andererseits sind hochohmig abgeschlossene Messkreise bessere Antennen zum Auffangen von Störimpulsen als niederohmige. Das führt bei Messungen mit Gleichspannungsverstärkern leicht zu Messfehlern, falls nicht für einwandfreie Abschirmung gesorgt wird.

Bei langen Messkabeln wirkt sich die Dämpfung, die nicht nur bei Trägerfrequenzspeisung, sondern - oft übersehen - auch bei hochfrequenten dynamischen Messsignalen auftritt, bei niederohmigem Abschluss weniger aus als bei hochohmigem (s. Abschnitt 7.4).

Ohmsche Widerstände in den Übertragungswegen, z. B. in den Kabeln, Verbindungsstellen, Schleifringen und dgl., wirken sich bei hohem DMS-Widerstand weniger aus. Demgegenüber haben Schwankungen des Isolationswiderstandes bei niedrigem DMS-Widerstand geringeren Einfluss (s. Abschnitt 7.2).

In den meisten Fällen wird der  $120\ \Omega$ -DMS optimal sein.

### 3.2.5 Der nutzbare Temperaturbereich

Die Frage nach Temperatur-Grenzwerten für die Anwendbarkeit von DMS ist äußerst schwer zu beantworten. Der Grund dafür ist die unterschiedliche Beeinflussung von DMS-Eigenschaften durch die Höhe der Temperatur und die Dauer ihrer Einwirkung und schließlich noch der tolerierbare Messfehler. In [2-1] ist deshalb unter dem Punkt „Temperaturbeständigkeit“ folgendes ausgeführt:

„Nach der Empfehlung dieser Richtlinie sind alle wesentlichen Eigenschaften der DMS in Abhängigkeit von der Temperatur anzugeben. Damit ist der Anwender in der Lage, die für seine Messungen zulässigen Temperaturgrenzen nach oben und unten selbst abzuschätzen.“

Hinsichtlich der Auswirkung der Temperatur auf die Güte einer Messung sind zwei Dinge zu unterscheiden:

- die Höhe der Temperatur,
- ihre Veränderlichkeit während einer Messung.

Geht es um die Höhe der Temperatur, so möchte man wissen, ob bzw. wie lange eine DMS-Applikation beständig ist, oder aber welche Auswirkungen zu erwarten sind. Nun tritt die Temperatur ja nicht als unabhängige Größe auf. Sie ist immer gekoppelt mit der Zeit, etwa der Anstiegszeit oder der Verweildauer; sie wird begleitet von äußeren Einflüssen, z. B. atmosphärischen, die sich als physikalische (z. B. Druck) oder chemische (z. B. Oxydation) Angriffe äußern können. Auch Umwandlungsvorgänge in den Messgitterlegierungen, die bei erhöhter Temperatur ablaufen können, gehören hierher.

Die Frage, bis zu welcher Temperatur eine DMS-Applikation betriebsfähig ist, muss deshalb zwangsläufig die Randbedingungen mit einschließen; und dort beginnen die Schwierigkeiten, wenn man eine Antwort geben soll. Sie kann nur allgemeiner Art sein und sich auf häufig auftretende Anwendungsfälle als Beurteilungsmaßstab beziehen. Im übrigen führt Temperatureinwirkung nicht zu sprunghaften Veränderungen, aus denen wirkliche Grenzen abzuleiten wären; die Übergänge von gut über brauchbar zu unbrauchbar sind fließend; ihre Klassifizierung hängt von den gestellten Genauigkeitsansprüchen ab.

Ganz allgemein kann gesagt werden, dass tiefe Temperaturbereiche leichter zu beherrschen sind als hohe. Wichtig ist auch, ob „nullpunktbezogene“ oder „nicht-nullpunktbezogene“ Messungen gefordert werden (s. Abschn. 2.4); im ersten Fall sind die oberen Temperaturgrenzen - auch in Abhängigkeit von der Zeit! - wesentlich niedriger anzusetzen als im zweiten Fall. Man beachte auch, dass für eine Messung nicht allein die Daten des DMS maßgebend sind, sondern auch diejenigen der Befestigungsmittel, des Messstellenschutzes, der Verkabe-

lung usw. Als grobe Orientierung bezüglich der für metallische DMS gebotenen Möglichkeiten mögen folgende Zahlen dienen:

Der Bereich für nicht-nullpunktbezogene Messungen reicht von -269 bis über 800 °C. Für nullpunktbezogene, kurzzeitige Messungen liegt die obere Grenze bei etwa 500 °C, wenn alle Möglichkeiten der Fehlerkompensation bzw. -korrektur genutzt werden. Für DMS mit Konstantan-Messgitter schränkt sich der Bereich auf etwa -200 bis +200 °C ein, für „Aufnehmerqualität“ auf -20 bis +70 °C, für höchste Genauigkeitsforderungen (Wägezellen) gar auf -10 bis +40 °C mit zeitlicher Beschränkung auf 20 Minuten.

Die Fülle der Literatur, insbesondere im Bereich hoher Temperatur, weist auf die besonderen Probleme hin, die sich dort ergeben; sie lässt außerdem erkennen, dass die Entwicklung auf diesem Gebiet noch im Fluss ist [3-8 bis 3-23]. Temperaturschwankungen wirken sich vorwiegend auf den Nullpunkt, d. h. auf den Bezugspunkt des Messwertes aus. Durch die Auswahl selbstkompensierender DMS (s. Abschnitt 3.3.4) und/oder die Anwendung geeigneter Kompensationsmethoden (s. Abschnitt 7.1) lassen sich Fehler in akzeptablen Grenzen halten.

Probleme bereiten Messungen im Temperaturbereich oberhalb 200...300 °C, sowohl hinsichtlich der Nullpunktbeständigkeit als auch der Nutzungsdauer [3-23]. Hier scheinen die kapazitiven DMS (s. Abschnitt 1.0.4) eine Lücke zu füllen [1-11 bis 1-15].

### 3.3 Technische Daten

Die in diesem Abschnitt beschriebenen DMS-Kenngrößen und DMS-Eigenschaften sind einerseits für das Messen mit DMS von Bedeutung, andererseits geben sie weitergehende Hinweise für eine zweckmäßige Auswahl der DMS im Hinblick auf besondere Anforderungen. Soweit Zahlenwerte angegeben sind, erfolgte ihre Ermittlungen nach den in [2-1] gegebenen Richtlinien. Zu beachten ist ferner, dass die meisten Kennwerte des DMS nur am fertig applizierten DMS ermittelt werden können. Insofern können auch die Eigenschaften des Befestigungsmittels einen Einfluss auf den Kennwert haben, z. B. kann ein Klebstoff den thermischen Anwendungsbereich eines DMS einschränken.

Es muss klar gesagt werden, dass Grenzwerte immer im Rahmen eines Ermessensspielraumes genannt werden können. Scharfe Grenzen gibt es kaum; die Zeit, Temperatur und andere Einflussparameter können die akzeptierbaren Grenzen verschieben. Deshalb wird in [2-1] für viele Kennwerte anstatt eines Zahlenwertes eine grafische Darstellung gefordert, welche die Abhängigkeit des Kennwertes von einer wichtigen Einflussgröße zeigt.

### 3.3.1 Die Dehnungsempfindlichkeit (k-Faktor) metallischer DMS

Im Abschnitt 1.1.1 ist der physikalische Zusammenhang zwischen der Dehnung und der Widerstandsänderung metallischer elektrischer Leiter dargelegt. Es wurde auch darauf hingewiesen, dass einige Metalle einen linearen Zusammenhang zwischen der relativen Widerstandsänderung und der Dehnung zeigen. Wenn derartige Metalle - es handelt sich um Legierungen verschiedener Art - neben der linearen Widerstands-Dehnungs-Charakteristik noch einen kleinen oder vernachlässigbaren Temperaturbeiwert ihres elektrischen Widerstandes besitzen, benutzt man sie bevorzugt zur DMS-Herstellung. Andere Legierungen verwendet man, wenn besondere Anforderungen hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit bei dynamischer Beanspruchung oder hinsichtlich der Temperaturbeständigkeit gestellt werden.

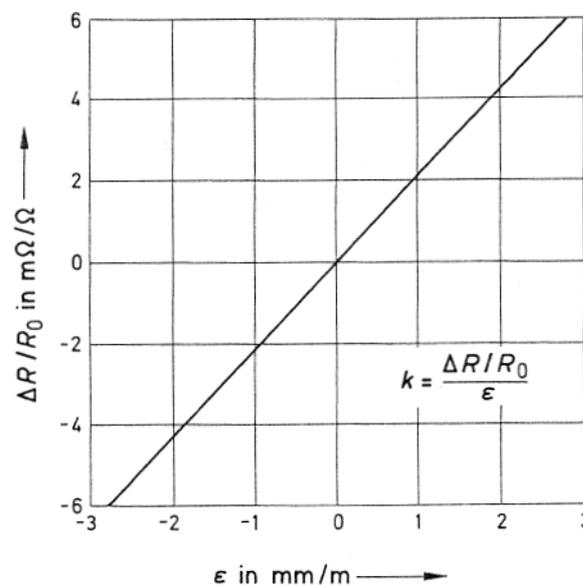
Die Empfindlichkeit eines DMS wird ausgedrückt durch das Verhältnis von relativer Widerstandsänderung zur Dehnung und mit dem Formelzeichen  $k$  bezeichnet:

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \quad (3.3-1)$$

Mit den zugehörigen Einheitenbenennungen ergibt sich

$$(k) = \left\{ \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} \right\} \text{ in } \left[ \frac{\Omega/\Omega}{\text{m/m}} \right].$$

Die Einheiten haben nur für einen Größenskalkül Bedeutung; in der Praxis werden sie gekürzt, so dass der „k-Faktor“ als unbenannte Zahl erscheint.



**Bild 3.3-1: Kennlinie eines metallischen DMS und Definition des k-Faktors**

Im Widerstands-Dehnungs-Diagramm wird der  $k$ -Faktor durch die Steigung der DMS-Kennlinie dargestellt, Bild 3.3-1.

Im Gegensatz zu dem im Abschnitt 1.1.1 definierten Kennwert  $S$  des gestreckten Leiters (s. Gl. 1.1-2) ist der  $k$ -Faktor ein Kennwert (Proportionalitätsfaktor) für den fertigen DMS. Einflüsse der Messgitterkonfiguration und der Dehnungseinleitungsbedingungen in das Messgitter verursachen einen (meist nur geringen) Unterschied zwischen  $S$  und  $k$ . Aus diesem Grund wird der  $k$ -Faktor vom DMS-Hersteller für jedes Fertigungslos nach den Vorschriften in [2-1] an einer Stichprobe nach statistischen Methoden der Qualitätssicherung bestimmt und der Zahlenwert auf dem Datenblatt jeder DMS-Packung vermerkt.

Eine willkürliche Beeinflussung des  $k$ -Faktors durch fertigungstechnische Maßnahmen, etwa zur Erzielung eines bestimmten Zahlenwertes, ist nicht möglich. In der Tafel 3.3-1 sind mittlere  $k$ -Faktor-Werte für übliche Messgitterlegierungen verzeichnet.

Messgitterwerkstoff (Handelsnamen)	Richtanalyse [%]	mittlerer $k$ -Faktor ca.
Konstantan	57 Cu, 43 Ni	2,05
Karma	73 Ni, 20 Cr, Rest Fe + Al	2,1
Nichrome V	80 Ni, 20 Cr	2,2
Platin-Wolfram	92 Pt, 8 W	4,0

**Tafel 3.3-1: Mittlere  $k$ -Faktoren von DMS mit verschiedenen Messgitterwerkstoffen**

Die Feststellung, dass metallische DMS eine lineare Kennlinie besitzen, bedarf einer Einschränkung. Bei DMS mit Konstantan-Messgitter wurde im Bereich großer Drehungen bis  $150\,000\ \mu\text{m}/\text{m} = 15\ \text{cm}/\text{m}$  eine nichtlineare Kennlinie gefunden. Sie verläuft parabolisch und kann mit dem Polynom  $\varepsilon^* = \varepsilon + \varepsilon^2$  mit guter Näherung beschrieben werden. Darin ist  $\varepsilon^*$  der angezeigte und  $\varepsilon$  der wirkliche Dehnungswert. Es ist anzunehmen, dass sich andere Messgitterlegierungen ähnlich verhalten. Weitere Information siehe Abschnitt 3.3.6.

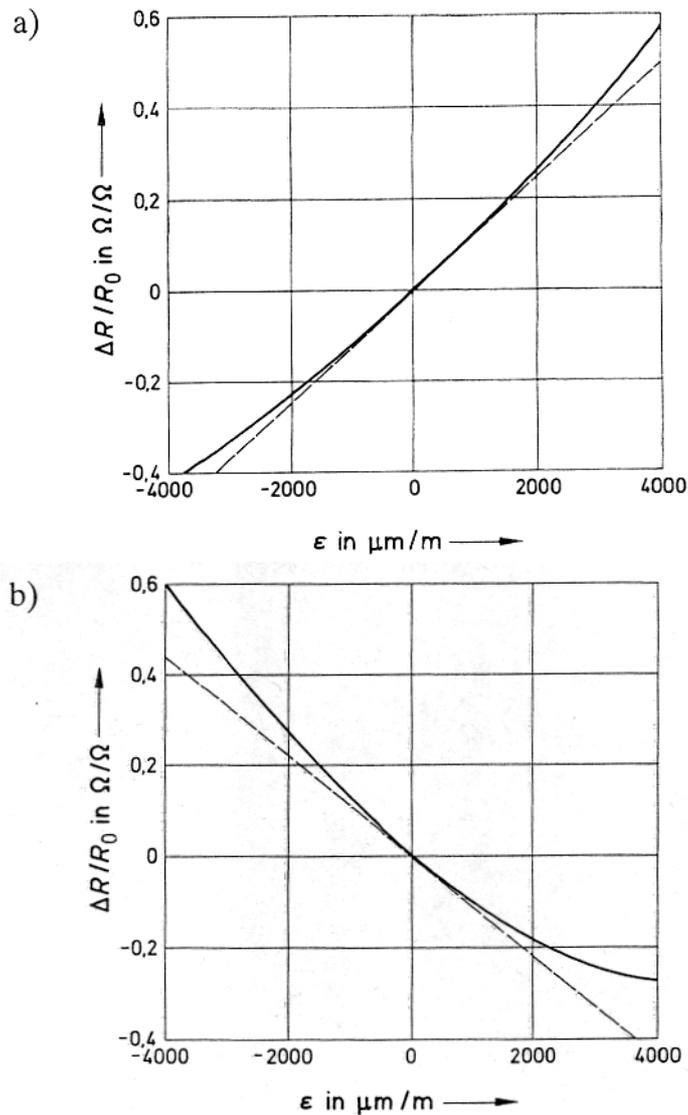
Betreibt man den DMS bei Messungen im Hochdehnungsbereich wie üblich in Viertelbrückenschaltung, dann ergibt sich automatisch eine weitgehende Kompensation der DMS-Nichtlinearität (s. Abschnitt 5.2 und [3-29]).

### 3.3.2 Die Dehnungsempfindlichkeit der Halbleiter DMS

Im Abschnitt 1.1.2 wird gesagt, dass bei HL-DMS die Kennlinie parabolisch verläuft. Das Bild 3.3-2 gibt Kennlinien für HL-DMS aus p-leitendem und aus n-leitendem Silizium wieder.

Die Kennlinien sind temperaturabhängig, wie man aus der Gl. (1.1-3) erkennt.

Die Temperaturabhängigkeit kann durch stärkere Dotierung des Siliziums vermindert werden; gleichzeitig mindert man damit aber auch die Dehnungsempfindlichkeit. Man muss einen befriedigenden Kompromiss schließen.



durchgezogene Linien: Kennlinien bei der Temperatur  $\vartheta_0$ .

gestrichelte Linie: Tangente im Punkt  $\varepsilon = 0 \rightarrow \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\vartheta_0} = k\varepsilon$

**Bild 3.3-2: Kennlinien von Halbleiter-DMS für**

**a) p-Silizium 0,020  $\Omega\text{cm}$**

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\vartheta_0} = k\varepsilon + c\varepsilon^2 = 119,5 \cdot \varepsilon + 4000 \cdot \varepsilon^2,$$

**b) n-Silizium 0,031**

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\vartheta_0} = k\varepsilon + c\varepsilon^2 = -110 \cdot \varepsilon + 10000 \cdot \varepsilon^2.$$

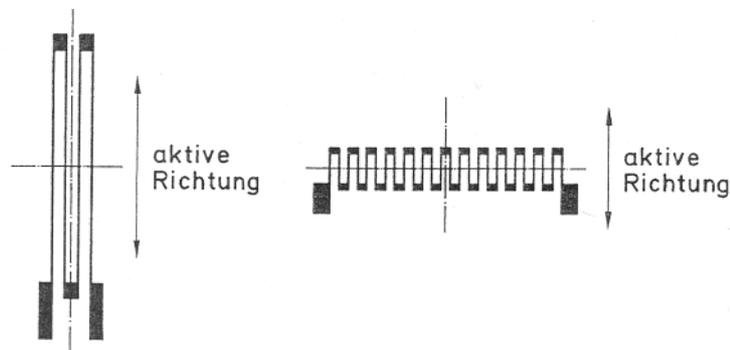
Die Kennlinie durch einen Zahlenwert, ähnlich dem k-Faktor metallischer DMS, zu beschreiben, ist unmöglich. Dies ist nur möglich für die Tangentensteigung gemäß Bild 3.3-2 bei der Bezugstemperatur  $\vartheta_0$ . Für handelsübliche, p-leitende HL-DMS gelten näherungsweise k-Faktoren zwischen +110 und +130, und für n-leitende HL-DMS solche zwischen -80 und -100.

Sofern die zu messenden Dehnungen  $\pm 1000 \mu\text{m/m}$  nicht übersteigen und man eine Messunsicherheit bis  $\pm 5 \%$  in Kauf nimmt, kann man Messungen in vereinfachter Weise vornehmen, indem man einen konstanten k-Faktor zugrunde legt. Will man genauere Ergebnisse, so bedarf der Messwert der Korrektur. Dazu fügen manche Hersteller ihren HL-DMS individuell gerechnete Korrekturtabellen bei, die dem Anwender die Auswertung seiner Messergebnisse wesentlich erleichtern.

Weitere Eigenarten der HL-DMS zu beschreiben, die sich im Zusammenhang mit Temperaturänderungen bzw. Abweichungen der Messtemperatur  $\vartheta$  von der Bezugstemperatur  $\vartheta_0$  ergeben, übersteigt den Rahmen dieser Schrift. Sie sind in [3-24] ausführlich dargestellt.

### 3.3.3 Die Querempfindlichkeit

DMS sollten eigentlich nur in ihrer „aktiven“ Richtung mit einer Widerstandsänderung auf eine Dehnung reagieren, und zwar in dem durch den k-Faktor bezeichneten Verhältnis. Die „aktive“ Richtung ist durch die Richtung der Drähte oder drahtähnlichen Leiterteile des Messgitters bestimmt (Bild 3.3-3).



**Bild 3.3-3: Die „aktive“ Richtung eines DMS**

#### Anmerkung

Die Bezeichnung „aktive Richtung“ oder „aktiver DMS“ sind bei Widerstands-DMS immer im Sinne von „messende Richtung“ oder „messender DMS“ (im Gegensatz zum Kompensations-DMS) zu verstehen. Sie werden allgemein in diesem Sinne benutzt und dürfen nicht verwechselt werden mit dem physikalischen Begriff „aktiver Aufnehmer“. Ein aktiver DMS im physikalischen Sinne ist der im Abschnitt 1.0.5 erwähnte piezoelektrische DMS.

Zuweilen beobachtet man auch dann eine (meist nur geringe) Widerstandsänderung, wenn Dehnungen quer zur „aktiven“ Richtung auf den DMS einwirken. Man sagt dann, der DMS sei „querempfindlich“.

Der Definition der Querempfindlichkeit liegen die folgenden Voraussetzungen zugrunde:

- a) Wird ein DMS in seiner „aktiven“ Richtung mit einer einachsigen Dehnung beansprucht, Bild 3.3-4a, dann zeigt er eine Dehnungsempfindlichkeit  $k_l$ , die mit dem Ausdruck

$$k_l = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_l} \quad (3.3-2)$$

beschrieben wird.

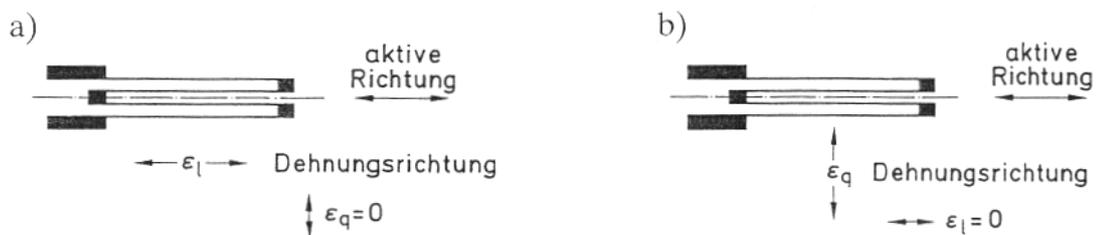
- b) Beansprucht man den DMS mit einer einachsigen Dehnung quer zu seiner „aktiven“ Messrichtung, Bild 3.3-4b, dann findet man ebenfalls eine, meist nur geringe, Dehnungsempfindlichkeit  $k_q$ , die mit

$$k_q = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_q} \quad (3.3-3)$$

beschrieben wird.

Die Querempfindlichkeit  $q$  ist definiert als der Quotient aus der Dehnungsempfindlichkeit quer zur Messrichtung  $k_q$ , und der Dehnungsempfindlichkeit in der Messrichtung,  $k_l$ :

$$q = \frac{k_q}{k_l} \quad (3.3-4)$$



$\varepsilon_l$  Dehnung in der Längsrichtung des DMS

$\varepsilon_q$  Dehnung in der Querrichtung des DMS

**Bild 3.3-4: Zur Definition der Querempfindlichkeit**

- a) „aktive“ Richtung des DMS und Dehnungsrichtung koinzidieren,  
b) „aktive“ Richtung des DMS und Dehnungsrichtung stehen 90° zueinander.

Als Ursache für die Querempfindlichkeit der DMS machte man früher allein die quer zur aktiven Richtung verlaufenden Teile des Messgitters verantwortlich. Das stimmte auch im wesentlichen für die mit großem Abstand gewickelten Drahtgitter der ursprünglichen DMS-Konstruktion (Bild 3.3-5a). Konstruktive Maßnahmen zielten deshalb darauf ab, diesen Punkt zu verbessern. Dies gelang zu einem beachtlichen Teil mit verfeinerten Wickelverfahren, mit denen Drahtabstände bis herunter zu 0,1 mm realisiert werden konnten (Bild 3.3-5b).



**Bild 3.3-5: Verschiedene Messgitterformen von DNIS und Maßnahmen zur Verminderung der Querempfindlichkeit**

- a) Ursprungsform
- b) enge Wicklung
- c) dicke Querbrücken
- d) breite Querverbindungen

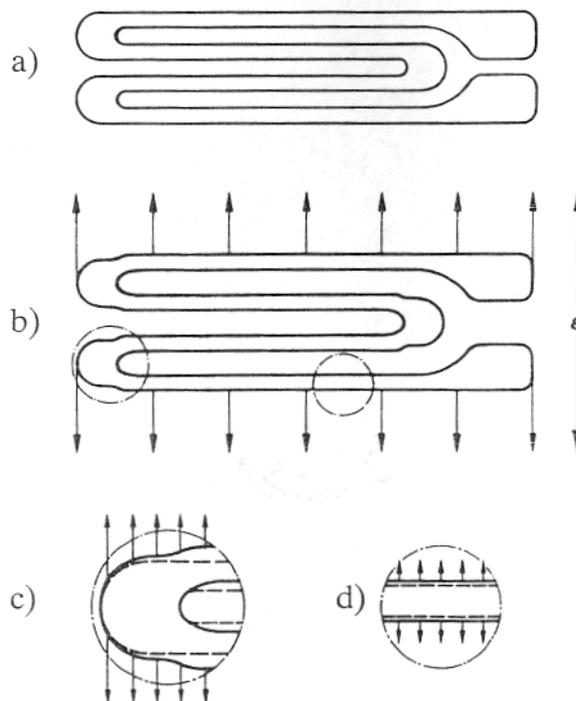
Nach einer anderen Idee suchte man der Querempfindlichkeit dadurch zu begegnen, dass man die Verbindung der einzelnen Messgitterstränge durch dicke Querbrücken herstellte (Bild 3.3-5c). Diese in der Herstellung recht komplizierte Maßnahme brachte zwar eine beträchtliche Reduzierung der Querempfindlichkeit, jedoch nicht ihre völlige Beseitigung.

Beim modernen Folien-DMS (Bild 3.3-5d) greift man im Prinzip auf die Idee des Querbrückengitters zurück, indem man an den Enden der einzelnen Gitterstränge breite Querverbindungen anbringt. Ihre Realisierung ist jedoch beim Folien-DMS wesentlich einfacher als beim Draht-DMS.

Eine experimentelle Untersuchung bei Folien-DMS brachte folgendes Ergebnis:

Im Bereich der verbreiterten Querverbindungen erfolgt bei positiver Dehnung eine geringfügige positive Widerstandsänderung, Bild 3.3-6b und c. Dieser Vorgang ist auf einen engen Bezirk am Ende des Messgitters beschränkt. Er wirkt sich deshalb bei kurzen Messgittern stärker aus als bei langen, weil der relative Anteil der verzerrten Messgitterteile verschieden groß ist. Das bestätigte sich auch bei Messungen, deren Ergebnisse im Bild 3.3-7 gezeigt werden.

Ein zweiter, sich überlagernder Effekt entsteht durch die Kräfte, die seitlich entlang des Messgitterstranges angreifen und ihn in die Breite ziehen (Bild 3.3-6d). Wie stark die Kräfte auf den Leiter einwirken können, hängt von dessen Abmessungen sowie vom Kraftschluss ab. Ein vollständig in den Messgitterträger ein-



**Bild 3.3-6: Zur Entstehung der Querempfindlichkeit bei Dehnungsmessstreifen**

- a) Ausgangszustand
- b) Zustand der Querdehnung
- c) Verformung im Bereich der Querverbindungen
- d) Verformung im übrigen Bereich des Messgitters

gebetteter Leiter wird stärker beansprucht als ein obenauf geklebter. Dieser Effekt bewirkt bei Folien-DMS mit Konstantan-Messgitter oder Karma-Messgitter bei positiver Dehnung eine ebenfalls geringfügige negative Widerstandsänderung (dies erklärt eine gelegentlich zu beobachtende negative Querempfindlichkeit der DMS).

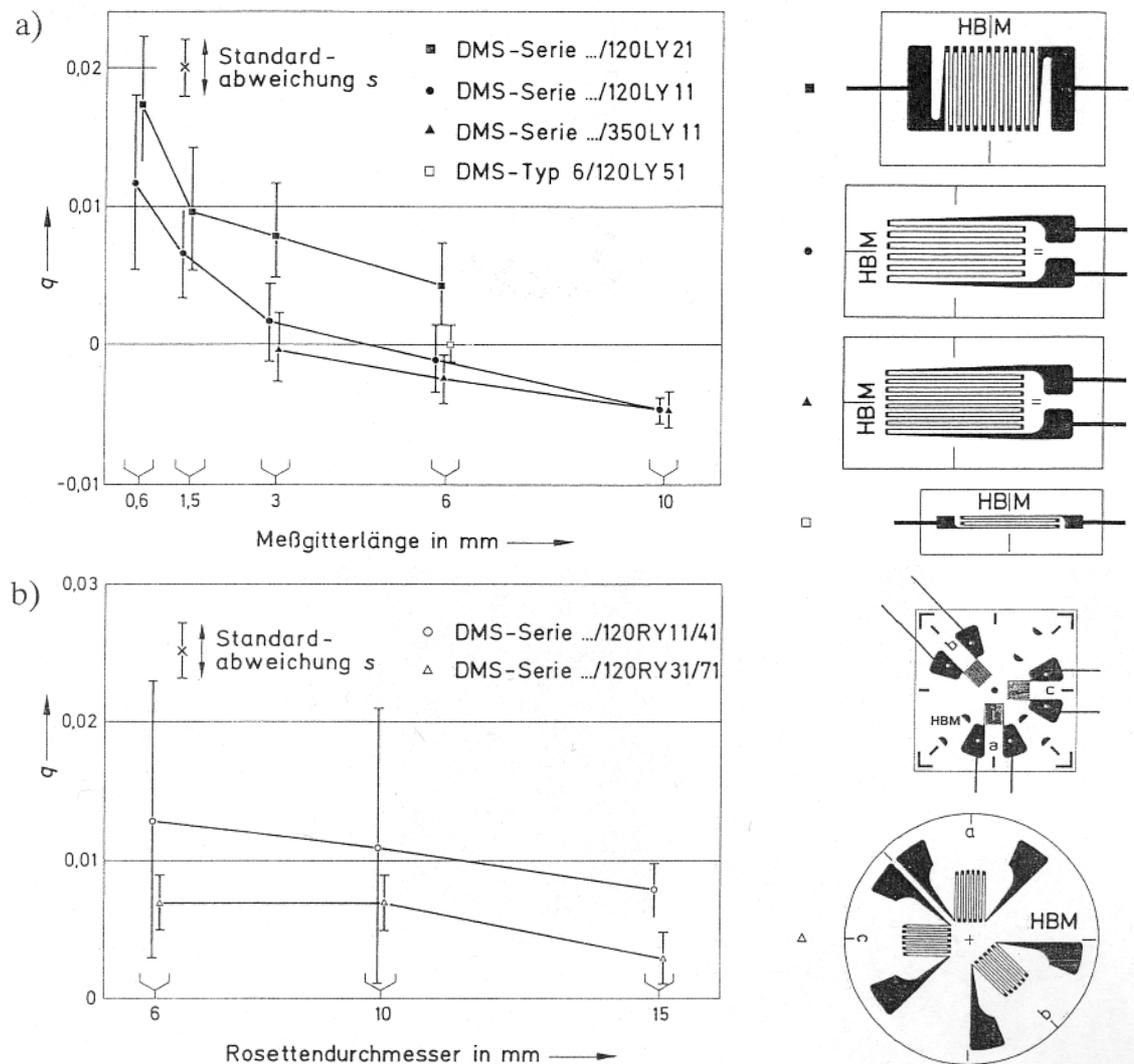
Beim Entwurf eines DMS wird man nach Möglichkeit die Messgittergeometrie so wählen, daß die Querempfindlichkeit einen sehr kleinen Wert annimmt. Da jedoch noch andere Gesichtspunkte bei der Auslegung eines DMS eine Rolle spielen, gelingt dies nicht immer.

Während die Dehnungsempfindlichkeit  $k$ , im einachsigen Dehnungsfeld gemessen wird, erfolgt die Messung des  $k$ -Faktors im einachsigen Spannungsfeld (s. Abschnitt 3.3.1). Daraus ergibt sich ein Unterschied zwischen  $k_1$  und  $k$ , der von der Querempfindlichkeit des DMS abhängt.

Bei Anwendung der DMS zum Messgrößenaufnehmerbau ist dies ohne Nachteil, weil Aufnehmer immer im fertigen Zustand kalibriert werden. Das gilt auch für alle anderen Anwendungen, bei welchen die Zuordnung von Messsignal und Messgröße durch Kalibrieren gefunden wird.

Bei der Spannungsanalyse im zweiachsigen Spannungsfeld sind Korrekturen erforderlich (s. Abschnitt 7.5), auf die bei kleiner Querempfindlichkeit ( $q \leq 0,01$ ) verzichtet werden kann [7-3].

Das Diagramm Bild 3.3-7 zeigt die Ergebnisse einer Untersuchung unterschiedlicher DMS-Serien nach der in [2-1] festgelegten Methode.



**Bild 3.3-7: Querempfindlichkeit  $q$  in Abhängigkeit von der Messgitter-Länge bei einigen DMS-Serien und Rosetten-Serien**

a) Linear-DMS

b) DMS-Rosetten

### 3.3.4 Der Temperaturgang einer DMS-Messstelle

Unter dem Temperaturgang einer Messstelle versteht man die temperaturabhängige Veränderung des Messsignals trotz völliger Abwesenheit oder völliger Konstanz mechanischer Beanspruchung des Messobjekts. Ein Temperaturgang kann

auftreten, wenn sich während des Beobachtungszeitraums, d. h. zwischen Nullabgleich bzw. Aufnahme des Bezugwertes und der Ablesung des Messwertes, die Temperatur des Messobjektes oder seiner Umgebung ändert. Der Temperaturgang ist eine reversible Erscheinung; er verschwindet wieder, wenn die ursprünglichen Temperaturbedingungen an der Messstelle wieder hergestellt sind. Bei konstanter Temperatur kann demzufolge kein Temperaturgang auftreten. In der Literatur wird der Temperaturgang oft „scheinbare Dehnung“ genannt, eine Bezeichnung, die keinen Hinweis auf die Ursache gibt.

Zum Temperaturgang  $\varepsilon_{\vartheta}$  tragen mehrere Ursachen bei:

- Die Wärmedehnung des Bauteilwerkstoffes,  $\alpha_B$ ,
- die Wärmedehnung des Messgitterwerkstoffes des DMS  $\alpha_M$ ,
- der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes des Messgitterwerkstoffes,  $\alpha_R$ ,
- die Temperaturänderung  $\Delta\vartheta$  als auslösende Größe.

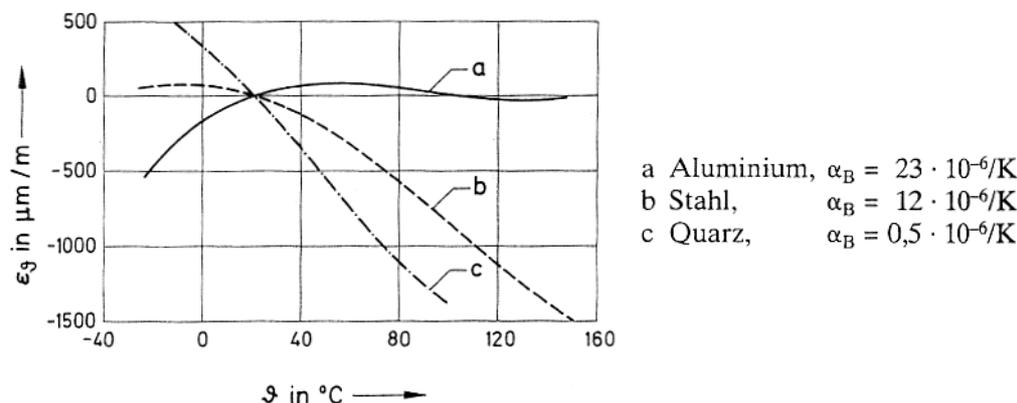
Zusätzlich kann noch der Temperaturgang des elektrischen Widerstandes der mit dem DMS in Reihe geschalteten Anschlusskabel einen Beitrag zum Temperaturgang liefern. Näheres darüber im Abschnitt 7.1.

Der Temperaturgang ist nicht zu verwechseln mit der Wärmedrift, einem nicht-reversiblen Vorgang, der sich gegebenenfalls dem Temperaturgang überlagert (s. Abschnitt 3.3:4.2).

Eine Berechnung des Temperaturgangs einer DMS-Messstelle ist näherungsweise nach der Gleichung

$$\varepsilon_{\vartheta} = \left( \frac{\alpha_R}{k} + \alpha_B - \alpha_M \right) \Delta\vartheta \quad (3.3-5)$$

möglich. Dieser Zahlenwert ist nur als Orientierungswert für einen begrenzten Temperaturbereich brauchbar, weil die beteiligten Parameter  $\alpha_R$ ,  $\alpha_B$ ,  $\alpha_M$  und  $k$  temperaturabhängig sind. Deshalb ist die Darstellung des Temperaturgangs in



**Bild 3.3-8: Temperaturgänge von DMS-Messstellen bei Verwendung gleichartiger DMS an verschiedenen Bauteilwerkstoffen (Beispiel)**

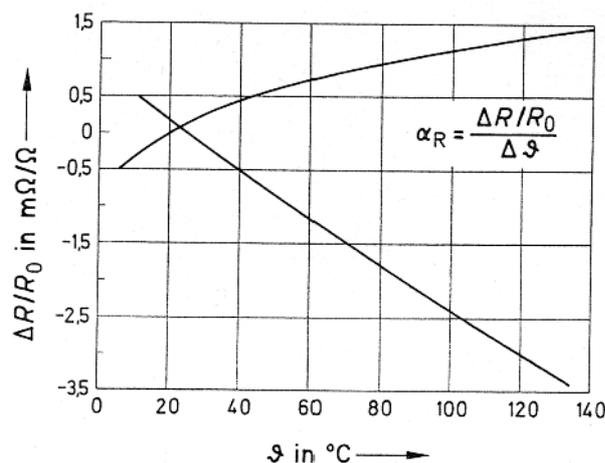
Diagrammform korrekter. Klebt man DMS mit identischen Eigenschaften auf Bauteilwerkstoffe mit unterschiedlichem  $\alpha_B$ , dann muss der Verlauf der  $\varepsilon_\vartheta$ -Kurve verschieden sein. Das Bild 3.3-8 zeigt Beispiele.

Voraussetzung für die Gültigkeit des Diagramms ist auch eine ausreichende Steifigkeit des Messobjektes, damit die von DMS und Klebstoff ausgehenden Kräfte wirkungslos bleiben. Diese Voraussetzung ist bei metallischen Objekten immer zutreffend, abgesehen von extrem dünnen Teilen.

Eine Messung, bei welcher das Messobjekt während einer mechanischen Beanspruchung gleichzeitig eine Temperaturänderung erfährt, liefert als Ergebnis die Summe aus der mechanischen Dehnung und der thermischen Dehnung. Darin ist der thermische Anteil der Dehnungsanzeige als Fehler enthalten. Diesen unbefriedigenden Zustand kann man durch selbstkompensierende DMS (s. Abschnitt 3.3.4.1) verhindern oder durch Kompensationsverfahren (s. Abschnitt 7.1) beseitigen [3-25, 3-26].

### 3.3.4.1 Selbst-temperaturgangkompensierende DMS

Es gibt Möglichkeiten, den DMS mit fertigungstechnischen Maßnahmen so zu beeinflussen, dass der Temperaturgang in einem begrenzten Temperaturbereich minimale Werte annimmt. Dazu macht man sich die Möglichkeit zunutze, den Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes des Messgitterwerkstoffs verändern zu können. Dies kann bei der überwiegend verwendeten Legierung Konstantan durch korrigierende Legierungszusätze und durch Wärmebehandlung erreicht werden. Das Bild 3.3-9 zeigt, dass sowohl positive als auch negative Werte zu erzielen sind.

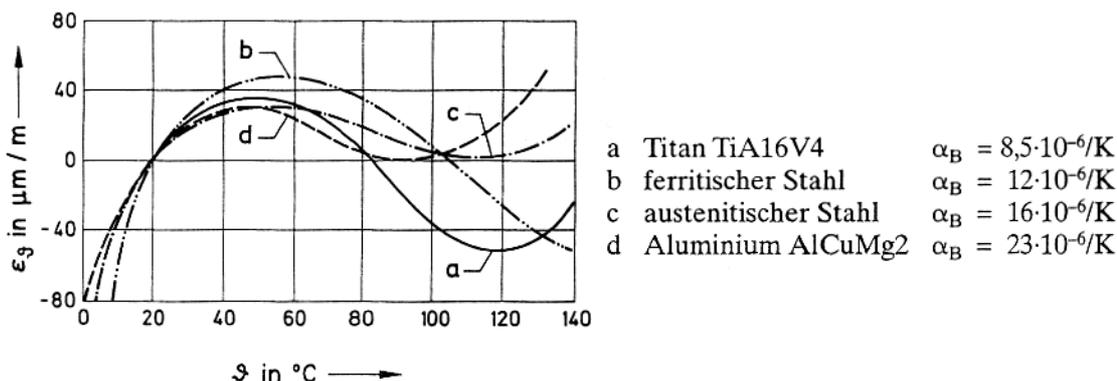


**Bild 3.3-9:** Temperaturkoeffizienten  $\alpha_R$  verschiedener Konstantan - Schmelzen.

Man muss  $\alpha_R$  so einstellen, dass

$$\alpha_R = (\alpha_M - \alpha_B) k \quad (3.3-6)$$

wird. Die in dieser Gleichung vernachlässigten nichtlinearen Glieder lassen eine vollständige Kompensation nicht zu. Aus dem Bild 3.3-10 ist zu entnehmen, wie weit sie gelingt (man beachte den gegenüber Bild 3.3.8 gestreckten Ordinatenmaßstab! ).



**Bild3.3-10: Temperaturgangreste selbst-temperaturgangkompensierender DMS bei optimaler Anpassung an die Wärmeausdehnungskoeffizienten verschiedener Bauteilwerkstoffe im Temperaturbereich 10 bis 130 °C.**

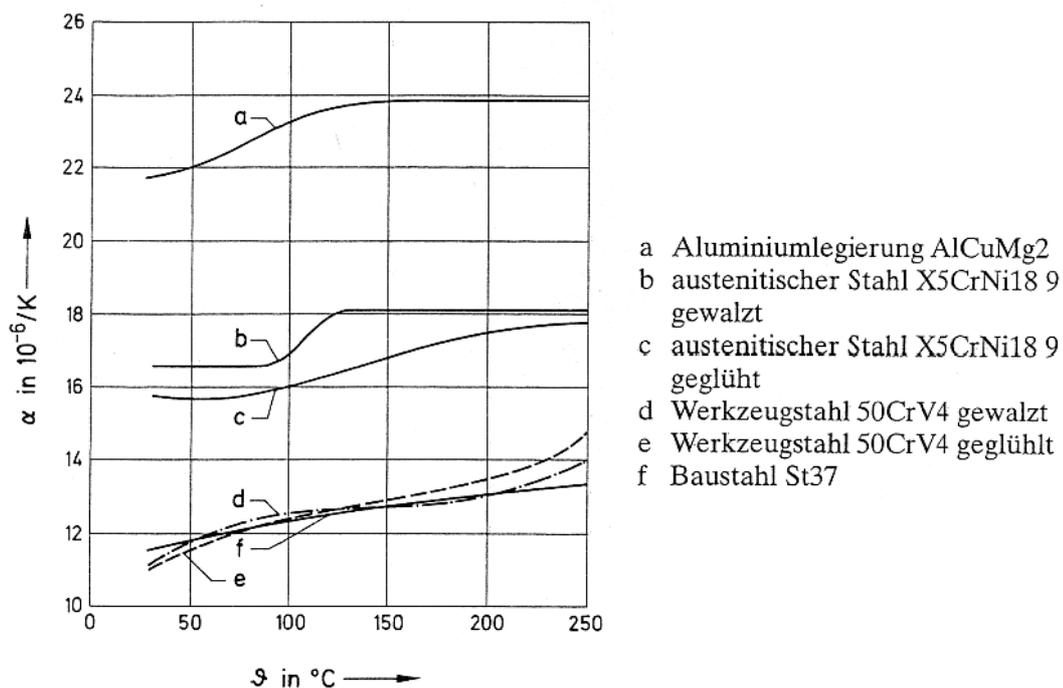
DMS dieser Art werden „DMS mit angepasstem Temperaturkoeffizienten“ oder auch „selbst-temperaturgangkompensierende DMS“ genannt. Temperaturgangdiagramme, wie sie Bild 3.3-10 zeigt, werden den DMS in einem Datenblatt beigelegt. Sie gelten nur dann, wenn das Bauteilmaterial die gleiche Wärmedehnungs-Charakteristik hat wie die Werkstoffprobe, an der die Kurve gemessen wurde. Das kann nicht in jedem Fall vorausgesetzt werden, wie das Bild 3.3-11 zeigt. Darin sind die differentiellen Wärmedehnungskoeffizienten verschiedener Werkstoffe aufgetragen, das ist der Zahlenwert der Steigung der Ausdehnungskurve in jedem Punkt. Man erkennt, dass schon der Behandlungszustand eines Werkstoffs (ob gewalzt oder gegläht) eine Veränderung bewirkt. Die Kurve für X5CrNi8 9 gewalzt zeigt eine Anomalie, die als Auswirkung von Eigenspannungen im Prüfling zu erklären ist. In seltenen Fällen wurden auch schon anisotrope Zustände beobachtet.

Solche Anomalien kann ein selbstkompensierender DMS natürlich nicht ausgleichen. Die durch den Bauteilwerkstoff bedingten Abweichungen des Temperaturverhaltens gegenüber der den DMS beigelegten Temperaturgangkurven sind nicht dem DMS anzulasten. Eine Kompensation dieser Restfehler ist mit den im Abschnitt 7.1 beschriebenen Methoden möglich. In diesem Zusammenhang sei aus [3-27] ein Abschnitt in Übersetzung zitiert:

„Man nehme unbedingt zur Kenntnis, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient (WK) eines Werkstoffes abhängt von:

1. seiner Zusammensetzung,
2. seiner Wärmebehandlung;
- 3 der Vorgeschichte seiner Kaltbearbeitung;
4. dem Temperaturniveau,
5. der Vorgeschichte seiner Wärmebehandlung;
6. der Verweildauer bei (erhöhter) Temperatur.

So ist es durchaus möglich; dass ein Werkstoff drei völlig verschiedene WK zeigt als Folge von drei verschiedenen Wärmebehandlungen, obwohl die Wärmebehandlungen vergleichbare Festigkeitseigenschaften ergeben: Außerdem können die WK in allen drei Fällen unterschiedlich abweichen. Es ist nahezu immer möglich, einen DMS an den WK eines Bauteilwerkstoffes . über irgendeinen Temperaturbereich anzupassen, vorausgesetzt, die Charakteristik dieses Werkstoffes bleibt wiederholbar von einem zum anderen Testlauf und von einem zum anderen Temperaturzyklus: Die meisten DMS sind in dieser Hinsicht weit mehr wiederholbar und stabil als die Werkstoffe, an welchen die Dehnungsmessungen gemacht werden.“ Ende des Zitats.

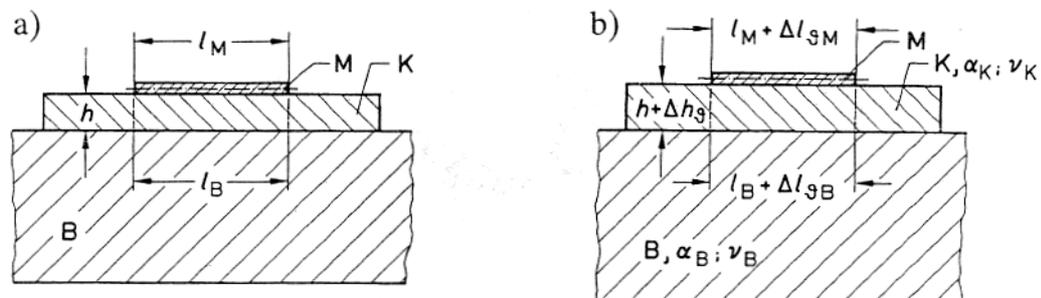


**Bild 3.3-11: Die Temperaturabhängigkeit des differentiellen linearen Wärmedehnungskoeffizienten.**

Die Anpassung selbstkompensierender DMS an die Wärmedehnung des Bauteilwerkstoffes ist optimal für ebene Applikationsflächen; Abweichungen zeigen sich bei gekrümmten Flächen mit kleinem Krümmungsradius.

Für einen korrekt applizierten DMS gelten folgende Voraussetzungen:  
An ebenen Applikationsflächen folgt der DMS der Wärmedehnung des Bauteils „längengetreu“, d. h., die Dehnung des Bauteils und diejenige des DMS sind identisch; die Gl. (3.3-5) beschreibt diesen Fall und das Bild 3.3.-12 zeigt die Zustände, der Deutlichkeit halber in starker Übertreibung.

Zur Vereinfachung werden die Messgitterträger und der Klebstoff als einheitlicher Werkstoff angenommen.



- B** Bauteil  
**M** Messgitter  
**K** Zwischenschicht aus Klebstoff und Messgitterträger  
**h** Dicke der Schicht K

**Bild 3.3-12:** Einfluss einer Temperaturänderung auf eine DMS-Applikation an ebener Fläche.

- a) Ausgangszustand bei der Temperatur  $\vartheta_0$   
b) Zustand bei der Temperatur  $\vartheta_0 + \Delta\vartheta$

Infolge der Temperaturänderung  $\Delta\vartheta$  verändert sich die ursprüngliche Länge  $l_B$  des Bauteils um den Betrag  $\Delta l_{\vartheta B}$ . Zwangsläufig muss der DMS dieser Längenänderungen folgen. Die Messgitterlänge  $l_M$ , welche der betrachteten Bauteilstrecke  $l_B$  gleich war, hat sich um die Strecke  $\Delta l_{\vartheta M}$  geändert. Daraus folgt:

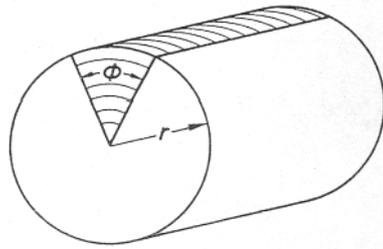
Wenn  $l_B = l_M$  ist, wird  $\Delta l_{\vartheta B} = \Delta l_{\vartheta M}$ .

Demzufolge sind auch die Dehnungen einander gleich:

$$\frac{\Delta l_{\vartheta B}}{l_B} = \varepsilon_{\vartheta B}; \quad \frac{\Delta l_{\vartheta M}}{l_M} = \varepsilon_{\vartheta M}; \quad \varepsilon_{\vartheta B} = \varepsilon_{\vartheta M}.$$

Die Zunahme der Schichtdicke  $h$  um  $\Delta h_{\vartheta}$  hat keinen Einfluss auf die Dehnungszustände, weil ein korrekt applizierter DMS den Dehnungen einer ebenen Bauteilfläche „längengetreu“ folgt.

Nunmehr soll untersucht werden, wie die Verhältnisse an einer gekrümmten Fläche sind. Dazu denke man sich einen Ausschnitt aus einer Walze, Bild 3.3-13. Die Wärmeausdehnung in der Achsrichtung entlang einer Mantellinie



Ø Sektorenwinkel = Umschlingungswinkel  
r Walzenradius

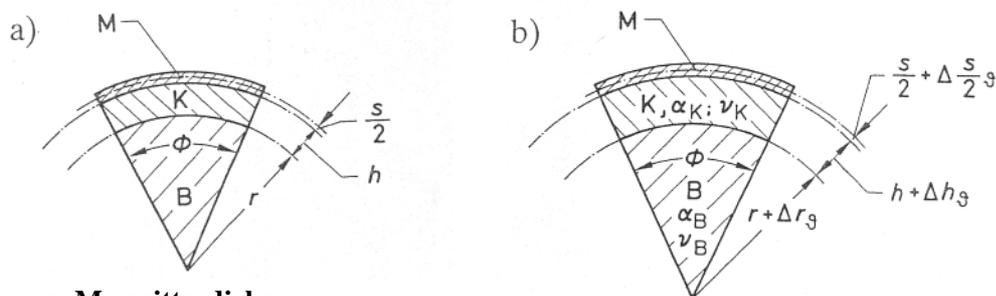
**Bild 3.3-13: Walzenausschnitt**

ist gleich der eines ebenen Stückes, nämlich  $\varepsilon_{\vartheta B} = \alpha_B \cdot \Delta \vartheta$ . In der Umfangsrichtung beträgt die Wärmeausdehnung

$$\varepsilon_{\vartheta B} = \frac{r\phi\alpha_B\Delta\vartheta}{r\phi} = \alpha_B\Delta\vartheta. \quad (3.3-7)$$

Sie ist damit erwartungsgemäß der Wärmeausdehnung der ebenen Fläche gleich.

Im Bild 3.3-14 ist der betrachtete Walzenausschnitt einschließlich der Applikationsschichten im Querschnitt gezeichnet; die Dicken wurden der Deutlichkeit halber wiederum stark übertrieben dargestellt.



s Messgitterdicke  
K, B, M, h siehe Bild 3.3-12  
weitere Erläuterungen im Text

**Bild 3.3-14: Walzenausschnitt mit auf die Mantelfläche appliziertem DNIS (schematisch)**

- a) Ausgangszustand bei der Temperatur  $\vartheta_0$
- b) Zustand bei der Temperatur  $\vartheta_0 + \Delta\vartheta$ .

Die Schichten K und M haben die gleiche Bedeutung wie bei der ebenen, geschichteten Platte (s. Bild 3.3-12). Bei einer Erwärmung nehmen infolge der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten die Strecken  $r$ ,  $h$  und  $s$  nicht im gleichen Verhältnis zu wie der Bauteilwerkstoff. Außerdem entsteht in den Schichten K und M eine zusätzliche, überlagerte Dickenveränderung vom  $\nu$ -fachen ihrer Dehnungsbehinderung. Unter diesen Gegebenheiten wird Wärmedehnung des Messgitters  $\varepsilon_{\vartheta M}$  an der gekrümmten Fläche eine andere als

an der ebenen Fläche. Die Wärmedehnung des Messgitters im Bereich seiner neutralen Faser, d. h. auf der Linie  $s/2$ , beschreibt der Ausdruck

$$\varepsilon_{\vartheta M} = \frac{\{r \alpha_B + [h \alpha_K + 2 \nu_K (\alpha_K - \alpha_B)]\} + s/2 [\alpha_M + 2 \nu_M (\alpha_M - \alpha_B)]}{r + h + s/2} \Delta \vartheta. \quad (3.3-8)$$

Während bei der ebenen Platte die beiden Dehnungen  $\varepsilon_{\vartheta B}$  und  $\varepsilon_{\vartheta M}$  einander gleich waren, ergibt sich hier ein Unterschied. Damit werden auch die Temperaturgänge der Messstellen verschieben.

Um eine Vorstellung von der Größenordnung des Temperaturganges zu geben, wurden zwei Beispiele durchgerechnet.

#### Beispiel 1:

- $r$  = Wellenradius: 5 mm
- $h$  = Klebstoffdicke plus Messgitterträger: 100  $\mu\text{m}$
- $s$  = Dicke des Messgitters: 5  $\mu\text{m}$
- $\alpha_B$  = Wärmeausdehnungskoeffizient des Bauteilwerkstoffes:  $12 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
- $\alpha_K$  = Wärmeausdehnungskoeffizient des Klebstoffes:  $70 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
- $\alpha_M$  = Wärmeausdehnungskoeffizient des Messgitterwerkstoffes:  $15 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
- $\nu_K$  = Querszahl des Klebstoffs und Messgitterträgers: 0,4
- $\nu_M$  = Querszahl des Messgitterwerkstoffes: 0,3

Ergebnis:  $\varepsilon_{\vartheta M} = 14,05 \cdot 10^{-6}/\text{K}$   
 gegenüber  $\varepsilon_{\vartheta B} = 12,00 \cdot 10^{-6}/\text{K}$   
 Differenz  $\varepsilon^* (\vartheta) = +2,05 \cdot 10^{-6}/\text{K}$

#### Beispiel 2:

Bei einem Radius  $r = 10$  mm (alle anderen Daten unverändert) wird  $\varepsilon_{\vartheta M} = 13,04 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ .

Die Differenz  $\varepsilon^* (\vartheta)$  beträgt jetzt nur noch  $+ 1,04 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ .

#### Folgerungen:

- Die Temperaturgänge von DMS-Messstellen sind von der Kontur der Applikationsfläche abhängig. Applikationen, bei welchen das Messgitter des DMS in seiner aktiven Richtung gekrümmt ist (der Krümmung tangential folgt), haben einen anderen Temperaturgang als solche, bei denen das Messgitter in seiner aktiven Richtung gerade bleibt.
- Der Unterschied zwischen den beiden Zuständen nimmt ab mit zunehmendem Krümmungsradius.

- Der Einfluss der Krümmung wird um so geringer, je mehr sich die Wärmeausdehnungskoeffizienten des Bauteilwerkstoffes und - vorzugsweise - des Messgitterträgers und des Klebstoffes einander angleichen.
- Bei konkaven bzw. konvexen Krümmungen sind die Vorzeichen der Temperaturgangänderungen entgegengesetzt.
- Bei metallischen Bauteilwerkstoffen wächst die Temperaturgangänderung mit zunehmender Klebstoffschichtdicke.
- Selbst-temperaturgangkompensierende DMS sind für Applikationen an ebenen Flächen ausgelegt. An gekrümmten Flächen wird ihre Kompensationwirkung in dem beschriebenen Umfang unvollständig.
- Die temperaturgangkompensierende Wirkung der Wheatstone-Brücke wird ebenfalls unvollkommen, wenn der „aktive“ DMS und der „Kompensations-DMS“ an Flächen mit unterschiedlicher Kontur appliziert sind.

Messfehler können freilich nur dann entstehen, wenn sich die Objekttemperatur während einer Messung ändert.

Für die experimentelle Spannungsanalyse mag der beschriebene Temperaturgangfehler vielfach bedeutungslos sein, nicht aber im Aufnehmerbau, wo höhere Messgenauigkeit angestrebt wird. Kennt man die Ursache von Fehlern, so lässt sich auch Abhilfe schaffen. In der Praxis sollte man vornehmlich zwei Maßnahmen in Betracht ziehen:

- Die Mantelfläche des Zylinders wenigstens im Bereich der DNIS mit kleinen Anflächungen versehen, um den störenden Effekt zu beseitigen. eine Maßnahme, die sich im Aufnehmerbau leicht treffen lässt.
- Die Klebstoffschicht möglichst dünn machen.

### 3.3.4.2 Thermische Drift

Die thermische Drift entsteht vornehmlich durch Gefügeänderungen und Oxydation oder Korrosion des Messgitterwerkstoffes oder auch durch Entspannungsvorgänge im DMS oder Klebstoff infolge längerer Wärmeeinwirkung. Sie ist temperatur- und zeitabhängig. Die thermische Drift verursacht nichtreversible Nullpunktänderungen des applizierten DMS.

Wesentlichen Anteil am Driften haben die Legierungsbestandteile und der Bearbeitungszustand des Messgitterwerkstoffes. So zeigen durch Ziehen oder Walzen kaltverfestigte Messgitterwerkstoffe stärkere und schon bei relativ niedriger Temperatur (z. B. 100 °C) einsetzende Drift, während weichgetemperte Legierungen weniger driften. Hier wirkt sich, wie beim Temperaturgang, das „Vorleben“ des DMS aus. So kann weichgetemperter Werkstoff durch Dehnen bis in den plastischen Verformungsbereich oder durch dynamische Beanspruchung

kalt verfestigt werden und dabei seine Eigenschaften ändern. Plastische Verformung kann unter Umständen schon infolge unterschiedlicher Wärmedehnung von Messgitter und Bauteil entstehen. Ebenso kann unsachgemäße Handhabung des DMS beim Applizieren dazu beitragen.

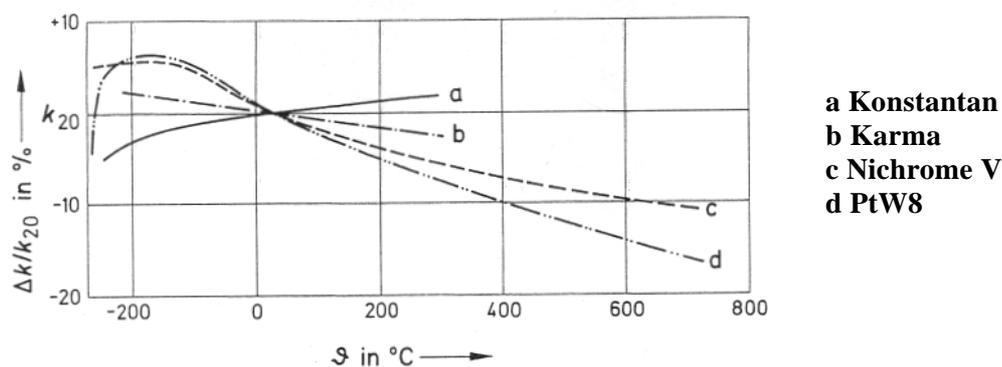
Aber auch die Klebstoffe sind an der Drift beteiligt. Deshalb können gleichartige DMS verschieden driften, wenn sie z. B. mit kalthärtendem oder mit heißhärtendem Klebstoff appliziert sind.

Im Hochtemperaturbereich haben metallurgische Einflüsse einen wesentlichen Einfluss auf das Driftverhalten der DMS. In [3-23] wird darüber ausführlich berichtet.

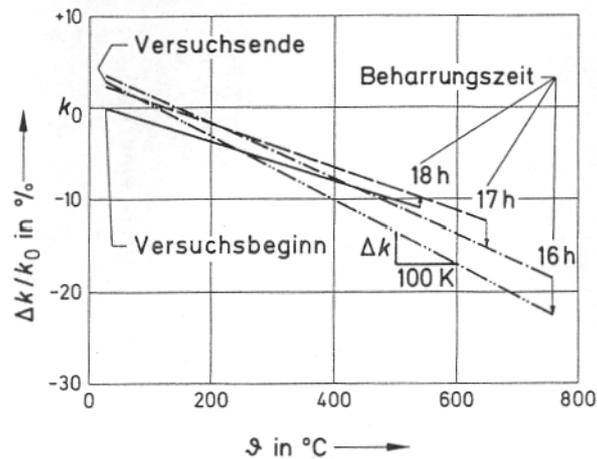
Die thermische Drift tritt nur bei nullpunktbezogenen Messungen als Fehler auf. Ausschalten lässt sich der Fehler durch die Kompensationswirkung der Wheatstone'schen Brückenschaltung, bei der Halbbrücken- und der Vollbrückenschaltung, bei der Viertel- und Zweiviertelbrücke durch Anwendung von Kompensations-DMS. Es sind dabei die gleichen Voraussetzungen zu erfüllen wie bei der Kompensation des Temperaturgangs, Abschn. 7.1. Die Wirksamkeit der Kompensation wird jedoch infolge größerer Exemplarstreuungen geringer sein als beim Temperaturgang.

### 3.3.5 Die Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit

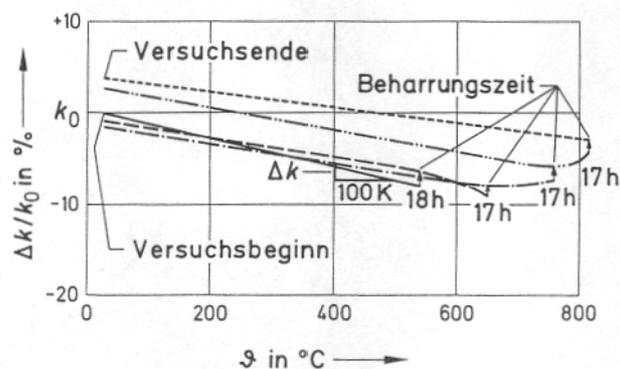
Die Empfindlichkeit eines DMS wird durch den k-Faktor ausgedrückt (s. Abschnitt 3.3.1). Der den DMS-Packungen beige-schriebene Zahlenwert für den k-Faktor gilt bei Raumtemperatur. Er ändert sich bei abweichender Temperatur, und zwar - je nach verwendetem Messgitterwerkstoff - in unterschiedlichem Maße. Im Bild 3.3-15 sind die relativen k-Faktor-Änderungen in Abhängigkeit von der Temperatur für 4 gebräuchliche Messgitterlegierungen dargestellt.



**Bild 3.3-15: Die Temperaturabhängigkeit des k-Faktors des DMS für 4 gebräuchliche Messgitterlegierungen**



**Bild 3.3-16: Die Abhängigkeit des k-Faktors von der Temperatur und der Einwirkungsdauer bei Platin-Wolfram DMS (PtW8)**



**Bild 3.3-17: Die Abhängigkeit des k-Faktors von der Temperatur und der Einwirkungsdauer bei Nichrome-V-DMS**

Angaben über die Temperaturabhängigkeit des k-Faktors finden sich auf dem jeder DMS-Packung beiliegenden Datenblatt. Bei den Hochtemperatur-Legierungen Platin-Wolfram und Nichrome V findet man darüberhinaus eine zusätzliche Veränderung des k-Faktors in Abhängigkeit von der Temperaturhöhe und deren Einwirkungsdauer, wie aus den Bildern 3.3-16 und 3.3-17 hervorgeht.

### 3.3.6 Die statische Dehnbarkeit

Die Anwendung der DMS ist im allgemeinen auf einen Dehnungsbereich von  $\leq \pm 3000 \mu\text{m/m}$  beschränkt. Dieser Bereich wird jedoch bei Messungen an Kunststoffen oder bei Untersuchungen im plastischen Dehnungsbereich von Metallen zum Teil weit überschritten. Es stellt sich die Frage, ob und wie weit mit DMS große Dehnungen gemessen werden können.

In diesem Zusammenhang erscheint es angebracht, einige allgemeine Betrachtungen

tungen über das Verhalten von DMS bei großen Dehnungen anzustellen. (Hierzu auch [3-28,3-29].)

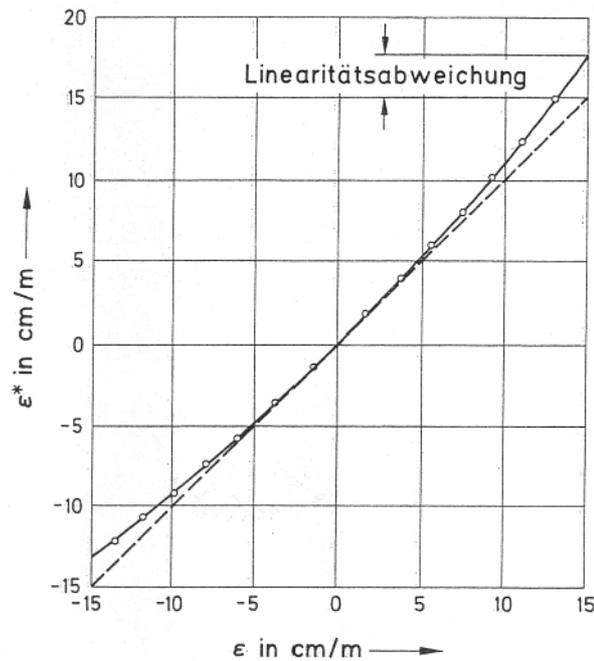
Die maximale Dehnbarkeit eines DMS hängt von der Konstruktion und von den Werkstoffen des DMS ab. Es gibt DMS-Serien, die in einem maximalen Dehnbereich von nur  $\pm 2$  cm/m anwendbar sind, während andere Serien bis  $\pm 20$  cm/m beansprucht werden können ( $1 \text{ cm/m} = 10000 \text{ } \mu\text{m/m}$ ). Angaben darüber entnehme man den Prospekten. Nach den Empfehlungen in [2-1] gelten Prospektangaben für DMS mit 6 mm Messgitterlänge. Aus Erfahrung kann man sagen, dass lange DMS größere Dehnungen ertragen als kurze DMS.

Durch die enorme plastische Verformung verfestigt sich der Werkstoff des Messgitters und verliert seine ursprüngliche Duktilität. Deshalb sind Wiederholungen nicht oder nur sehr begrenzt möglich, es sei denn, die Dehnbarkeit des DMS wäre nicht bis zur Grenze ausgenutzt worden. Untersuchungen über die Wiederholbarkeit großer Dehnungen bei nur teilweiser Ausnutzung der maximalen Dehnbarkeit des DMS sind nicht bekannt geworden. Sie wären mit der in [2-1] beschriebenen Vorrichtung auch nur schwerlich durchzuführen, weil über die Reproduzierbarkeit der Oberflächendehnung des plastisch verformten Testbalkens keine sichere Aussage zu machen ist.

Die Anwendung von Hochdehnungs-DMS an Gummi oder ähnlichen Werkstoffen ist nicht nur wegen der einmaligen Dehnbarkeit, sondern auch wegen der Dehnungsbehinderung weicher Werkstoffe unzuweckmäßig oder unmöglich. Hier sind andere Dehnungsmessgeräte mit kleiner Rückstellkraft zweckmäßiger. Neben handelsüblichen Dehnungsaufnehmern, die sich dazu eignen, findet man in [3-30] die Beschreibung einer Hilfseinrichtung zur Messung von Dehnungen mit DMS an Gummi.

Bei großen Dehnungen ergeben sich seitens des DMS und auch seitens der Wheatston'schen Brückenschaltung (s. Abschn. 5.2) Nichtlinearitäten, die den Rahmen des Vernachlässigbaren überschreiten. Während in der Literatur die Linearitätsprobleme der Wheatstone-Brücke ausreichend dargelegt sind, finden sich keine Angaben über das Linearitätsverhalten von DMS in Hochdehnungsbereich. Gelegentlich wird der Linearitätsfehler der sogenannten „Viertelbrückenschaltung“, das ist die im Hochdehnungsbereich nahezu ausschließlich benutzte Schaltungsart, als einziger Fehler angesehen. Eine nach den Vorschriften in [2-1] im Dehnungsbereich von  $\pm 15 \text{ cm/m} = \pm 150000 \text{ } \mu\text{m/m}$  durchgeführte Untersuchung führte zu der Erkenntnis, dass die Kennlinie metallischer DMS mit Konstantan-Messgitter einen gekrümmten Verlauf hat, Bild 3.3-18. In dem Diagramm ist die wirkliche Dehnung  $e$  an der Abszisse und der aus der relativen Widerstandsänderung nach Gl. (3.3-9) errechnete Dehnungswert  $\varepsilon^*$  an der Ordinate aufgetragen.

$$\varepsilon^* = \frac{\Delta R/R_0}{k} \quad (3.3-9)$$



**Bild 3.3-18: Messwert  $\epsilon^*$  als Funktion der tatsächlichen Dehnung  $\epsilon$  für einen DMS im Hochdehnungsbereich (DMS-Kennlinie)**

Der Ordinatenabstand zwischen der Kennlinie und der gestrichelt eingezeichneten Tangente mit der Steigung  $\epsilon^* = \epsilon$  kennzeichnet die Linearitätsabweichung des DMS.

Das hier mitgeteilte Ergebnis gilt wegen möglicher Randeffekte strenggenommen nur für den untersuchten DMS-Typ. Es darf aber angenommen werden, dass sich Dehnungsmessstreifen mit anderen Messgitterformen und auch solche aus anderen Messgitterlegierungen gleich oder doch ähnlich verhalten, sofern sie sich für Hochdehnungsmessungen eignen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich die Linearitätsabweichungen des DMS und der Viertelbrückenschaltung gegenseitig weitgehend kompensieren (s. Abschnitt 5.2 und [3-29]).

Die mit der plastischen Verformung des DMS einhergehende Gefügeänderung des Messgitterwerkstoffs verändert dessen Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes. Deshalb können Hochdehnungs-DMS nicht als selbst-temperaturgangkompensierende DMS hergestellt werden. Andere selbstkompensierende DMS verlieren diese Eigenschaft, wenn sie stark plastisch verformt werden. Bei Konstantan als Messgitterwerkstoff verläuft die Veränderung in Richtung eines positiven Temperaturgangs.

Die maximale Dehnbarkeit eines DMS kann nur dann erreicht werden, wenn es dessen Befestigung zulässt. Das setzt ausreichende Dehnbarkeit und Binde-

festigkeit des Klebstoffs ebenso voraus wie eine einwandfreie Applikationsarbeit. Auf die speziellen Anforderungen an die Bindemittel wird im Abschnitt 4.1 eingegangen.

### 3.3.7 Die dynamische Dehnbarkeit

DMS eignen sich hervorragend zur Messung dynamischer Dehnungsvorgänge. Infolge ihrer sehr geringen Masse entsteht kein spürbarer Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Messobjektes. Hinsichtlich der DMS sind verschiedene Gesichtspunkte zu beachten:

- Das Dauerschwingverhalten bzw. das Ermüdungsverhalten der DMS,
- die mit DMS noch sicher erfassbare obere Frequenz.

Die Bindemittel haben hierbei einen nur geringen Einfluss. Es darf aber nicht übersehen werden, dass beim Punktschweißen unter Umständen die Schwingfestigkeit des Messobjektes beeinträchtigt wird. Bei Klebeverbindungen hingegen findet man im Bereich höchster Frequenzen ein Absinken der Obergrenze mit ansteigender Temperatur. Die Ursache ist im Absinken des E-Moduls der Klebstoffe (und auch des DMS-Trägerwerkstoffs) zu suchen, dessen Verminderung zu einer Verschlechterung der Übertragungsgeschwindigkeit beiträgt. Andererseits liegt die Grenze der mit DMS noch messbaren Frequenzen so hoch, dass sie nur mit extremen Versuchsapparaturen erreicht und untersucht werden konnte [3-31, 3-32]. Unter normalen Versuchsbedingungen werden - selbst bei Schockbeanspruchung - die Frequenzen der zu messenden Schwingungen beträchtlich unterhalb dieser Grenze liegen.

#### 3.3.7.1 Das Dauerschwingverhalten

Wird ein DMS auf Dauer dynamisch beansprucht, dann können in Abhängigkeit von der Amplitude und der Lastspielzahl Unregelmäßigkeiten in der Dehnungsanzeige entstehen, die in erster Linie auf Störungen im Messgitter oder auch in den Anschlüssen zurückzuführen sind. Die Schwingfestigkeit der Trägerwerkstoffe des Messgitters und der Klebstoffe ist im allgemeinen so groß, dass sie als Schadensquelle ausscheiden.

Bei DMS mit metallischem Messgitter entsteht infolge der Dauerschwingbeanspruchung eine Werkstoffermüdung, die sich auf zweierlei Weise äußert:

- In Abhängigkeit von Amplitude und Lastspielzahl entsteht eine Zunahme des elektrischen Widerstandes, die sich als dynamische Nullpunktdrift äußert.
- Mit zunehmender Werkstoffzerrüttung entstehen an den Korngrenzen des Messgittermetalls zunächst Mikrorisse, die sich langsam vergrößern bis zum Dauerbruch.

Eine Methode zur Bestimmung des Dauerschwingverhaltens von DMS ist in [3-33] beschrieben; das Verfahren wurde in [2-1] übernommen. Die Dauerschwingdiagramme Bild 3.3-19 a bis c wurden nach dieser Methode ermittelt. Darin kennzeichnen die durchgezogenen Linien die jeweils im Zusammenwirken von Wechseldehnungsamplitude  $\varepsilon_w$  und Lastspielzahl  $n$  entstandene Nullpunktdrift in  $\mu\text{m}/\text{m}$  entsprechend dem beigeschriebenen Zahlenwert. Die gestrichelten Linien kennzeichnen den eingetretenen Dauerbruch am Messgitter (M) bzw. an den Zuleitungen (Z). Im Bild 3.3-19 b ist noch eine Schadenslinie (M) für eine der Wechseldehnung überlagerte positive statische Mitteldehnung  $\varepsilon_m$  eingezeichnet. Die Untersuchung wurde bis zu einer maximalen Lastspielzahl  $n = 10^7$  geführt.

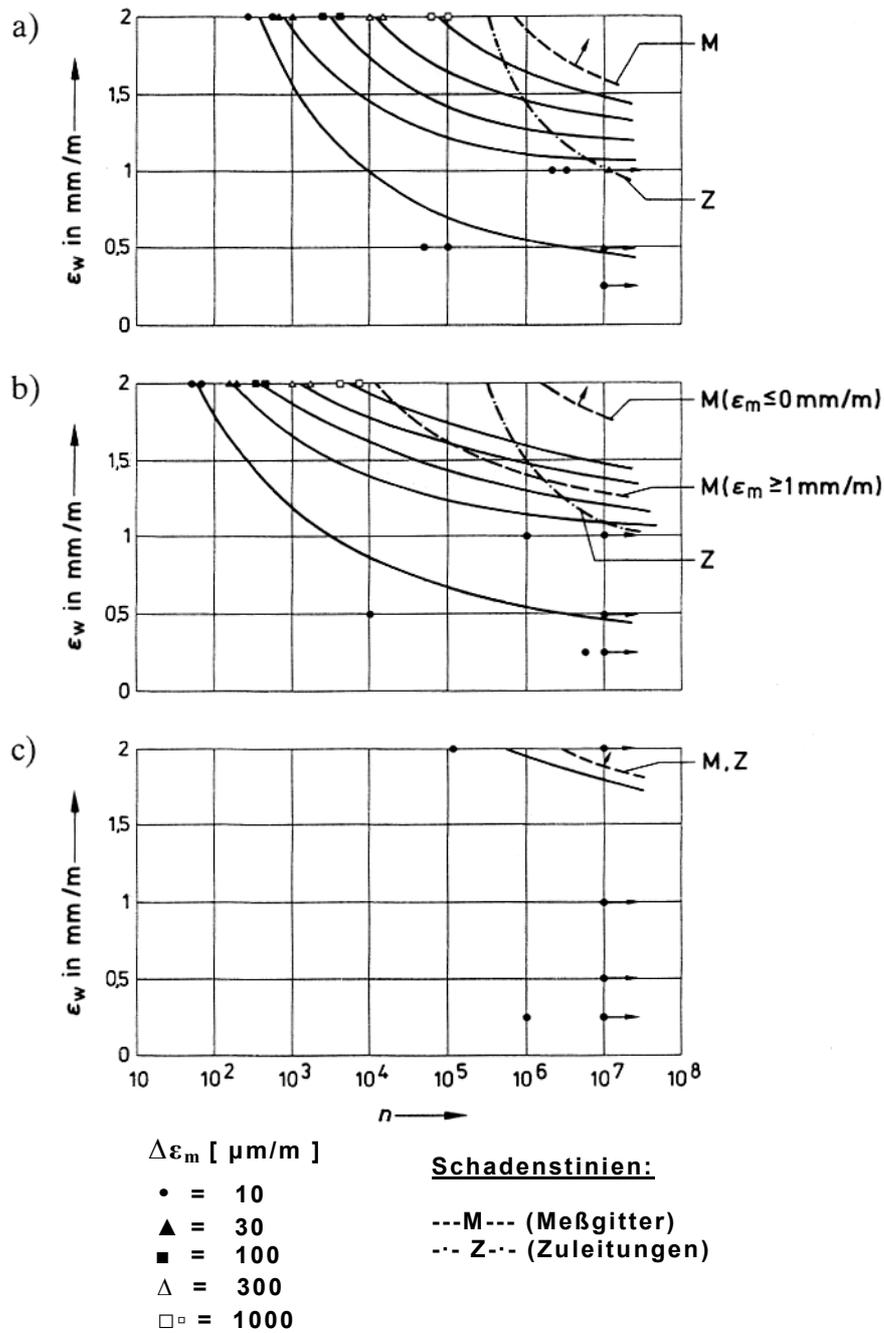
Das Diagramm 3.3-19 c unterscheidet sich wesentlich von den übrigen. Im Text der Veröffentlichung wird gesagt: „Nur bei sehr großen Beanspruchungen tritt eine Nullpunktänderung von  $10 \cdot 10^{-6}$  Dehnung auf. Eine Nullpunktänderung von  $30 \cdot 10^{-6}$  Dehnung oder mehr wird in dem untersuchten Beanspruchungsbereich überhaupt nicht erreicht.“ Eigene Untersuchungen bestätigen ein gutes Dauerschwingverhalten dieses DMS-Typs bis zu einer Wechseldehnungsamplitude von  $\pm 3000 \mu\text{m}/\text{m}$ . Für ihn wurde ein Messgitterwerkstoff mit einer höheren Elastizitätsgrenze als üblich verwendet. Leider lässt sich die Elastizitätsgrenze der Messgitterwerkstoffe nicht beliebig hoch treiben. Deshalb sind an Messobjekten Daueruntersuchungen mit größeren Amplituden nur mit dehnungsuntersetzenden Hilfseinrichtungen möglich, wie sie z. B. in [3-30] beschrieben werden, und mit Aufnehmern, wie Bild 3.3-33 einen darstellt.

Es zeigt sich außerdem eine gegenseitige Abhängigkeit von Dauerschwingverhalten und maximaler statischer Dehnbarkeit. Die maximale statische Dehnbarkeit von DMS mit hohem Dauerschwingvermögen endet bei ca. 1 ... 2 cm/m (10000 ... 20000  $\mu\text{m}/\text{m}$ ), während sogenannte Hochdehnungs-DMS nur sehr bescheidenes Dauerschwingverhalten besitzen.

Ein in Amerika anzutreffender Messgitterwerkstoff „Isoelastic“ zeichnet sich zwar durch sehr gutes Dauerschwingverhalten aus, gleichzeitig aber auch durch einen sehr großen Temperaturgang. Außerdem reagiert er stark auf magnetische Einstreuungen. Er wird - nach Kenntnis des Verfassers - von europäischen DMS-Herstellern nicht verwendet.

Gute Ergebnisse zeigt das Diagramm 3.3-20 für Folien-DMS, diesmal für einen erweiterten Wechseldehnungsbereich bis  $\pm 3000 \mu\text{m}/\text{m}$ . Es kann als typisch gelten für Universal-DMS hoher Qualität. Allgemein gilt: Die Schwingfestigkeit eines DMS ist im negativen Schwellbereich am größten, im Wechselbereich geringer und im positiven Schwellbereich am kleinsten. DMS mit langem Messgitter zeigen eine etwas bessere Schwingfestigkeit als kurze DMS.

Ein Tip für die Praxis: Soll eine Messung im positiven Schwellbereich ausgeführt werden, dann belaste man das Messobjekt (sofern die Gegebenheiten das



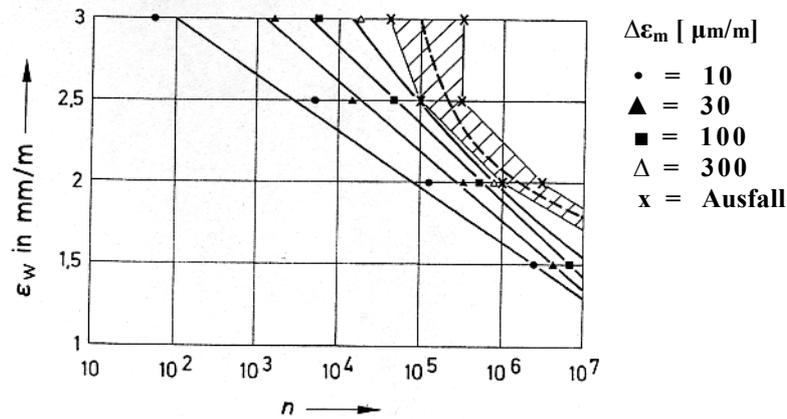
Ein Pfeil an einem Symbol bedeutet, dass bei dieser Lastspielzahl der betreffende Effekt noch nicht aufgetreten ist.

Weitere Erläuterungen im Text.

**Bild 3.3-19: Dauerschwingdiagramme verschiedener DMS-Typen mit Draht-Messgitter \*)**

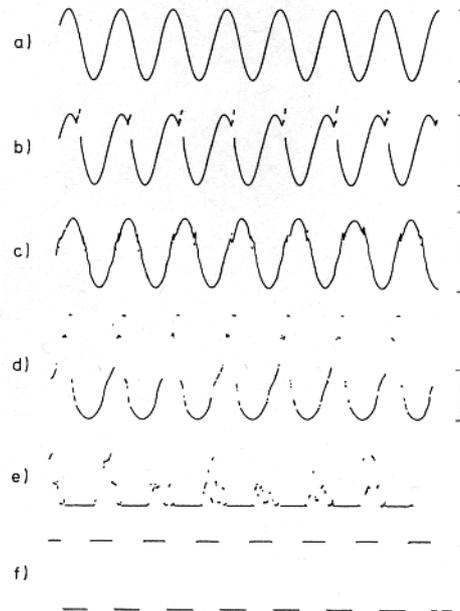
- a) HBM-Typ 20/600 FB1
- b) HBM-Typ 20/600 FB3
- c) HBM-Typ 20/120 FB4S

\*) Nicht mehr im HBM-Programm



**Bild 3.3-20: Dauerschwingdiagramm einer Folien-DMS-Serie**  
 Die Nullpunktdrift in Abhängigkeit von der Wechseldehnungsamplitude,  $\epsilon_w$  und der Lastspielzahl  $n$ .

zulassen) mit der halben Spitzenlast und appliziere den DMS in diesem Zustand. Beim Versuch erfährt der DMS dann eine Wechseldehnung mit nur halber Spitzenlast. Schließlich sei noch erwähnt, dass Probleme eher in den zum DMS führenden Leitungen und Verbindungen auftreten, als im DMS selbst, wie praktische Erfahrungen gezeigt haben. Deshalb verwende man hochflexibles Leitungsmaterial und Sorge für eine möglichst beanspruchungsarme Leitungsführung.

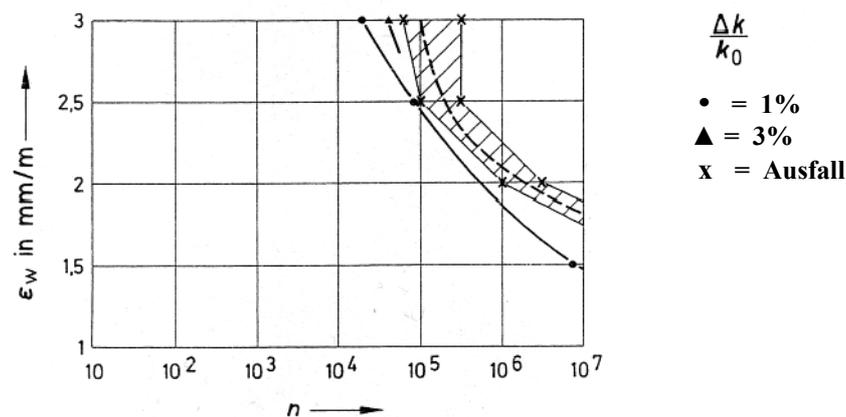


**Bild 3.3-21: Einige typische, im Lauf der Wechselbeanspruchung auftretenden Schwingungsbilder (nach [3-33]).**  
 Die Eichmarken am rechten Rand der Diagramme geben die Schwingbreite von  $4000 \mu\text{m/m}$  an, die ein unzerstörter DMS anzeigen müsste.

Den beginnenden Dauerbruch im DMS kann man gut am Oszilloskop beobachten. Man erkennt die ersten leichten Anrisse des Messgitters als Zacken im positiven Schwingungsbild, die sich mit dem Rissfortschritt zu einem „Ährenfeld“ ausweiten können. Nach vollständiger Durchtrennung hat der Leiter nur noch Schalterfunktion (Bild 3.3-21).

Beim Halbleiter DMS besitzt das aus einkristallinem Silizium bestehende „Messgitter“ über den gesamten Dehnbarkeitsbereich von ca.  $\pm 5000 \mu\text{m}/\text{m}$  zwar eine ideale Schwingfestigkeit, die leider nicht für die Anschlüsse zutrifft (s. Bild 1.0-9).

Dass im Klebstoff oder im Messgitter-Träger als Folge einer dynamischen Dauerbelastung Risse auftreten, ist wegen der hohen Wechselfestigkeit der betreffenden Werkstoffe nicht zu erwarten.



**Bild 3.3-22: Änderung des k-Faktors bei Dauer-Wechselbeanspruchung in Abhängigkeit von der Wechseldehnungsamplitude  $\epsilon_w$ , und der Lastspielzahl  $n$ .**

Außer der im Dauerschwingversuch erreichten Lastspielzahl und der damit einhergehenden Nullpunktdrift interessiert noch der Einfluss auf die Empfindlichkeit des DMS, auf den k-Faktor. Aus dem Diagramm Bild 3.3-22 geht hervor, dass eine k-Faktor-Zunahme um 1 % das erste Anzeichen für den unmittelbar bevorstehenden Totalschaden ist. Die vorher ermittelten Empfindlichkeitsunterschiede liegen im Bereich der Messunsicherheit der Prüfapparatur.

### 3.3.7.2 Die Grenzfrequenz

Zur Beurteilung der Fähigkeit des DMS bezüglich des Wiedergabevermögens dynamischer Dehnungsvorgänge sind die Arbeiten von Oi [3-31] und Bagaria/Sharpe [3-32] hilfreich. Oi untersuchte den Dehnungssprung, der beim Zerreißen eines gekerbten, gehärteten Stahlstabes auftrat. Bagaria und Sharpe untersuchten die Wiedergabe einer Stoßwelle, die von einem Pendelschlagwerk beim

Auftreffen des Hammers auf die Stirnfläche eines Stahlstabes ausgelöst wurde. Die Kontaktflächen waren innerhalb einer Toleranz von 325 nm eben und hatten eine Rauigkeit zwischen 76 und 127 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ). Diese Zahlen sind insofern von Interesse, als sie den enormen Aufwand kennzeichnen, der notwendig ist, um einem Rechtecksprung möglichst nahe zu kommen. Ich erwähne dies auch, weil ein solcher Zustand bei alltäglichen Messproblemen nie auftreten wird, wie die spätere Beschreibung eines Versuchs noch zeigen wird.

Für die Fähigkeit eines DMS zur Wiedergabe eines Rechtecksprungs durch einen DMS gelten folgende Überlegungen:

Der Dehnungssprung durchläuft die Länge des DMS in der Zeit  $t$ . Infolge der Mittelwertbildung des DMS wird das vom DMS gelieferte Signal in Abhängigkeit von der überstrichenen Messgitterlänge mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Dehnungsprungs linear ansteigen bis zum Maximalwert. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit entspricht der Schallgeschwindigkeit  $c$ . Die theoretisch benötigte Zeitspanne  $t_{\text{th}}$  bis zum Erreichen des vollen Messwertes beträgt

$$t_{\text{th}} = \frac{l_{\text{DMS}}}{c}. \quad (3.3-10)$$

Durch verschiedene, nicht völlig geklärte Einflüsse wird die tatsächliche Signalwiedergabe im Bild 3.3-23c gezeigte Form annehmen.

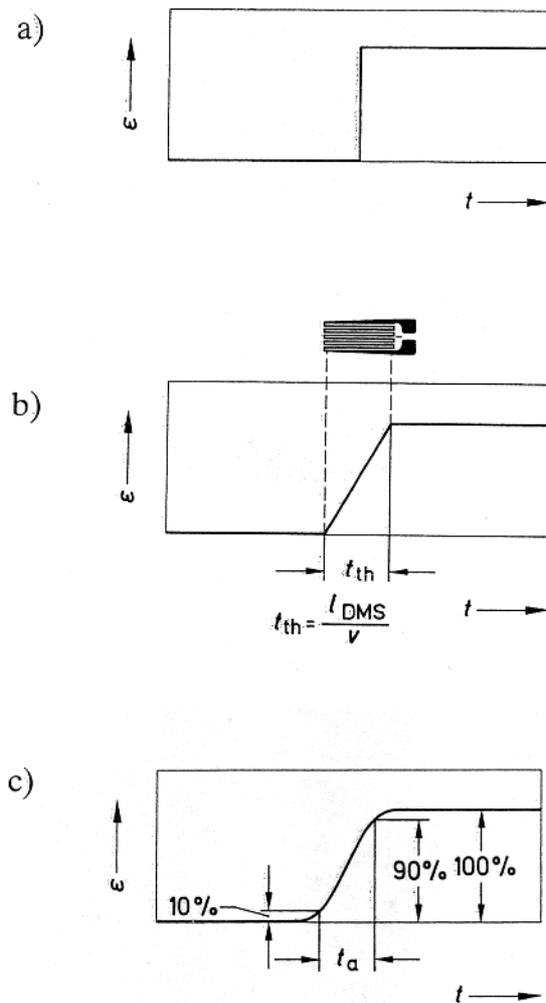
Bei Sprungfunktionen wird als Anstiegszeit  $t_a$  die Zeitspanne zwischen 10 % und 90 % des Messwertes definiert.

Oi formuliert

$$t_a = t_b + 0,8 \frac{l_{\text{DMS}}}{c}. \quad (3.3-11)$$

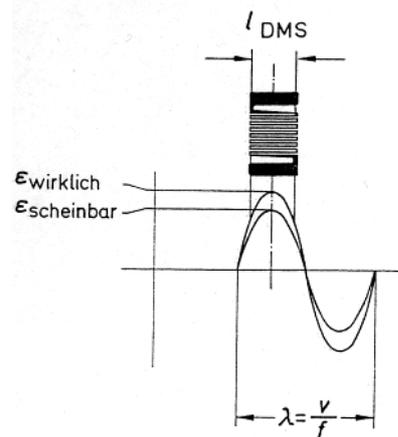
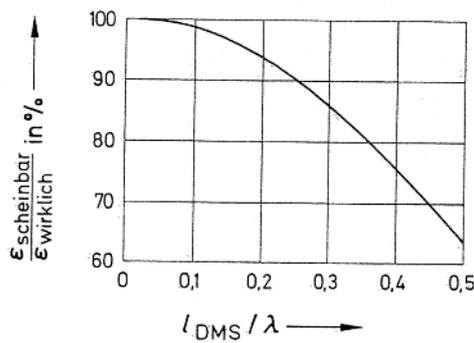
worin der Summand  $t_b$  eine vom Versuchs- und Messaufbau abhängige Zeit ist, die von Oi mit  $0,5 \mu\text{s}$  angegeben und von Bagaria/Sharpe auf  $0,2 \mu\text{s}$  reduziert wird.

Bei sinusförmigen Schwingungsvorgängen spielt das Verhältnis der DMS-Länge  $l_{\text{DMS}}$  zur Wellenlänge  $\lambda$  eine die Abbildungstreue des Vorgangs bestimmende Rolle. Nimmt man an, dass die DMS-Länge gleich der Wellenlänge einer stehenden oder auch laufenden sinusförmigen Schwingung ist, dann wird der DNIS als Mittelwert aus den positiven und negativen Schwingungsanteilen den Wert Null liefern, obwohl die Spitzenwerte beachtlich groß sein können. Man muss deshalb bestrebt sein, das Verhältnis  $l_{\text{DMS}} : \lambda$  möglichst klein zu machen, um ein hinreichend genaues Messergebnis zu bekommen. In dem Diagramm Bild 3.3-24 wird ein sinusförmiger Schwingungsvorgang vorausgesetzt und das Verhältnis des wirklichen Spitzenwertes der Dehnung zu dem angezeigten Spitzenwert als Prozentsatz angeben, und zwar in Abhängigkeit von dem Verhältnis  $l_{\text{DMS}} : \lambda$ . Das Diagramm ist berechnet für den Zustand Messgittermitte über dem Dehnungsmaximum.

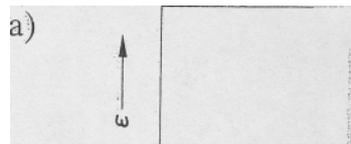


**Bild 3.3-23: Wiedergabe eines Dehnungssprungs durch einen DMS**

- a) Rechtecksprung
- b) theoretische Signalwiedergabe
- c) tatsächliche Signalform



**Bild 3.3-24: Empfindlichkeitsabfall in Abhängigkeit von dem Verhältnis  $l_{DMS} : \lambda$  bei sinusförmigem Vorgang und Messgittermitte im Dehnungsmaximum.**



S

$$\frac{t_{ch}}{t_{fh}} = \frac{t_{DMS}}{V}$$

c)

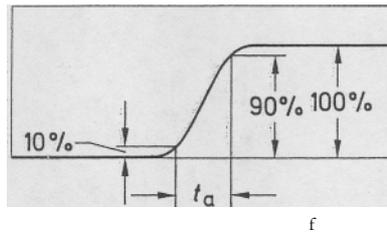


Bild 3.3-23: Wiedergabe eines Dehnungssprungs durch einen DMS

- a) Rechtecksprung
- b) theoretische Signalwiedergabe
- c) tatsächliche Signalform

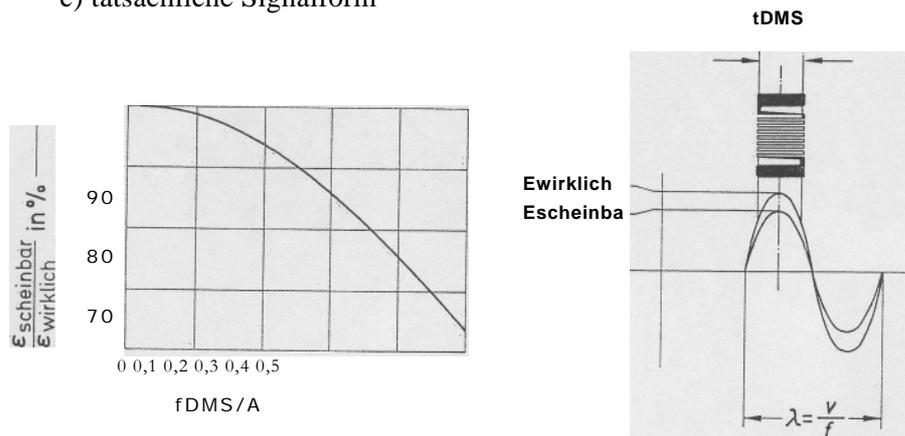


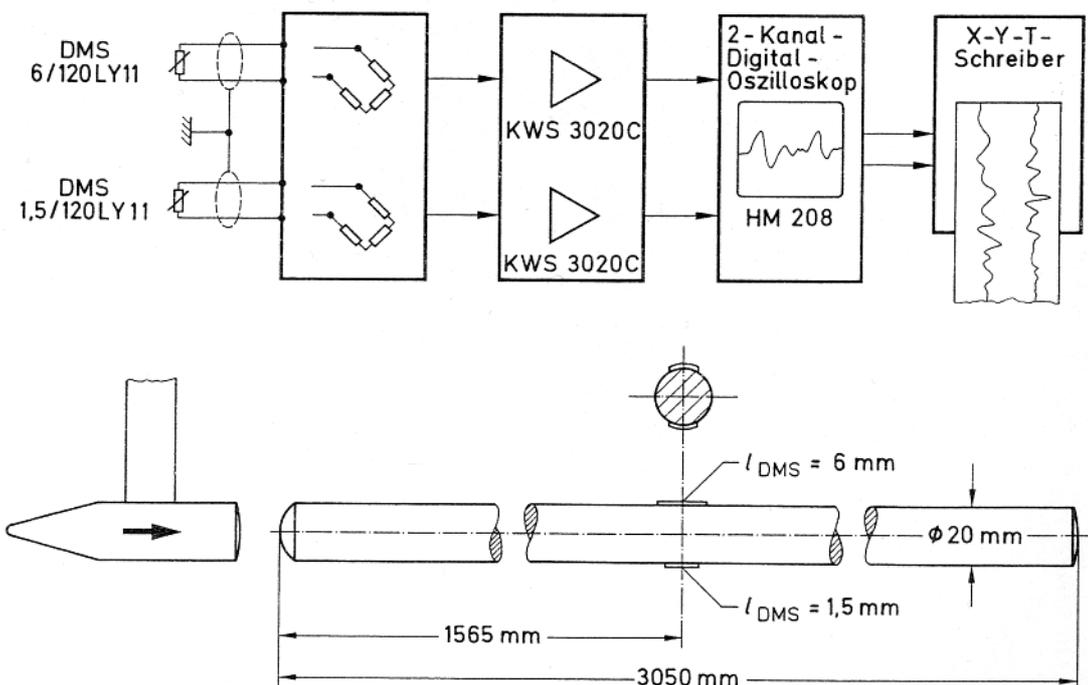
Bild 3.3-24: Empfindlichkeitsabfall in Abhängigkeit von dem Verhältnis  $I_{Dms} : X$  bei sinusförmigem Vorgang und Messgittermitte im Dehnungsmaximum.

In [3-49] zeigt Bickle, wie durch eine analytische Kompensationstechnik der Einfluss des  $0,8 l/c$ -Gliedes der Gl. (3.3-11) beträchtlich vermindert werden kann. Die Gültigkeit der Methode wird durch einen Versuch gestützt. Darin erzeugt ein Detonator in einer Aluminiumstange eine Stoßwelle, deren Anstiegszeit ca.  $10 \mu\text{s}$  beträgt. Die Messung erfolgt mit verschiedenen langen DMS. Der kürzeste DMS war  $0,38 \text{ mm}$  lang; sein Signal wurde als „wahrer Messwert“ angenommen. Der längste DMS war  $48 \text{ mm}$  lang. Es wird gezeigt, wie dessen abweichendes Signal mit der Kompensationsrechnung in gute Übereinstimmung mit dem „wahren Messwert“ gebracht werden kann.

Während bei den zitierten Untersuchungen versucht wird, die Grenzen der Wiedergabe dynamischer Vorgänge durch DMS zu ermitteln, soll an einem Beispiel ein mehr alltäglicher Vorgang dargestellt werden.

### Beispiel:

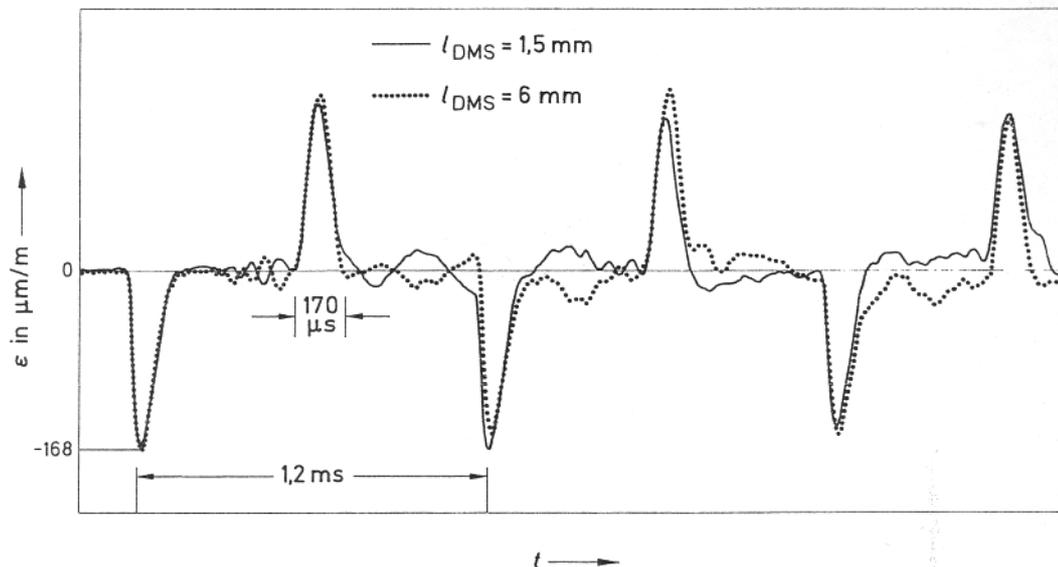
An einer  $3050 \text{ mm}$  langen Stahlstange von  $20 \text{ mm}$  Durchmesser waren im Abstand von  $1565 \text{ mm}$  von der Stirnfläche 2 DMS gegenüberliegend appliziert. Der eine DMS hatte  $6 \text{ mm}$  Messgitterlänge, der andere  $1,5 \text{ mm}$  (Bild 13-25). Die DMS wurden in Viertelbrückenschaltung (siehe Abschnitt 5) je mit einem Gleichspannungsverstärker KWS 3020 C \*) verbunden. Der Frequenzbereich der beiden Verstärker war auf  $25 \text{ kHz}$  ( $-1 \text{ dB}$ ) eingestellt. Deren



**Bild 3.3-25: Versuchsanordnung für einen Stoßversuch**

\*) Nicht mehr im HBM-Programm

Ausgangssignale wurden einem zweikanaligen Digital-Speicher-Oszilloskop (mit Vortriggerung) zugeleitet und konnten auf dem Bildschirm beobachtet und mit einem nachgeschalteten Zweikanal-Schreiber synchron aus dem Speicher ausgeschrieben werden. Den Schrieb zeigt Bild 3.3-26.



**Bild 3.3-26: Schrieb eines Stoßversuchs an einer ca. 3 m langen Stahlstange. Erläuterungen im Text.**

#### Ergebnis:

Der Abstand der negativen Signalspitzen entspricht einer Zeit von 1,2 ms für Hin- und Rücklauf der Stoßwelle, d.h: einer Laufstrecke von  $2 \times 3050 = 6100$  mm:

Die positiven Signalspitzen zeigen die reflektierte Welle an.

Das Stoßsignal selbst steht 170  $\mu$ s lang an.

Die Amplituden der Signale betragen 168  $\mu$ m/m.

Den Signalspitzen ist eine gegenläufige Schwingung überlagert, die als Biegeschwingung (Lateralschwingung) gedeutet werden kann.

#### Auswertung:

Aus der Zeit 1,2 ms für Hin- und Rücklauf der Stoßwelle über eine Strecke von  $2 \times 3050 = 6100$  mm errechnet sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit  $c$  zu 5083 m/s; sie ist gleich der Schallgeschwindigkeit in Stahl.

Die Schallgeschwindigkeit  $c$  in festen Körpern errechnet sich aus dem Elastizitätsmodul  $E$  und der Werkstoffdichte  $\varrho$  nach der Beziehung

$$c = \sqrt{\frac{E}{\varrho}} \quad (3.3-12)$$

$$c_{\text{Stahl}} = \sqrt{\frac{E}{\varrho}} = \sqrt{\frac{206 \cdot 10^9 \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^3}{\text{s}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}}}{7,8 \cdot 10^3}} = \sqrt{\frac{206 \cdot 10^6 \text{ m}^2}{7,8 \text{ s}^2}} = 5140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Der Unterschied zwischen gemessener und berechneter Schallgeschwindigkeit beträgt nur 0,7 %, was in Anbetracht der verwendeten Tabellenwerte für  $E$  und  $\varrho$  sowie der möglichen Ungenauigkeit des Schriebes als sehr klein bezeichnet werden kann.

An der Dauer des Stoßsignals von  $170 \mu\text{s}$  und der Schallgeschwindigkeit  $c$  errechnet sich die Länge der Stoßwelle zu

$$l = c \cdot t \quad (3.3-13)$$

$$= 5083 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 170 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 0,864 \text{ m.}$$

Die Dehnungsamplitude beträgt  $\varepsilon = -168 \mu\text{m/m}$ . Daraus errechnet sich die Werkstoffspannung zu

$$\sigma = \varepsilon E = -168 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{m}} \cdot 206000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = -34,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

und der Kraftstoß zu

$$F = \sigma A = -34,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 314 \text{ mm}^2 = -10864 \text{ N.}$$

Betrachtet man die im Messschrieb Bild 3.3-26 wiedergegebene Stoßwelle in grober Annäherung als halbe Sinusschwingung mit der Länge  $\lambda/2 = 864 \text{ mm}$  und vergleicht man den aus dem Diagramm Bild 3.3-24 zu entnehmenden Fehler für das Verhältnis  $l_{\text{DMS}} : \lambda$ , dann wird verständlich, dass zwischen den Signalen der beiden DMS mit  $6 \text{ mm}$  bzw.  $1,5 \text{ mm}$  Messgitterlänge kein wahrnehmbarer Unterschied auftreten kann. Die dennoch wechselseitig auftretenden Unterschiede erklären sich aus der überlagerten Lateralschwingung der Stange.

#### Folgerungen:

Stoßvorgänge mit angenähertem Rechteckcharakter sind nur mit hochgezüchteten Versuchseinrichtungen zu erzeugen. Unter den Bedingungen der Praxis verlaufen Stöße wesentlich sanfter.

Mit den in der Praxis vorwiegend benutzten DMS-Längen von 3 mm und 6 mm lassen sich dynamische Messprobleme noch einwandfrei bewältigen: Selbst Schwingungen im Ultraschallbereich lassen sich mit genügender Genauigkeit messen. In jedem Falle muss der Frequenzgang der beteiligten Messgeräte beachtet werden.

### 3.3.8 Die elektrische Belastbarkeit

Wenn man einen DMS mit 6 mm Messgitterlänge und einem Messgitterwiderstand von  $120 \Omega$ , z. B. den Typ 6/120 LY11, in eine mit einer Spannung von 5 V gespeiste symmetrische Brückenschaltung einfügt, dann fließt ein Strom von 20,8 mA durch den DMS. Das ist auf den ersten Blick nicht viel. Bezieht man aber den Strom auf den außerordentlich kleinen Querschnitt der Leiterbahnen des Messgitters, dann ergibt sich eine in der Starkstromtechnik schier unvorstellbar große Stromdichte von  $46 \text{ A/mm}^2$ . Nur durch das bei kleinen Leiterquerschnitten sehr günstige Verhältnis von Querschnittsfläche zu Mantelfläche ist es möglich, die durch den Stromfluss entstehende Joulsche Wärme an die Umgebung abzugeben. Damit dies in ausreichendem Maße erfolgen kann, müssen die Leistungszufuhr und die Leistungsabfuhr derart in Einklang gebracht werden, dass die entstehende Temperaturerhöhung am DMS in vertretbaren Grenzen bleibt. Dazu müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein. Die beeinflussenden Parameter sind:

- Die Höhe der Brückenspeisespannung,
- der elektrische Widerstand des Messgitters,
- die Größe und Geometrie des DMS-Messgitters,
- die Umgebungstemperatur,
- die Wärmeleitfähigkeit des Bauteilwerkstoffs,
- die Wärmekapazität und das Abstrahl- bzw. Kühlvermögen des Bauteils.

Zu starke elektrische Belastung des Messgitters führt zu ähnlichen Effekten wie zu hohe Umgebungstemperatur, wie z. B. Überhitzung des Messgitters, des Trägermaterials und der Klebstoffschicht, und daraus resultierend Hysterese, Kriechen, instabiler Nullpunkt, Beeinträchtigung der Temperatur-Selbstkompensation.

HBM gibt mit den technischen Daten für jeden DMS-Typ die höchstzulässige Brückenspeisespannung an. Dieser Wert dient zur Orientierung und gilt im mittleren Genauigkeitsbereich für Dauerbetrieb bei Raumtemperatur und Applikation an gut wärmeleitenden Objekten. Höhere Umgebungstemperatur, schlechte Wärmeleitfähigkeit (auch unzulässig dicke Klebstoffschichten) und niedrige Wärmekapazität des Bauteils (kleine Objekte) erfordern eine Verminderung der Brücken-Speisespannung.

Bei Messungen an Kunststoffbauteilen [3-34] sollte die Speisespannung bis auf zirka 10 % der Tabellenwerte reduziert werden. Gegebenenfalls ist die Impulsspeisung ein geeigneter Weg zur Umgehung von Schwierigkeiten durch zu hohe Eigenerwärmung des DMS. Moderne Umschaltgeräte für die Vielstellen-Messtechnik bieten beide Möglichkeiten an, wobei die Verminderung der Speisespannung die wirksamere Maßnahme ist:

Speisespannung  $U$  und Leistung  $N$  stehen in quadratischer Abhängigkeit zueinander.

$$N = \frac{U^2}{R} \quad (3.3-14)$$

Bei zyklischer Messstellenabfrage oder bei Impulsspeisung akkumuliert die Leistungszufuhr zum DMS in Abhängigkeit vom Tastzeitverhältnis und der Wiederholgeschwindigkeit.

Bei hohen Genauigkeitsforderungen und im Aufnehmerbau ist ebenfalls eine Beschränkung der Speisespannung auf etwa die Hälfte der angegebenen Höchstwerte zu empfehlen.

Sollte eine Verminderung der Brückenspeisespannung, etwa aus gerätetechnischen Gründen, nicht möglich sein, dann kann die Wahl eines höheren DMS-Widerstandes hilfreich sein. Leistung und Widerstand stehen jedoch nur in linearem Verhältnis zueinander, wie aus der Gl. (3.3-14) ersichtlich ist.

Eine Spannungsabsenkung durch Vorschaltwiderstände ist im Prinzip möglich, aber immer mit einem Verlust an Messsignal verbunden (s. Abschnitt 7.2). Ferner ist mit zusätzlichen Fehlern durch Temperaturabhängigkeit oder Instabilität des Vorschaltwiderstandes zu rechnen.

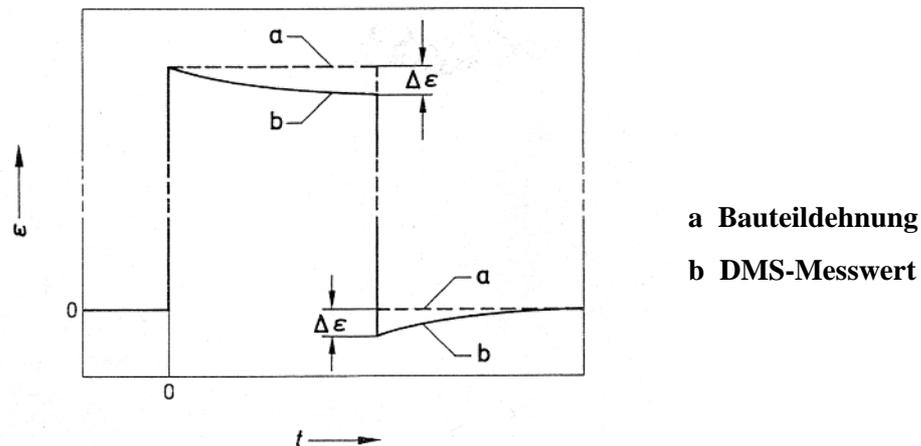
### 3.3.9 Das Kriechen

In fast allen Veröffentlichungen über DMS wird das Kriechen als negative Eigenschaft dargestellt. Diese Betrachtungsweise war vor 30 Jahren sicher richtig, sie bedarf heute einer Korrektur. Für präzise Messungen ist ein bestimmtes Maß des Kriechens unerlässlich. Die modernen Fertigungsmethoden der Folien-DMS machen es möglich, das Kriechverhalten der DMS dem Anwendungszweck anzupassen. So wäre es, beispielsweise, ohne diese Technik unmöglich, die an Wägezellen für den eichpflichtigen Verkehr gestellten extremen Genauigkeitsforderungen zu erfüllen.

Was versteht man unter dem Kriechen?

Wird ein DMS einer statischen Dehnung unterworfen, so zeigt er trotz konstanter Bauteildehnung eine zeitliche Veränderung seines Widerstandes. Diese Veränderung des Messsignals eines gedehnten (oder gestauchten) DMS erfolgt

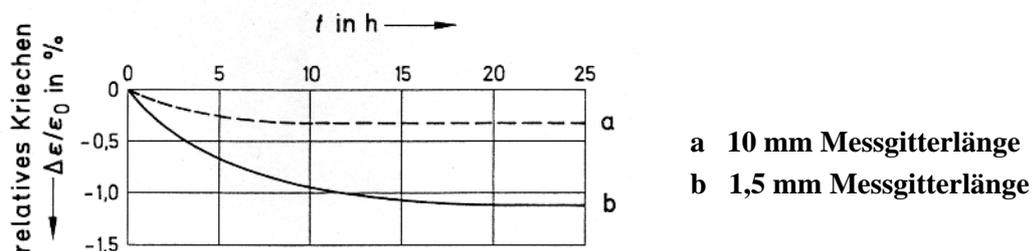
sehr langsam („kriechend“) und in Richtung „Entlastung“. Die Ursache ist im rheologischen Verhalten der dehnungsübertragenden Schichten des Klebstoffs und des Messgitterträgerwerkstoffs zu suchen [3-35]. Das gedehnte Messgitter wirkt ähnlich einer gespannten Feder. Die Federkraft erzeugt im wesentlichen im Bereich der Umkehrstellen des Messgitters Schubspannungen an den Berührungsflächen zwischen Messgitter und Träger, zusätzlich zu der aus der Dehnung resultierenden Normalspannung. Unter dem Einfluss dieser Spannungen relaxieren die Kunststoffe des DMS und des Klebstoffs, d. h. die Gegenkraft erlahmt und das Messgitter zieht sich zurück. Es entsteht ein negativer Fehler. Im Bild 3.3-27 ist dieser Vorgang dargestellt.



**Bild 3.3-27:** Zeitlicher Verlauf des Messwertes eines DMS nach spontaner Belastung eines Bauteils und nach dessen spontaner Entlastung (schematisch)

Weil sich dieser Vorgang in einem relativ eng begrenzten Bereich der Messgitterenden abspielt, ist sein Einfluss bei kurzen Messgittern größer als bei langen, Bild 3.3-28.

Folien-DMS sind gegenüber den früher üblichen Draht-DMS im Vorteil, weil die verbreiterten Umkehrstellen die Kräfte auf eine größere Fläche verteilen und dadurch die Schubspannungen vermindern.



**Bild 3.3-28:** Kriechkurve zweier verschieden langer Folien-DMS (Beispiel)

Die das Kriechen bestimmenden Einflüsse sind zahlreich und verwickelt. Dazu gehören z. B. der Querschnitt der Leiterbahnen des Messgitters, deren Anzahl, der Werkstoff des Trägers, Art und Schichtdicke des Klebstoffs, die Zeit, Feuchtigkeitseinflüsse, Temperatur und anderes. Wärme fördert das Kriechen, Kälte behindert es. Deshalb können die Angaben dieses Abschnitts nur Tendenzen aufzeigen, Zahlen dürfen nicht als Absolutwerte betrachtet und auf andere DMS übertragen werden.

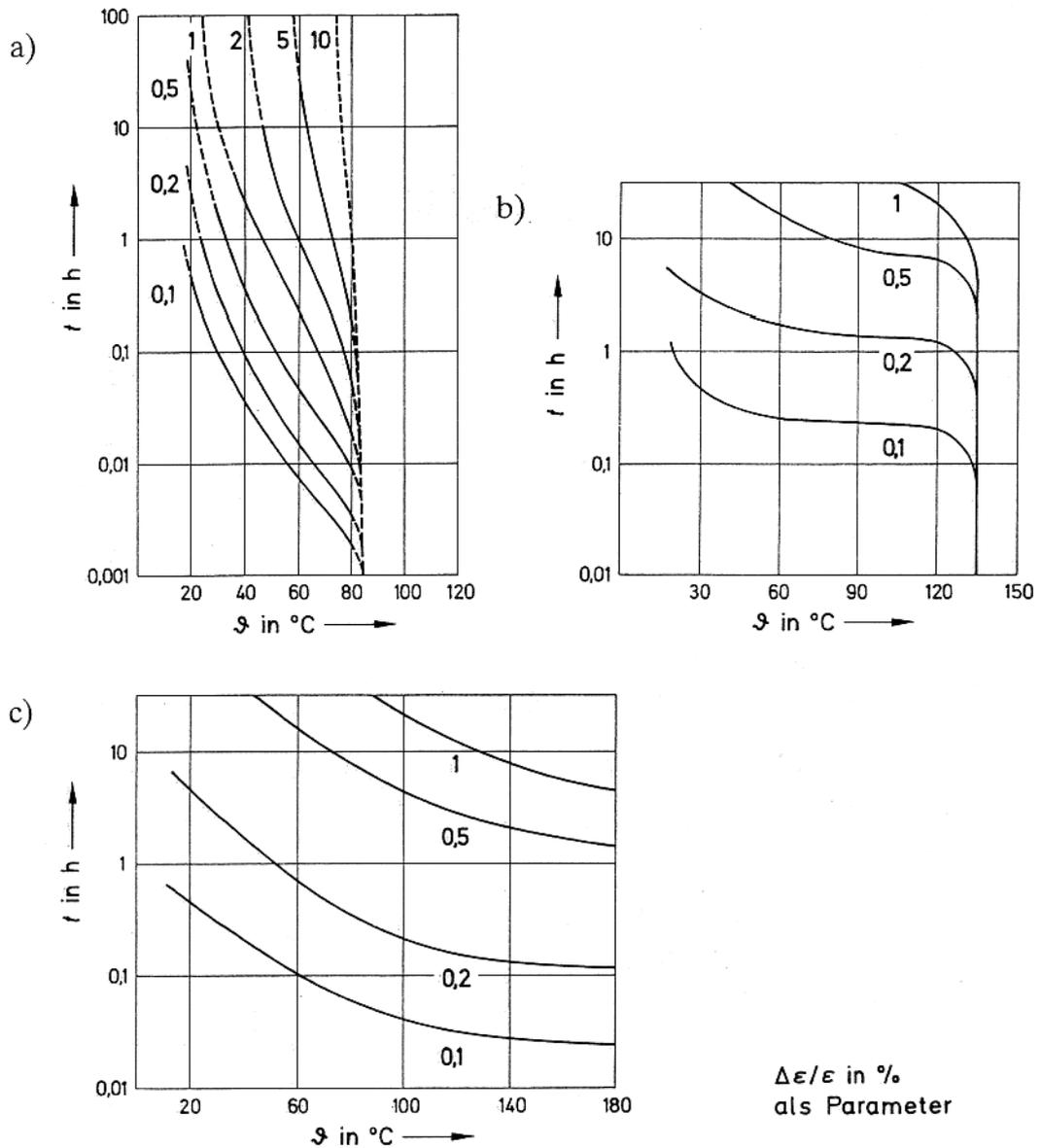


Bild 3.3–29: Zeit-Temperatur-Kriech-Diagramme (ZTK) nach [2–1]

Relatives Kriechen  $\Delta\varepsilon/\varepsilon_0$  in % von  $\varepsilon_0$ , gemessen bei  $\varepsilon_0 = 2000 \mu\text{m/m}$ .

DMS-Typ: 6/120 LY 11;

Klebstoffe: a) Schnellklebstoff X 60, kalthärtend

b) Schnellklebstoff Z 70, kalthärtend

c) Klebstoff EP 250, heißgehärtet 2 h bei  $180^\circ\text{C}$  + 2 h bei  $200^\circ\text{C}$

Nach [2-1] wurde das Kriechen der DMS mit einer Vorrichtung gemessen, die eine zeitlich unveränderliche Dehnung zu erzeugen gestattet. Das Bild 3.3-29 zeigt in einer anderen Darstellungsweise die Ergebnisse einer Messreihe zur Bestimmung des Kriechens. Darin ist als Parameter das relative Kriechen  $\Delta\varepsilon/\varepsilon_0$  als Funktion der Zeit  $t$  und der Temperatur  $\vartheta$  aufgetragen. Die den DMS vorgegebene Dehnung  $\varepsilon_0$  zu Beginn der Messung betrug + bzw. – 2000  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Grundsätzlich können solche Zeit-Temperatur-Kriech-Diagramme (ZTK-Diagramme) nur für DMS-Klebstoff-Kombinationen ermittelt werden, niemals für die DMS alleine. Die ZTK-Diagramme des Bildes 3.3-29 wurden mit DMS des gleichen Typs, jedoch kombiniert mit drei verschiedenen Klebstoffen, gewonnen. Man erkennt daraus, dass sich der Schnellklebstoff X60 vorzugsweise für Messungen im Raumtemperaturbereich eignet. Bei 50° und Belastungszyklen bis zu 1 Stunde Dauer sind ebenfalls noch gute Messergebnisse zu erhalten. Demgegenüber zeigt der Schnellklebstoff Z 70 erheblich bessere Stabilität und einen größeren nutzbaren Temperaturbereich. Was aus dem Diagramm nicht erkennbar ist, sind die Vorteile des X 60 im Bereich tiefer Temperaturen, wozu die Anwendbarkeit bei Temperaturen um den Gefrierpunkt gehört.

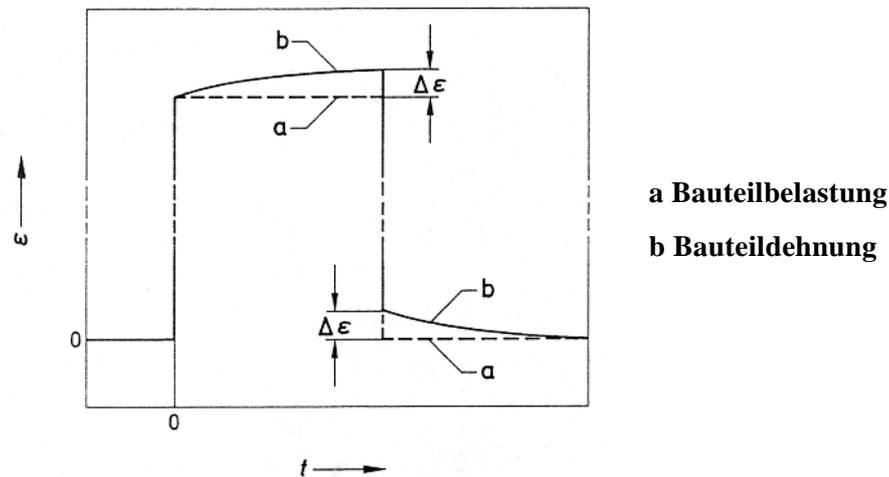
Welche Auswirkungen hat das Kriechen auf das Ergebnis einer Messung?

Es wurde bereits angedeutet, dass die Herstellung hochgenauer Wägezellen ohne ein gewisses Maß an DMS-Kriechen nicht möglich wäre. Wieso?

Die Verhältnisse sollen am einfachen Beispiel eines Zugstabes erläutert werden; sie gelten auch für andere Belastungsfälle, jedoch nur für den elastischen Verformungsbereich. Überhaupt ist es für Messgrößenaufnehmer eine Grundvoraussetzung, dass die Belastung des Federkörper-Werkstoffs so niedrig bleibt, dass nichtreversible plastische Verformungen ausgeschlossen sind. Entsprechend muss die Auswahl der Werkstoffe für den vorgesehenen Zweck erfolgen.

Wird der Stab mit einer Zugkraft beansprucht, dann dehnt er sich spontan um ein dem Hooke'schen Gesetz gehorchendes Maß. Infolge von Relaxation des Werkstoffs folgt dieser spontanen Dehnung eine zeitabhängige, asymptotisch verlaufende zusätzliche Dehnung. Entlastet man den Stab, dann federt er um den Betrag der spontanen Dehnung bei Belastung zurück. Es verbleibt eine kleine Restdehnung, in der Größe der zeitabhängig zusätzlich aufgetretenen Dehnung, die ihrerseits langsam abklingt, bis der ursprüngliche Zustand wieder erreicht ist. Man bezeichnet dies als „elastische Nachwirkung“ zur Unterscheidung von dem nichtreversiblen Kriechen der Werkstoffe. Das Bild 3.3-30 veranschaulicht die elastische Nachwirkung.

Sowohl bei der Spannungsanalyse als auch bei der Messung anderer physikalischer Größen, die mit Kraftwirkungen einhergehen (Kraft, Gewicht, Biegemoment, Drehmoment, Druck u. dgl.), ist die spontane Dehnung des Werkstoffs



**Bild 3.3-30: Zeitlicher Verlauf der Dehnung eines Bauteils während konstanter Belastung und nach vollständiger Entlastung (elastische Nachwirkung).**

ein Maß für die Belastung. Die elastische Nachwirkung liefert einen zeitabhängigen (positiven) Fehler. DMS-Kriechen und elastische Nachwirkungen haben entgegengesetzte Vorzeichen und vermindern einander, Bild 3.3-31. Im günstigsten Fall ergibt sich eine mehr oder weniger gute Kompensation.



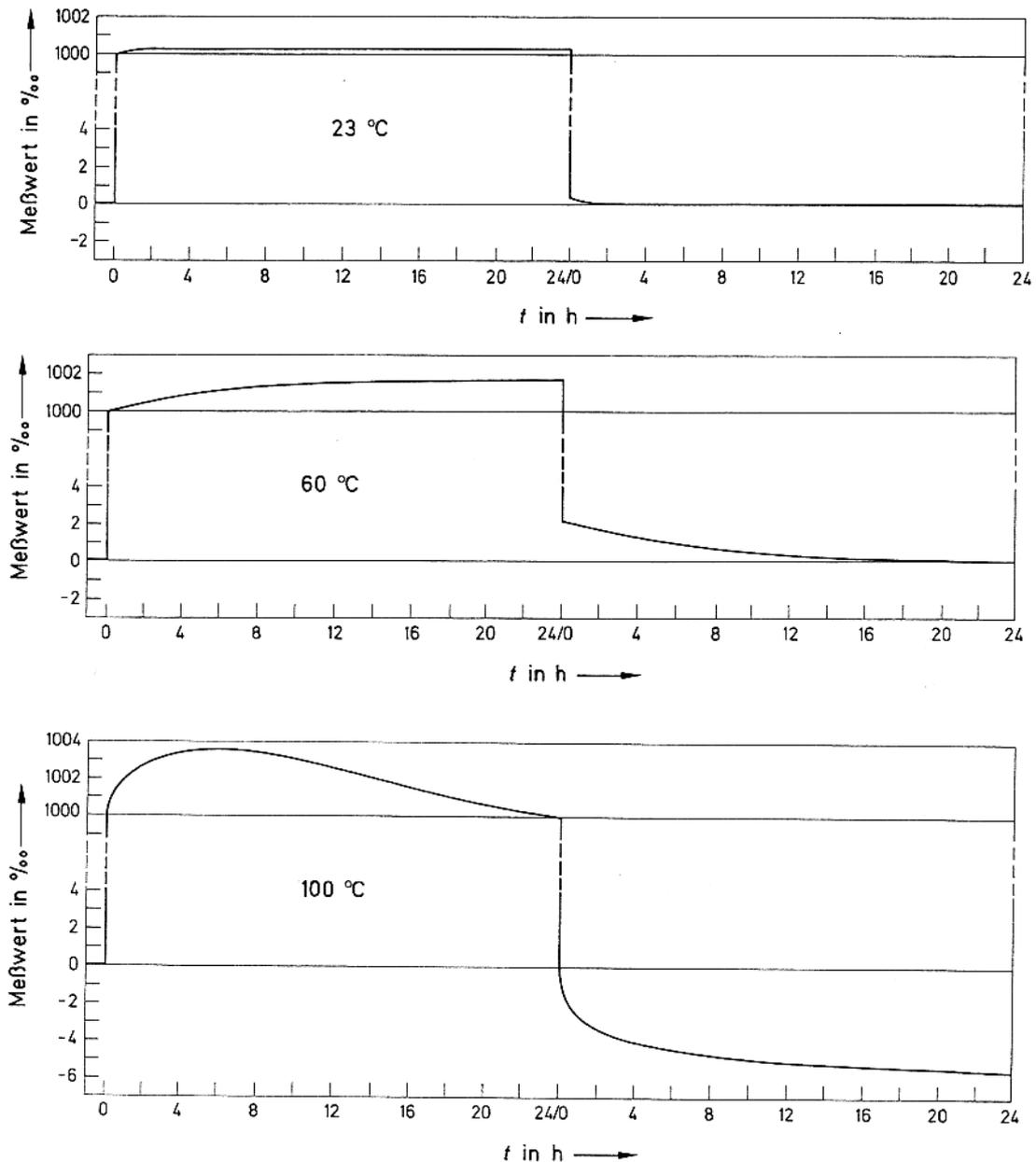
**Bild 3.3-31: Schema der Kriech-Kompensation**

Während das Prinzip der Kriech-Kompensation recht einfach ist, ist seine Realisation - je nach der gewünschten Messgenauigkeit - schwieriger. In jedem Fall muss die optimale Anpassung unter realistischen Bedingungen im Versuch ermittelt werden. So ist es heute durchaus möglich, Aufnehmer herzustellen, deren Kriechfehler weniger als 0,005 % des Messbereichs beträgt, bezogen auf eine Zeitspanne von 30 Minuten. Diese Zeitspanne genügt für Wägaufgaben.

Den Einfluss der Temperatur auf das Kriechen zeigt das Ergebnis eines Laborversuchs, Bild 3.3-32. Der Prüfling wurde bei Raumtemperatur, bei 60 °C und bei 100 °C jeweils 24 Stunden lang belastet und danach 24 Stunden lang entlastet. Während dieser Zeit wurden die Messwerte registriert.

Bei Raumtemperatur ist die Anpassung besser als + 0,05 % vom Sollwert.

Bei 60 °C erreicht der positive Fehler, der eine überwiegende elastische Nachwirkung signalisiert, etwa + 0,15 % im Zeitraum von 24 Stunden. Nach Entlastung kehrt der ursprüngliche Nullpunkt nach ebenfalls 24 Stunden wieder zurück.



**Bild 3.3-32: Zeit- und temperaturabhängiges Kriechen eines mit DMS versehenen Messobjektes während 24 Stunden bei verschiedenen Temperaturen**

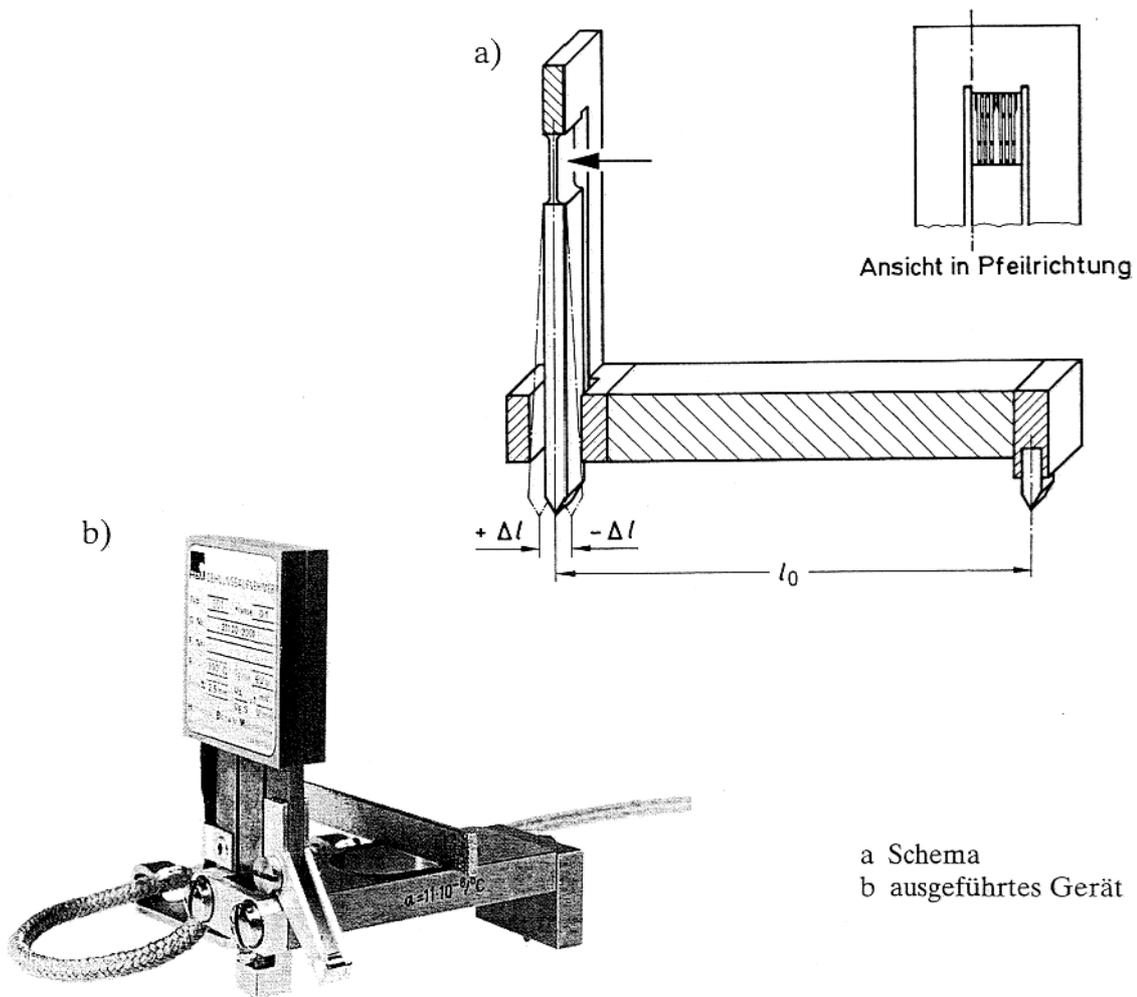
Bei 100 °C ergibt sich zunächst ein positiver Anstieg des Signals, welches nach einigen Stunden seine Richtung umkehrt. Diese Umkehr kennzeichnet ein nichtreversibles Fließen des DMS und des Klebstoffs. Den Zahlenwert des Fließens erkennt man an dem verbleibenden Nullpunktversatz, nachdem das reversible Kriechen nach der Entlastung abgeklungen ist.

Das Beispiel zeigt, dass ähnliche Effekte unterschiedlichen Einflüssen entstammen können und dass eine Kriechkompensation nur in einem begrenzten Zeit-/ Temperatur-/Genauigkeits-Bereich durchführbar ist.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass das Kriechen moderner Folien-DMS so gering ist, dass es manchmal zwecks ausreichender Kompensation der elastischen Nachwirkung des Federkörpermaterials durch besondere Kunstgriffe vergrößert werden muss.

Eine andere Betrachtungsweise gilt für wegabhängige Messungen (im Gegensatz zu den vorstehend geschilderten kraftabhängigen Messungen).

Beispiel: Eine Längenänderung soll mit einer Biegefeder gemessen werden. Die Dehnung nahe der Einspannstelle der Biegefeder ist das Maß für die Längenänderung. Im Bild 3.3-33 ist das Prinzip skizziert. Die Relaxation des Biegefederwerkstoffs bewirkt hierbei lediglich eine Verminderung der Rückstellkraft. Sie hat keinen Einfluss auf die Dehnung, die in diesem Fall allein von der Auslenkung der Feder abhängt und nicht von der Rückstellkraft. Hier hätte das Kriechen des DMS keine kompensierende Wirkung, es wäre nur eine Fehlerquelle, die man mit kriechfreien DMS-Ausführungen ausschaltet, Bild 3.3-14. Bei diesen DMS wird das Kriechen dadurch verhindert, dass man an den im Abstand  $l$



**Bild 3.3-33: Einrichtung zur Messung einer Längenänderung mittels DMS-bestückter Biegefeder (Dehnungsaufnehmer DD1 von HBM)**

die aktive Messgitterlänge begrenzenden Querbrücken ein Kräftegleichgewicht in Richtung der Längsachse erzeugt. Dazu dienen die nach außen führenden Gitterverlängerungen, die an der Messung selbst keinen Anteil haben. Das an den äußeren Enden auftretende Kriechen wirkt sich bei richtiger Bemessung auf den messenden Bereich des Messgitters nicht aus.

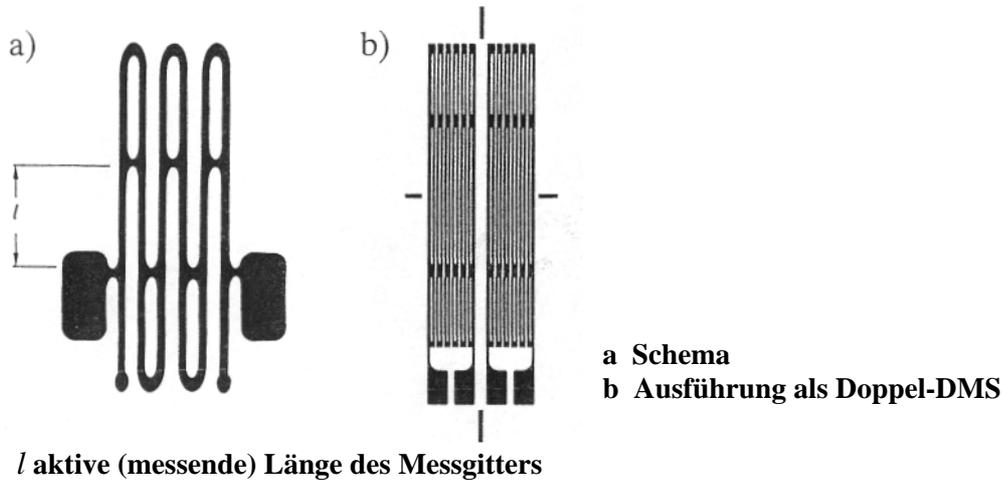


Bild 3.3-34: Beispiel für einen kriechfreien DMS.

### 3.3.10 Die mechanische Hysterese

Unter der mechanischen Hysterese eines DMS versteht man den Unterschied der Anzeige zwischen ansteigender und abfallender Dehnungsbeanspruchung bei gleichen Dehnungswerten des Prüflings. In [2-1] ist im Hinblick auf Ein-

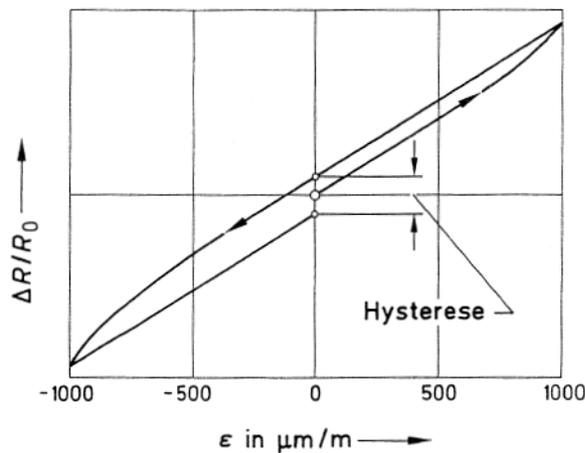
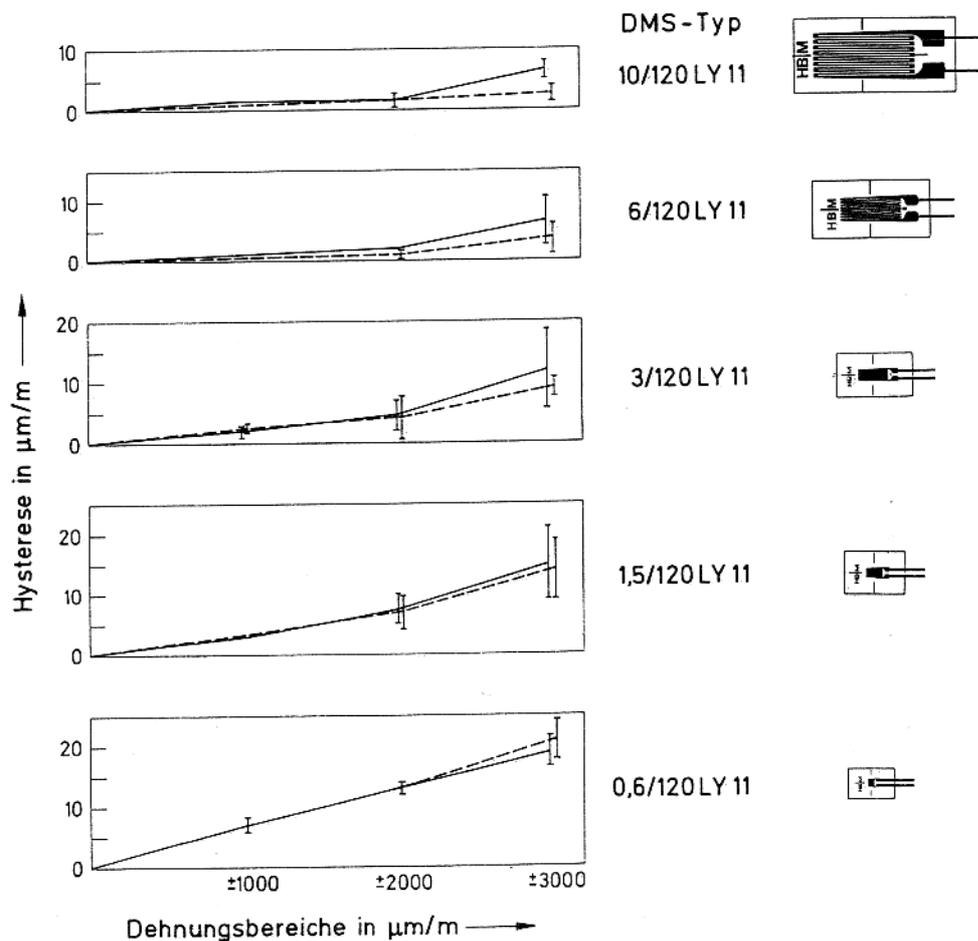


Bild 3.3-35: Definition der mechanischen Hysterese nach [2-1]

heitlichkeit der Prüfbedingungen eine speziellere Definition gegeben. Danach ist als mechanische Hysterese die größte Differenz im Nullpunkt der Abszisse zwischen dem aufsteigenden und dem abfallenden Zug der über einen vollen Zyklus mit den Extremwerten  $\pm 1000 \mu\text{m/m}$  bzw.  $+ 1000 \mu\text{m/m}$  führenden Kurven zu verstehen.

Die mechanische Hysterese hängt - wie viele andere Kennwerte - nicht allein vom DMS, sondern auch von der Applikation und anderen Bestandteilen ab, welche zusammen die Messstelle bilden. Die Hysterese wird erfahrungsgemäß nach mehreren Beanspruchungszyklen kleiner. Deshalb werden Angaben für den ersten und dritten Belastungszyklus gefordert. Zusätzliche Messungen mit den Dehnungsbereichen  $\pm 2000 \mu\text{m/m}$  und  $\pm 3000 \mu\text{m/m}$  sind freigestellt.



**Bild 3.3-36:** Mechanische Hysterese von 6 verschiedenen Typen der DMS-Serie LY 11, geklebt mit Schnellklebstoff Z 70. In der Typenbezeichnung gibt die Zahl links vom Schrägstrich die Messgitterlänge als Variable an.

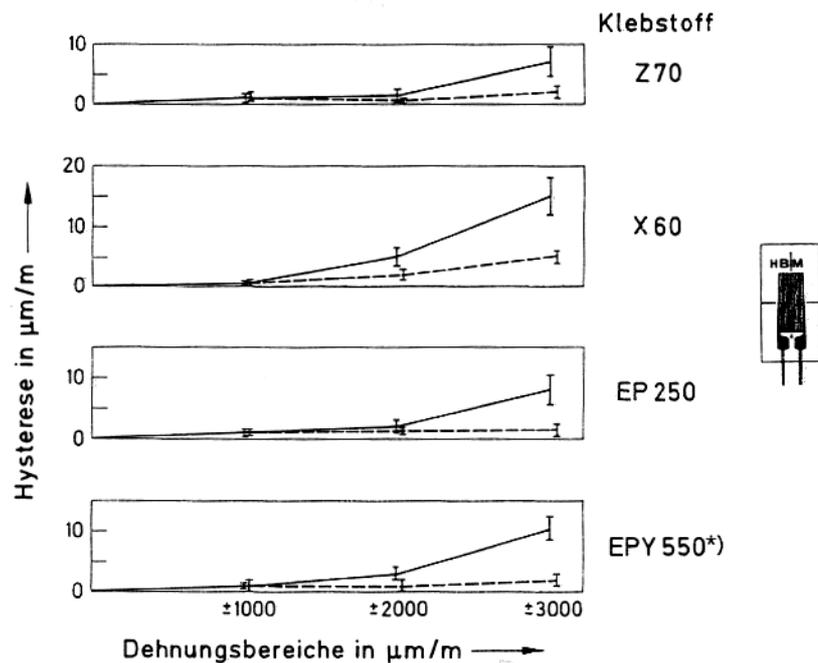
— 1. Zyklus       $\pm$  Standardabweichung  $s$   
 - - - 3. Zyklus

Die in den Diagrammen niedergelegten Ergebnisse einer Untersuchung gehen über die Forderungen in [2-1] hinaus. Sie sollen zeigen, inwiefern eine Typabhängigkeit innerhalb einer DMS-Familie besteht und welche Auswirkungen verschiedene Klebstoffe haben. Die Messergebnisse wurden nach dem Schema

1. und 3. Zyklus bei  $\pm 1000 \mu\text{m/m}$  bzw.  $+ 1000 \mu\text{m/m}$ ,
1. und 3. Zyklus bei  $\pm 2000 \mu\text{m/m}$  bzw.  $+ 2000 \mu\text{m/m}$ ,
1. und 3. Zyklus bei  $\pm 3000 \mu\text{m/m}$  bzw.  $+ 3000 \mu\text{m/m}$

dargestellt.

Das Bild 3.3-36 lässt eine Abhängigkeit der Hysterese von der Messgitterlänge erkennen, die bei den kurzen Messgittern besonders ausgeprägt ist.



**Bild 3.3-37: Mechanische Hysterese des DMS-Typs 6/120 LY 11, geklebt mit 4 verschiedenen Klebstoffen**

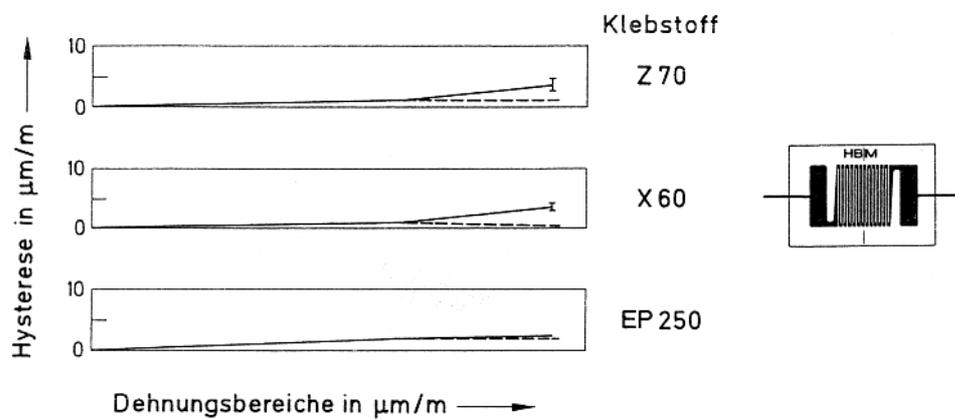
— 1. Zyklus       $\pm$  Standardabweichung  $s$   
 - - - 3. Zyklus

Im Bild 3.3-37 bilden die bei DMS des gleichen Typs verwendeten DMS-Klebstoffe die Parameter. Z 70 ist ein kalthärtender Schnellklebstoff auf Zyanacrylat-Basis, X 60 ein ebenfalls kalthärtender Schnellklebstoff aus Polymethacrylat-Basis, die beiden Klebstoffe EP 250 und EPY 550\*) sind heißhärtende Epoxidharzklebstoffe.

Der Versuch, dessen Ergebnisse im Bild 3.3 -38 wiedergegeben sind, unterscheidet sich nur in der Verwendung des DMS-Typs von dem vorangegangenen

\*) Nicht mehr im HBM-Programm

Versuch, Bild 3.3-37. Die wesentliche Verringerung der Hysterese, insbesondere im Dehnungsbereich  $\pm 3000\mu\text{m}/\text{m}$ , deutet auf einen starken Einfluss der DMS-Konstruktion hin.



**Bild 3.3-38: Mechanische Hysterese des DMS-Typs 6/120 LY 21, geklebt mit 4 verschiedenen Klebstoffen**

1. Zyklus                      Standardabweichung  $s$   
2. Zyklus

### 3.4 Umwelteinflüsse

Umwelteinflüsse wirken nicht nur auf den DMS ein, sondern auf die gesamte Messstelle. Eine isolierte Betrachtung des DMS ist deshalb nicht ausreichend. Die Stabilität (Nullpunktsicherheit) einer DMS-Messstelle hängt von zahlreichen Faktoren ab. Sie beginnt mit der einwandfreien Befestigung des DMS, zu der eine sorgfältige Vorbereitung der Messstelle und einwandfreier Messstellenschutz gehören (s. Abschnitt 4 und [4.1]).

Aber auch die Vorgeschichte des DMS und des zu prüfenden Teiles kann sich auswirken. Eine mechanische und thermische Beanspruchung des applizierten Teiles vor der eigentlichen Messung bringt erfahrungsgemäß einen wertvollen Stabilitätsgewinn. (Es muss betont werden, dass Instabilitäten und Fehler nicht in jedem Fall dem DMS oder dessen Befestigung entspringen; häufig sind andere Ursachen dafür verantwortlich oder beteiligt, z. B. Verschaltung, mangelhafter Schutz, Störungen aus der Stromversorgung und andere mehr).

Die stärksten Einflüsse gehen naturgemäß von äußeren Einwirkungen aus. Am häufigsten sind Temperatur und Feuchtigkeit beteiligt, aber auch andere Effekte können in unerwünschter Weise die Anzeige des DMS beeinflussen. Hier sind z. B. Druck, Vakuum, Kernstrahlung sowie elektrische und magnetische Felder in Betracht zu ziehen.

Zum Teil ist es möglich, durch zweckmäßige Materialauswahl solchen Einwirkungen zu begegnen, zum Teil lassen sie sich durch geeignete Maßnahmen kompensieren oder verhindern.

### 3.4.1 Temperatur

Die vielfältigen Einwirkungen der Temperatur auf DMS-Messstellen lassen sich in einer gemeinsamen Übersicht schlecht darstellen. Deshalb wird an dieser Stelle nur auf die Abschnitte hingewiesen, in denen nähere Informationen zu finden sind.

2.3.4: Die thermische Längenausdehnung

3.2.3: Spezial-DMS (auch Hochtemperatur-DMS)

3.2.5: Der nutzbare Temperaturbereich

3.3.4: Der Temperaturgang einer DMS-Messstelle

3.3.5: Die Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit

3.3.8: Die elektrische Belastbarkeit

3.3.9: Das Kriechen

7.1: Temperaturgangkompensation

### 3.4.2 Feuchtigkeit

Feuchtigkeit ist - neben der Temperatur - ein wesentlicher Grund für instabile DMS-Messstellen. So bewirken vor allem Feuchtigkeitsveränderungen während einer Messung unkontrollierbare Nullpunktänderungen, die insbesondere bei nullpunktbezogenen Messungen als Fehler in das Messergebnis eingehen, gelegentlich auch zu Empfindlichkeitsänderungen beitragen [3-3b]. Der Grad der Beeinflussung hängt vom Ausmaß des Feuchtesprungs sowie der Höhe der relativen Feuchte ab.

In die Messstelle eingedrungene Feuchtigkeit verändert den Isolationswiderstand zwischen DMS und Messobjekt sowie zwischen den Leiterbahnen des Messgitters, der als veränderlicher Nebenschluss zum DMS wirkt. Extreme Auswirkungen hat dies bei keramischen Bindemitteln (z. B. bei Hochtemperatur-Applikationen) infolge deren großer Hygroskopizität. Veränderungen des Feuchtigkeitsgehalts lassen außerdem den Messgitterträger und den Klebstoff quellen oder schrumpfen. Schließlich kann auch noch die Bindung des Klebstoffs zerstört werden und der DMS sich teilweise oder vollständig vom Messobjekt lösen.

Hochgradige Feuchte kann zu Korrosionsschäden im DIVIS führen. Ein zwischen Messgitter und Bauteil anliegendes Gleichspannungsfeld kann in den isolierenden Schichten Polarisationserscheinungen auslösen und die Messstelle völlig unbrauchbar machen. Die Anwesenheit anderer aggressiver Stoffe, z. B. Seeluft, Industriatmosphäre u. dgl., verstärkt die Auswirkung der Feuchte.

Störungen durch Feuchtigkeit sind nicht auf die DMS beschränkt. Isolationsdefekte in den Messkabeln und in den nachgeschalteten Messgeräten führen ebenfalls zu Fehlern und müssen deshalb mit in Betracht gezogen werden, wenn man nach Fehlerursachen sucht. Wenngleich es auch wichtig ist, die Ursache der Fehler zu kennen, so ist es doch nützlicher, sie zu verhindern. Zur Herstellung der DMS werden im Rahmen des Möglichen nur solche Stoffe verwendet, die sehr wenig Feuchtigkeit aufnehmen. Geeignete Isolierstoffe und Klebstoffe, die überhaupt keine Feuchtigkeit absorbieren, gibt es leider nicht. Es ist deshalb unbedingt notwendig, geeignete Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Welcher Art diese sein müssen, hängt von dem einwirkenden Medium (nicht nur Feuchtigkeit oder Wasser, auch andere Stoffe müssen in Betracht gezogen werden), der geforderten Messgenauigkeit und der Dauer der Messung bzw. der Lebensdauer der Messstelle ab. Für kurzfristige Messungen in trockenen Räumen kann der Aufwand klein gehalten werden, während Dauermessungen im Freien oder unter Wasser umfangreiche Schutzmaßnahmen erfordern. Angaben zum Messstellenschutz sind im Abschnitt 4.3 und in [4-1] zu finden.

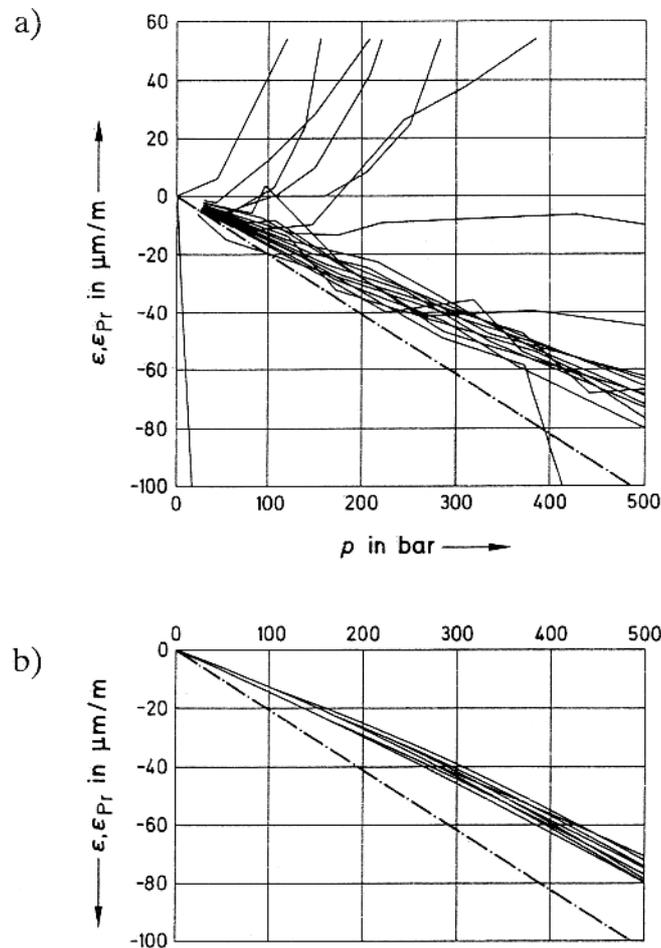
### 3.4.3 Hydrostatischer Druck

Aus der Literatur ist bekannt, dass DMS hydrostatischen Drücken bis über 10000 bar ausgesetzt wurden ohne Beeinträchtigung ihrer Funktionstüchtigkeit. Die veröffentlichten Ergebnisse zeigen grundsätzlich eine gewisse druckabhängige Widerstandsänderung, die sich dem Signal der Dehnungsmessung als Fehler überlagert. Die Angaben sind jedoch uneinheitlich, was teilweise in der Verschiedenheit der Versuchsbedingungen, vor allem aber in den unterschiedlichen DMS-Konstruktionen begründet sein mag. Ebenso mögen unterschiedliche Applikationsmethoden dazu beigetragen haben. Im Gegensatz zu den meisten Arbeiten, die nur empirische Ergebnisse beschreiben und schwerlich auf andere Anwendungsfälle übertragbar sind, werden in [3-37] die verschiedenen Einflussgrößen theoretisch abgehandelt und ihre Auswirkungen durch Versuchsergebnisse belegt.

Mehr noch, als bei anderen Umgebungseinflüssen, trägt die Güte der Applikation zu Erfolg oder Misserfolg einer Messung bei. Deshalb sollen nachstehend einige wichtige Hinweise gegeben werden.

Voraussetzung für einwandfreie Messergebnisse ist sorgfältiges Applizieren. In keinem anderen Fall hat die Güte der Applikation einen so großen Einfluss auf die Genauigkeit des Messergebnisses wie bei Messungen unter hydrostatischem

Druck oder Vakuum. Die beiden aus [3-38] entnommenen Diagramme Bild 3.4-1 zeigen dies eindrucksvoll. Das Diagramm 3.4-1a zeigt die Ergebnisse mangelhafter Applikationsgüte, während für die dem Diagramm 3.4-1b zugrunde liegenden Messungen alle für derartige Messungen erforderliche zusätzlichen Maßnahmen beachtet wurden.



**Bild 3.4-1: Der Einfluss hydrostatischen Drucks auf die DMS-Anzeige**

- a) bei mangelhafter Applikationsgüte
- b) bei Beachtung der für Messungen unter Druck erforderlichen zusätzlichen Applikationsbedingungen.

Als Klebstoffe sind nur solche brauchbar, die keine Lösungsmittel enthalten, beim Aushärten keine gasförmigen Stoffe ausscheiden und eine möglichst dünne, aber gleichmäßig starke Klebstoffschicht ergeben. Die Klebstoffschicht muss absolut frei von Luftblasen sein; selbst winzige Lufteinschlüsse können zu unkontrollierbaren Nullpunktänderungen, Hysterese oder gar zum Bruch des Messgitters führen. Deshalb achte man darauf, dass beim Mischen von Mehrkomponenten-Klebstoffen keine Luft eingerührt wird, indem man unter Vakuum mischt oder die Mischung nachträglich evakuiert.

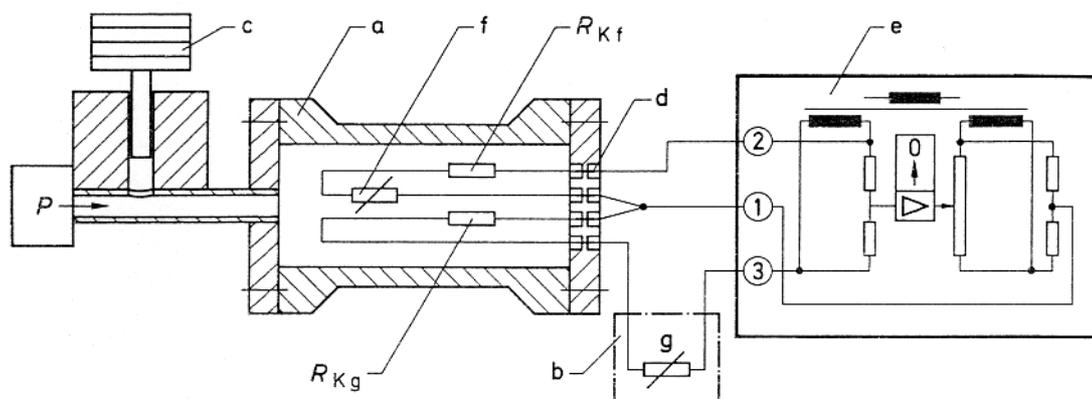
Ungleichmäßig dicke Klebstoffschichten drücken sich unterschiedlich stark zusammen, wodurch im Messgitter Verzerrungen entstehen, die sich in der Anzeige widerspiegeln. Hoher Anpressdruck während der Aushärtephase des Klebstoffs bewirkt gleichmäßige Schichtdicke. Bei den Applikationen, deren Ergebnisse im Diagramm 3.4-1b dargestellt sind, wurden Anpressdrücke von 15 bar = 1,5 MPa angewandt, bei denen des Diagramms 3.4-1a nur 1 bar = 0,1 MPa. Der Unterschied spricht für sich.

Während Applikationsfehler durch sorgfältiges Arbeiten vermeidbar sind, bleiben physikalisch bedingte Effekte bestehen. Es sind dies:

- der Piezo-Widerstandseffekt (Druckkoeffizient) des Messgitterwerkstoffs,
- die Kompressibilität des Messgitter-Trägerwerkstoffs und des Klebstoffs sowie deren gleichmäßige Schichtdicken,
- die Oberflächenstruktur und Kontur des Messobjektes (porös oder geschlossen, eben oder gekrümmt),
- der Elastizitätsmodul und die Querszahl des Bauteilwerkstoffs, der Wert  $(2\nu-1)\frac{1}{E}$

Als parasitäre Effekte könne noch auftreten:

- der Piezo-Widerstandseffekt der im Druckraum verlegten Anschlusskabel.
- Temperatureingänge infolge der adiabatischen Erwärmung bei Drucksteigerung bzw. Abkühlung bei Druckabfall.



- a Druckbehälter
- b Ölbehälter (offen)
- c Kolbenmanometer mit Pumpe P
- d druckdichte Leitungsdurchführungen
- e Kompensator
- f messender (aktiver) DMS
- g Kompensations-DMS
- $R_{Kf}$  Leitungswiderstand in Serie mit DMS f
- $R_{Kg}$  Leitungswiderstand in Serie mit DMS g

**Bild 3.4-2: Versuchsaufbau und Schaltung zur Untersuchung der Druckempfindlichkeit von DMS.**

Die übliche Methode zur Untersuchung der Druckempfindlichkeit von DMS ist in [3-38] ausführlich beschrieben. Das Schema der benutzten Messeinrichtung zeigt das Bild 3.4-2.

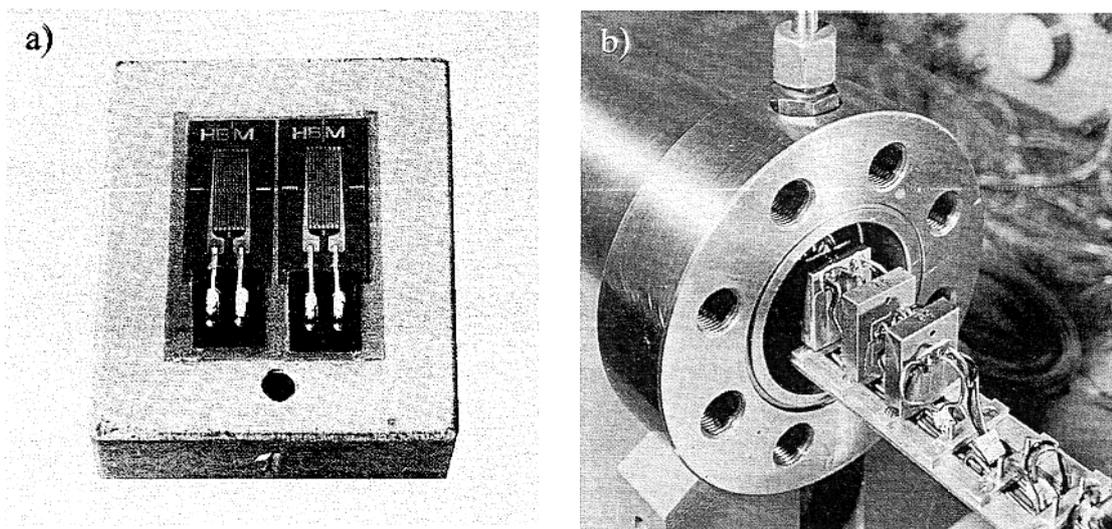
Das Bild 3.4-3 zeigt einen Probekörper mit appliziertem DMS und den geöffneten Druckzylinder des Versuchsaufbaus.

Infolge des allseitig auf den Probekörper einwirkenden hydrostatischen Drucks  $p$  und der Kompressibilität seines (isotropen) Werkstoffs entsteht an dessen Oberfläche eine negative Dehnung  $\varepsilon_{Pr}$  der Größe

$$\varepsilon_{Pr} = \frac{2\nu-1}{E} \cdot p. \quad (3.4-1)$$

Diese, vom Probekörper den DMS aufgeprägte Dehnung ist in den Diagrammen Bild 3.4-1 als strichpunktierte Bezugslinie eingezeichnet. Der Unterschied zwischen der Bezugslinie und den Messwerten entsteht durch die Druckempfindlichkeit der DMS-Applikation. Der Effekt ist positiv. Störeinflüsse werden kompensiert oder korrigiert, je nach ihrer Art.

Die Untersuchungen in [3-38] erstreckten sich auf die in der Tafel 3.4-1 genannten DMS und Klebstoffe in unterschiedlichen Kombinationen.



**Bild 3.4-3: Probekörper zur Messung der Druckempfindlichkeit von**

- a) mit DMS bestückter Probekörper aus Stahl
- b) geöffneter Druckzylinder mit Probekörpern.

Aus den DMS-Arten „Folienmessgitter“ und „Drahtmessgitter“ wurden jeweils 2 charakteristische DMS-Familien ausgewählt und aus diesen wiederum jeweils die DMS-Typen mit der größten Nachfrage. Diese wurden in zweckmäßiger Weise mit 3 verschiedenen Klebstoffen kombiniert, woraus 17 verschiedene

Paarungen entstanden. Von jeder Paarung wurden 8 Proben untersucht, das sind insgesamt 136 Proben

DMS-Art	Befestigungs- mittel	Polymetha- crylat- klebstoff	Cyanacrylat- Schnell- klebstoff	Epoxidharz- klebstoff (heißhärtend)
	Familie	X 60	Z 70	EP 250
Folien- Messgitter aus Konstantan	Polyimidharz, Serie LY 11	3/120* 6/120	3/120 6/120	3/120 6/120
	Phenolharz m. Glasfaser, Serie LG 11	– –	3/120 6/120	3/120 6/120
Draht-Messgitter aus Konstantan**	Acrylharz m. Zellulosefaser, Serie LA 11	6/120 10/120	6/120 10/120	– –
	Phenolharz m. Zellulosefaser, Serie LP 11	6/120	6/120	6/120
sämtliche DMS-Typen sind selbst-temperaturkompensierend an Stahl. *3/120 bedeutet: 3 mm Messgitterlänge/120 Ω Widerstand				

\*\* nicht mehr im aktuellen HBM-DMS-Programm

**Tafel 3.4-1: Die auf Druckempfindlichkeit untersuchten DMS/Klebstoff-Kombinationen**

Die geschliffenen Probekörper aus Stahl wurden unmittelbar vor der Applikation der DMS mit einem Sandstrahlgebläse fein aufgeraut, sorgfältig gereinigt und entfettet. Für die Klebstoffe gilt folgendes:

Der Zweikomponenten-Schnellklebstoff X 60 wird durch Daumendruck auf eine Schichtdicke von  $65 \pm 15 \mu\text{m}$  reduziert und härtet chemisch innerhalb

1 Stunde bei Raumtemperatur.

Der Einkomponenten-Schnellklebstoff Z 70 wird mit einer Schichtdicke von

$8 \pm 2 \mu\text{m}$  aufgetragen und härtet unter Daumendruck innerhalb  $\frac{1}{2}$  Minute chemisch aus (messfähig nach ca. 30 Minuten).

Der Zweikomponenten-Klebstoff EP 250 wurde nach dem folgenden Programm ausgehärtet: 1h bei  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  unter mechanischem Anpressdruck von 15 bar plus 1h bei  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  ohne Anpressdruck. Die dabei erreichte Schichtdicke beträgt  $20 \pm 5 \mu\text{m}$ .

Zum Anschluss der DMS dienten Cu-Litzen mit einem Leiterquerschnitt von  $0,25 \text{ mm}^2$ . Sämtliche Verbindungen waren gelötet.

Das als Druckmedium verwendete Isolieröl machte die Anwendung einer zusätzlichen DMS-Schutzabdeckung entbehrlich.

Zur Dehnungsmessung wurden nach dem Trägerfrequenzverfahren arbeitende manuelle Kompensatoren des Typs MK verwendet. Die Speisespannung betrug 1 V/225 Hz, die Auflösung 1  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Die Ergebnisse sind in der Tafel 3.4-2 zusammengefasst. Die Mittelwerte sind + 7,4  $\mu\text{m}/\text{m}$  je 100 bar bei den Folien-DMS und + 5,5  $\mu\text{m}/\text{m}$  je 100 bar bei den Draht-DMS. Die Einflüsse der Messgitterlänge und der Klebstoffe sind relativ klein. Sie betragen nur  $\pm 0,8 \mu\text{m}/\text{in}$  je 100 bar bei den Folien-DMS und ca.  $\pm 1,3 \mu\text{m}/\text{m}$  je 100 bar bei den Draht-DMS und entsprechen damit etwa der Standardabweichung  $s$  der einzelnen Messreihen.

Dehnungsmessstreifen			$\varepsilon_p$ in $\frac{\mu\text{m}/\text{m}}{100 \text{ bar}} \pm s$ wenn geklebt mit		
Art	Familie	Typ	X 60	Z 70	EP 250
Folien-Messgitter	LY 11	3/120	$6,6 \pm 1,2$	$7,9 \pm 1,0$	$8,1 \pm 1,0$
		6/120	$7,3 \pm 1,0$	$8,1 \pm 1,0$	$8,2 \pm 0,4$
	LG 11	3/120	–	$7,0 \pm 1,5$	$5,7 \pm 1,0$
		6/120	–	$7,9 \pm 1,0$	$6,8 \pm 0,6$
Draht-Messgitter*	LA 11	6/120	$5,7 \pm 0,8$	$6,5 \pm 1,1$	–
		10/120	$4,0 \pm 0,8$	$5,1 \pm 1,6$	–
	LP 11	6/120	$5,6 \pm 0,7$	$5,3 \pm 1,0$	$5,9 \pm 0,6$

\*nicht mehr im aktuellen HBM-DMS-Programm

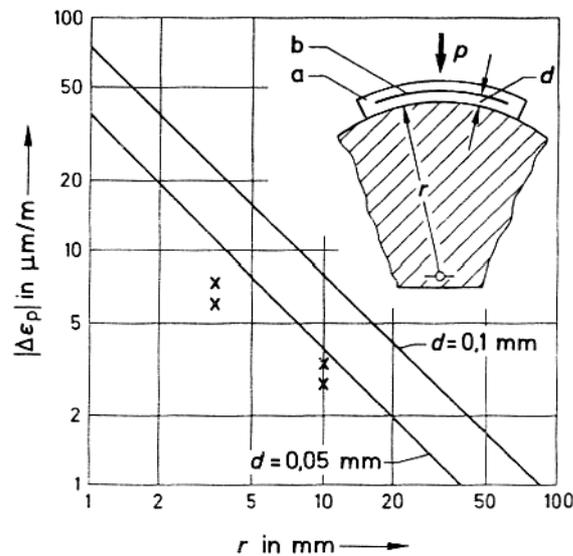
**Tafel3.4-2: Der Einfluss hydrostatischen Drucks auf die untersuchten DMS-Applikationen in  $\mu\text{m}/\text{m}$  je 100 bar einschließlich Standardabweichung  $s$ , gültig für den untersuchten Druckbereich 0 bis 500 bar.**

Bei gekrümmten Applikationsflächen entsteht infolge der größeren Kompressibilität der Klebstoff/Messgitterträger-Schichten eine zusätzliche Dehnung  $\Delta\varepsilon_p$  des Messgitters, die bei ebenen Flächen nicht auftritt. (Die Wirkung ist ähnlich dem im Abschnitt 3.3-4 beschriebenen Temperatureffekt an gekrümmten Flächen.)

In dem aus [3-37] entnommenen Diagramm Bild 3.4-4 ist für die beiden Schichtdicken  $d = 0,05$  und  $0,1$  mm für Klebstoff plus Messgitterträger die druckabhängige Dehnungsänderung  $\Delta\varepsilon_p$  eingetragen. Der Berechnung liegen folgende Daten zugrunde:

E-Modul für Klebstoff und Messgitterträger  $\approx 10000\text{N}/\text{mm}^2$ ;  
 Querszahl  $\nu = 0,32$ ;  
 Druck  $p = 100$  bar (10 MPa); Änderung  
 des Bauteilradius  $\Delta r = 0$ .

Das Vorzeichen wird negativ bei konvexer Krümmung und positiv bei konkaver Krümmung.



a DMS

b Messgitter

d Schichtdicke Klebstoff plus Messgitterträger

————— berechneter Wert

xxx gemessene Werte

Weitere Erläuterungen im Text.

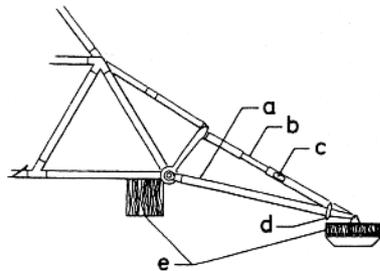
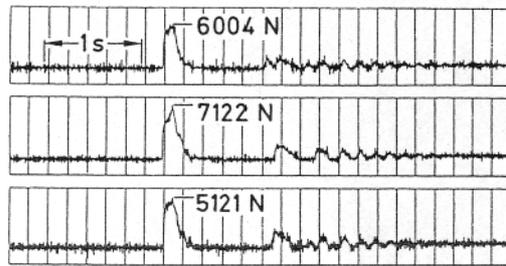
**Bild 3.4-4:** Durch hydrostatischen Druck  $p$  verursachte Nullpunktverschiebung  $\Delta\varepsilon_p$  bei Klebung des DMS an eine gekrümmte Fläche (nach [3-37]).

Ein Einfluss hydrostatischen Drucks auf die Empfindlichkeit des DMS (den  $k$ -Faktor) konnte bisher nicht gefunden werden. Die Streuung der Messwerte lagen innerhalb der Messunsicherheit von  $\pm 0,5 \%$  der verwendeten Versuchseinrichtung.

### 3.4.4 Vakuum

Für die Funktionstüchtigkeit von DNIS im Vakuum ist deren Anwendung an der amerikanischen Mondsonde „Surveyor I“ zur Messung des Landeaufpralls auf dem Mond eines der spektakulärsten Beispiele (Bild 3.4-5). Die dabei gelungenen Messungen beweisen grundsätzlich die Anwendbarkeit von DMS unter Höchstvakuum-Bedingungen [3-39]. Weitere Beispiele über Messungen im Hochvakuum sind in [3-40,3-41] beschrieben.

Wenn die unbeschränkte Pumpkapazität des Weltraums zur Verfügung steht, verursacht das Ausgasen der Werkstoffe (DMS, Klebstoffe, Abdeckmittel, Isolierstoffe usw.) keinerlei Probleme. Anders liegen die Verhältnisse in einem abgeschlossenen System, wo infolge des Ausgasens der Werkstoffe das Vakuum schlecht wird. Vakua von  $10^{-7}$  mbar lassen sich noch gut beherrschen. Schwieriger wird es bei Höchstvakua, wo durch Ausgasen und Desorption nicht nur das Vakuum zerstört wird, sondern auch wichtige Teile der Versuchsanlage kon-



- a Landebein
- b Stoßdämpfer
- c DMS
- d Feinsteuerdüse
- e Puffer

**Bild 3.4-5: Messschrieb vom Landeaufprall der Mondsonde „Surveyor I“ auf dem Mond (1966)**

taminiert und in ihrer Funktion beeinträchtigt werden können. Vakuum-Spezialisten kennen diese Probleme; sie wissen auch, dass ein einziger Fingerabdruck innerhalb der Apparatur bereits katastrophale Folgen hat.

Bei der Applikation von DMS beachte man folgendes: DMS mit Trägern aus reinem Polyimid oder reinem Epoxidharz sind vorzuziehen, eventuell solche mit offenem Messgitter. Phenolharzträger haben sich unter Weltraumbedingungen bewährt. Den Messgitterträger beschneide man auf die zulässigen Minimalmasse. Als Klebstoffe sind ebenfalls reine Harze von Vorteil. Wenn irgend möglich, verwende man heißhärtende Klebstoffe. Die Klebstoffe müssen voll ausgehärtet sein; man wende das Maximal-Härteprogramm an, gefolgt von mehrstündigem Nachhärten bei ca. 200 °C, wenn möglich.

Zum Verschalten der DMS sind massive Leitungen vorzuziehen. Die Isolation muss gründlich gereinigt werden. Zur Vermeidung von Fingerabdrücken benutze man Operationshandschuhe und Pinzetten. Gründliches Reinigen der Lötstellen ist unerlässlich.

Die während dieser Arbeiten unvermeidliche Adsorption von Feuchtigkeit beseitige man durch Ausheizen oder durch Lagerung in einem Trockenmittel (z. B. Silica Gel) bzw. in einem Exsiccator über Phosphorpentoxid. Damit wird das Ausgasen in das Vakuum vermindert und der Nullpunkt der Messstelle stabilisiert. Die Tafel 3.4-3 (auszugsweise aus [3-41] entnommen) enthält für zahlreiche Werkstoffe die Ausgasungsraten, teilweise nach Vorbehandlung, und für unterschiedliche Zeiträume.

Werkstoff	Zustand	Ausgasungsrate im mbar · l/(s · cm <sup>2</sup> ) nach		
		1 Stunde	10 Stunden	100 Stunden
Aluminium		$1,7 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-9}$
„	450 °C	$1,3 \cdot 10^{-6}$		
„	eloxiert		$1 \cdot 10^{-7}$	
Al-6061-T6			$2,5 \cdot 10^{-9}$	
„	200 °C		$4,5 \cdot 10^{-9}$	
„	13,5 h ausgeheizt bei 200 °C		$3,7 \cdot 10^{-10}$	
„	300 °C		$1,4 \cdot 10^{-8}$	
„	15 h ausgeheizt bei 300 °C		$1,6 \cdot 10^{-10}$	
Kupfer		$2,3 \cdot 10^{-6}$		
„	450 °C	$1,6 \cdot 10^{-6}$		
„	450 °C, entfettet	$1,4 \cdot 10^{-6}$		
Molybdän		$7 \cdot 10^{-7}$		
Nickel		$6 \cdot 10^{-7}$		
Silber		$6 \cdot 10^{-7}$		
Stahl		$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	
„	kugelgestrahlt		$6 \cdot 10^{-8}$	
„	200 °C		$8,6 \cdot 10^{-9}$	
„	400 °C		$8,4 \cdot 10^{-9}$	
„	15 h ausgeheizt bei 200 °C			$4,3 \cdot 10^{-11}$
„	15 h ausgeheizt bei 400 °C		$1,2 \cdot 10^{-11}$	
„	450 °C	$4,2 \cdot 10^{-7}$		
„	450 °C, entfettet	$3,6 \cdot 10^{-7}$		
rostfreier Stahl		$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-8}$	
„	entfettet	$3 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$9 \cdot 10^{-11}$
„	poliert, dampfentfettet		$1,4 \cdot 10^{-9}$	
„	400 °C	$7,6 \cdot 10^{-10}$		$1,1 \cdot 10^{-10}$
„	400 °C, 24 h ausgeh. bei 200 °C	nach 3,5 h		nach 167 h
„	400 °C, 12 h ausgeh. bei 400 °C		$1,5 \cdot 10^{-10}$	
Stahl verchromt	poliert, dampfentfettet	$1 \cdot 10^{-8}$	nach 22 h	
Stahl vernickelt	poliert, dampfentfettet	$5 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-10}$	
Tantal		$9 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9}$	
Wolfram		$2 \cdot 10^{-7}$		
Zirkon		$1,3 \cdot 10^{-6}$		
Araldid. D			$1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-7}$
KEL-F (PTFE-Fett)		$4 \cdot 10^{-8}$		
Teflon (PTFE)	wie geliefert	$5 \cdot 10^{-6}$		
„		$4,6 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-8}$
Mylar	entgast	$2 \cdot 10^{-7}$		
„	wie geliefert	$3 \cdot 10^{-6}$		
Nylon		$1,2 \cdot 10^{-5}$		
Plexiglas	entgast	$1 \cdot 10^{-6}$		
Polyaethylen		$2,6 \cdot 10^{-7}$		
Polyvinylchlorid			$8 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
„	wie geliefert	$9 \cdot 10^{-7}$		
Butylkautschuk		$1,5 \cdot 10^{-6}$		
Neoprene		$3 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	
„	wie geliefert	$2 \cdot 10^{-4}$		
Silikonkautschuk	wie geliefert	$3 \cdot 10^{-5}$		
Porzellan	glasiert	$6,5 \cdot 10^{-7}$		
Steatit		$9 \cdot 10^{-8}$		

Tafel 3.4-3: Ausgasungsrate verschiedener Werkstoffe in Vakuum ( nach [3-41] ).

### 3.4.5 Energiereiche Strahlung (ionisierende Strahlung)

Der Begriff „energiereiche Strahlung“ umfasst korpuskulare und elektromagnetische Strahlungen. Sie sind aufgrund ihrer Energie in der Lage, aus der Materie, in der sie absorbiert werden, Elektronen abzuspalten. Die ursprünglich elektrisch neutralen Atome werden dadurch positiv geladen und zu Ionen. Man spricht deshalb auch von „ionisierender Strahlung“. Die Zahl der entstehenden Ionenpaare erhöht sich mit der Intensität („Dosisrate“) der Strahlung.

Für die Absorption energiereicher Strahlung sind die atomare Zusammensetzung und die Dichte des absorbierenden Mediums entscheidend.

Zur energiereichen Strahlung gehören  $\alpha$  -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - und Röntgenstrahlung sowie Protonen- und Neutronenstrahlung.

Die Strahlungsenergie wird in der Regel in Millionen Elektronenvolt (MeV) angegeben. Unter einem Elektronenvolt (eV) versteht man die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Spannungspotential-Differenz von 1 Volt erreicht.

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Nm} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Ws} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J.}$$

$\alpha$ -Strahlung ist eine Korpuskelstrahlung, die aus schnell bewegten Heliumkernen besteht. Sie entsteht beim (natürlichen) Kernzerfall. Ihre Eindringtiefe in feste Stoffe liegt in der Größenordnung von einigen  $\mu\text{m}$ . Sie wird dort abgebremst und sendet dabei eine sekundäre  $\gamma$ -Strahlung aus. Das abgebremste  $\alpha$ -Teilchen fängt aus der Umgebung zwei Elektronen ein und wird zum stabilen Heliumatom.

$\beta$ -Strahlung ist ebenfalls eine Korpuskelstrahlung, bestehend aus schnellen Elektronen. Sie dringt tiefer in feste Stoffe ein (bis zu einigen mm) und sendet beim Abbremsen sekundäre  $\gamma$ -Strahlung aus.

$\gamma$ -Strahlung und Röntgenstrahlung haben die Eigenschaften elektromagnetischer Wellen. Sie unterscheiden sich durch ihre Wellenlänge ( $\gamma$ -Strahlen  $\rightarrow$ , kurzwellig, Röntgenstrahlung  $\rightarrow$  langwellig).  $\gamma$ -Strahlung entsteht sowohl bei der Kernspaltung im Reaktor als auch beim Kernzerfall radioaktiver Stoffe. Sie kann tief in Materie eindringen. Wegen der geringen Reichweite von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen wird  $\gamma$ -Strahlung die wesentliche Strahlungsart sein, die außerhalb eines Reaktors auftritt. Sie führt - ebenso, wie  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung - nicht zu künstlicher Radioaktivität der bestrahlten Stoffe.

Neutronenstrahlung ist eine Korpuskelstrahlung ohne elektrische Ladung (neutrale Bestandteile von Atomkernen). Sie entsteht bei Kernspaltung im Reaktor: Neutronenstrahlung erzeugt künstliche Radioaktivität in bestrahlten Stoffen. Schnelle und thermische Neutronen können wegen der fehlenden elektrischen Ladung von jedem Atomkern eingefangen werden. Dadurch erhöht sich dessen Massenzahl und es entsteht ein Isotop des ursprünglich stabilen Elementes, das



instabil sein kann und unter Aussendung radioaktiver  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -Strahlung zerfällt.

Protonen sind Wasserstoffkerne; sie besitzen positive Ladung, Protonen und  $\alpha$ -Teilchen haben wegen ihrer um den Faktor  $10^3$  größeren Masse eine wesentlich höhere Ionisierungsdichte als Elektronen und damit bei gleicher kinetischer Energie eine entsprechend geringere Reichweite.

Von den verschiedenen Kernstrahlungsarten können nur Neutronen und Gammastrahlung tiefer als einige Zentimeter in feste Körper eindringen. Diese Strahlungsarten bilden daher im wesentlichen das Strahlungsfeld in und um einen Kernreaktor. Durch diese zwei Strahlungsarten werden jedoch alle anderen Strahlungstypen in den getroffenen Materialien ausgelöst. Hauptsächlich diese sekundäre, nicht weitreichende Strahlung ruft Schäden hervor.

Der Mechanismus der Strahlenschädigung lässt sich folgendermaßen erklären: Eine Partikelstrahlung überträgt beim Durchdringen eines Materials Energie auf die Elektronen und Kerne einzelner Atome, groß genug, um die Bindung der Atome im Molekularverband zu brechen. Die dabei entstehenden Bruchstücke reagieren wiederum chemisch miteinander und bilden andere als die ursprünglichen Verbindungen. Die Konzentration dieser verunreinigenden Verbindungen steigt mit der Strahlungsenergie und der Strahlendosis und hat mehr oder weniger große Änderungen der Materialeigenschaften zur Folge.

- a) bei Metallen zu Wärmeentwicklung ohne wesentliche Schädigung. Es wird eine Kaltverfestigung des Materials beobachtet, die sich in verminderter Dehnbarkeit auswirkt.
- b) bei Kunststoffen zu irreversiblen chemischen Umsetzungen und damit zu Dauerschäden.

Während der Bestrahlung von DMS-Messstellen wurde ferner Korrosion beobachtet, die durch Stickoxyde, Ozon, Wasserdampf verursacht wurden. Auch andere Gase, die sich infolge der Bestrahlung von Luft bilden, sind als Ursache in Betracht zu ziehen. Wurde das die Proben enthaltende Gefäß mit trockenem Helium durchspült, dann konnte die durch Stickstoff verursachte Korrosion an elektrischen Verbindungen verhütet werden.

Katastrophale Unterschiede des Isolationswiderstandes der DMS-Applikation und der Anschlussleitungen zeigten sich, als die Heliumspülung bei einem Folgetest abgeschaltet wurde. Der Anfangswiderstand von

2000 M $\Omega$  sank im Verlauf von 30 Tagen auf 3 k $\Omega$ . Nachdem die Heliumspülung wieder inangegesetzt wurde, stieg der Isolationswiderstand innerhalb 12 Stunden auf 1000 M $\Omega$  an [3-27].

### 3.4.5.1 Die Einwirkung ionisierender Strahlung auf DMS-Messstellen

Es ist schwierig, über dieses Thema konkrete Angaben zu machen. Die dem Autor zugänglichen Quellen informieren meist über Einzelbeobachtungen, die für den jeweiligen, speziellen Fall gültig sind, deren Ergebnisse aber nur bedingt übertragbar sind. Unter diesem Aspekt sind die folgenden Informationen zu sehen.

Der Einfluss ionisierender Strahlung kann in vier Gruppen aufgeteilt werden:

1. den Einfluss auf den Messgitterwerkstoff,
  2. den Einfluss auf den Messgitterträger,
  3. den Einfluss auf das Applikationsmittel (Klebstoff),
  4. den Einfluss auf die Anschlussmittel (Lötstellen, Kabel usw.)
- A) Zur Strahlungsbeeinflussung tragen bei:
- a) seitens der Strahlung: die Dosis, die Flussdichte, die Energie (bzw. das Energiespektrum), die Strahlungsart.
  - b) seitens des Materials: die Molekülanordnung, die Geometrie, die Größe der Moleküle, das Molekulargewicht, die Abmessungen, das Volumen, die Dicke und die Dichte.
- B) Die Strahlungsresistenz lässt sich in ihrer Tendenz von gut zu schlecht wie folgt ordnen:  
Metalle, Keramik, Halbleiter, Kunststoffe.

Die Einwirkung von Kernstrahlung auf die an einer DMS-Messstelle beteiligten Werkstoffe führt zu deren Schädigung. Man versteht unter Strahlungsschäden die Änderungen sowohl der physikalischen Materialeigenschaften als auch der chemischen Zusammensetzung.

- a) Metalle zeigen eine Veränderung ihres elektrischen Widerstandes als Folge einer Betahlung. Unter den im DMS verwendeten Metallen haben sich die Legierungen Cu/Ni 45/55 („Konstantan“) und Pt/W 90/10 als relativ stabil erwiesen, während die Legierung Cr/Ni 80/20 („Nichrome V“) ihre Widerstand um mehrere Prozent verändert.
- b) Von den Halbleitermaterialien zeigt das in Halbleiter-DMS allgemein übliche Silizium eine relativ große Widerstandsänderung.

#### Beispiel:

Widerstandsänderung nach einer empfangenen Strahlungsdosis von  
 $3,5 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2$  ( $E \geq 4,8 \cdot 10^{13} \text{ J} = 3 \text{ MeV}$ ): + 25 %,  
 $4 \cdot 10^{16} \text{ n/cm}^2$  ( $E \geq 4,8 \cdot 10^{13} \text{ J} = 3 \text{ MeV}$ ): + 86 %.

- c) Die Trägerwerkstoffe der DMS und die Klebstoffe bestehen aus organischen Stoffen. Sie entarten unterschiedlich stark unter Strahlenbelastung.

Für die Strahlungsresistenz der Kunststoffe ergibt sich die Reihenfolge:

Polyimid, Phenolharz, Polyesterharz, glasfaserverstärktes Siliconharz, Epoxidharz, Polyäthylen, Zellulose, Silicon, Teflon.

Gelegentlich beobachtet man nach der Beendigung der Bestrahlung eine zeitabhängige, teilweise Erholung des Materials. Schäden entstehen durch die Ionisierung der Isolierstoffe, welche mit der Bestrahlung einhergeht. Damit geht die Isolierfähigkeit dieser Stoffe mehr oder weniger verloren mit allen Folgen für eine Messung. Die Ionisierung verschwindet nach beendeter Bestrahlung wieder, wenn die Rekombination der Molekularstruktur abgeschlossen ist.

Gute Strahlungsresistenz zeigen hochreine, im Flammgespritzverfahren aufgetragene Bindemittel (hochreines  $Al_2O_3$ ); keramische Kitten sind ebenfalls brauchbar. Deshalb sind Freigitter-DMS (das sind DMS ohne Messgitterträger), die mit keramischen Bindemitteln appliziert werden, in Strahlungsfeldern besser geeignet als normale DMS.

#### Beispiel:

Ein mit keramischem Kitt befestigter DMS mit Konstantan-Messgitter zeigte in einer Neutronenstrahlung von  $10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  eine durchschnittliche Drift von  $2 \mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$  über eine Zeitspanne von 150 Stunden.

#### C) Folgen der Bestrahlung einer DMS-Messstelle

- a) Die Bindung zwischen DMS und Bauteil wird geschädigt oder zerstört. Für die Strahlungsresistenz der Bindemittel ergibt sich die Reihenfolge: keramische Bindemittel, heißhärtende organische Klebstoffe, kalthärtende Klebstoffe.
- b) Der Isolationswiderstand des Messgitterträgers, des Klebstoffes und der Kabelumhüllung sinkt. Widerstandsänderungen in den DNIS lassen sich zum Teil durch Halb- oder Vollbrücken-Anordnungen ausgleichen. Anschweißbare DMS in Vollbrückenausführung mit keramischer Bindung des Messgitters auf dem anschweißbaren Träger haben sich bewährt.
- c) In der Umgebung von Lötstellen tritt besonders starke Ionisierung auf. Durch Flussmittelreste sind weitere Einflüsse zu erwarten. Man sollte ausschließlich geschweißte Verbindungen ausführen.
- d) In der Schaltung fließen infolge der Ionisierung

#### Resümee

Für Messungen mit DMS unter Strahlungseinwirkung sind zu empfehlen:

- a) Freigitter-DMS mit Messgittern aus Konstantan oder der Pt-W-Legierung 1200 (z. B. Serie LF 30\*);

\*) Nicht mehr im HDM-Programm

- b) die Befestigung mit Rokide-Keramik im Flammstutzverfahren oder mit keramischem Kitt (z. B. CR 760\*), oder anschweißbare DMS;
- c) punktgeschweißte Leitungsverbindungen;
- d) keramische Leitungsisolierungen;
- e) nach Möglichkeit Voll- oder Halbbrückenordnung anwenden.

Schrifttum [3-42]

D) Einige Informationen über den Einfluss ionisierender Bestrahlung.

a) Die Strahlungsresistenz von Kunststoffen

Die kritische Dosis für Kunststoffe beträgt ca.  $10^4 \dots 10^5$  J/kg. Durch Füllstoffe, wie z. B. Metalloxide und Mineralien, lässt sich die Strahlungsresistenz der Kunststoffe steigern.

Kunststoff	kritische Dosis [J/kg]
PVC	$10^5 \dots 10^6$
Vinyl	$10^4 \dots 10^5$
Phenolharz-Cement (Klebstoff BC 6035)	$10^3$
Teflon	$10^2$
Zelluloseklebstoff (Duco)	10
Siliconharz mit Asbest	$1 \dots 2 \cdot 10^6$
Epoxidharz mit Metalloxid	$10^5 \dots 10^6$

**Tafel 3.4-4: Kritische Strahlungsdosis für einige Kunststoffe**

Anmerkung:

Für die Energiedosen von Strahlungen findet man die unterschiedlichsten Angaben. Hinsichtlich ihrer Wirkung können etwa äquivalent angenommen werden.

1 J/kg (Joule je Kilogramm) (SI-Einheit)

$1 \cdot 10^2$  rad (Radation absorbed dose).

$1 \cdot 10^4$  erg/g (Erg je Gramm),

$1,2 \cdot 10^2$  r (Röntgen),

$1 \cdot 10^{12}$  thermische Neutronen/cm<sup>2</sup>,

$2,8 \cdot 10^{10}$  schnelle Neutronen/cm<sup>2</sup>,

$1,4 \cdot 10^{11}$  Gamma-Photonen/cm<sup>2</sup>,

$5,2 \cdot 10^9$  Elektronen/cm<sup>2</sup>

- b) Die Einwirkung von Gammastrahlung auf die verschiedenen Bestandteile einer DMS-Messstelle siehe Tafel 3.4-5.

\*) Nicht mehr im HBM-Programm

Bezeichnung	Strahlendosis $\gamma$ [J/kg]
<b>1. DMS</b>	
1.1 offene DMS mit Konstantan-Messgitter	1 · 10 <sup>6</sup> wird angesehen als sichere Anwendungsgrenze 4 · 10 <sup>6</sup> möglicher DMS-Ausfall
1.2 DMS mit gekapseltem Konstantan-Messgitter	2 bis 4 · 10 <sup>6</sup> sicherer Arbeitsbereich 6 · 10 <sup>6</sup> möglicher DMS-Ausfall
<b>2. Messgitter-Trägerwerkstoff</b>	
2.1 Epoxidharz, offenes Messgitter	4 · 10 <sup>6</sup> Maximalgrenze für sicheres Arbeiten
2.2 Polyimid	10 <sup>9</sup> ohne Isolationsverlust oder physikalischen Schaden
2.3 Glasfaserverstärktes Epoxidharz, gekapseltes Messgitter	5 · 10 <sup>4</sup> sicherer Arbeitsbereich
2.4 Glasfaserverstärktes Phenolharz, gekapseltes Messgitter	3 bis 4 · 10 <sup>5</sup> Maximaldosis 6 · 10 <sup>6</sup> Maximaldosis
<b>3. Messgitterlegierungen</b>	
3.1 Konstantan, offenes Messgitter	1 · 10 <sup>6</sup> sicherer Arbeitsbereich 4 · 10 <sup>6</sup> möglicher DMS-Ausfall
3.2 Konstantan, gekapselt	2 bis 4 · 10 <sup>6</sup> sicherer Arbeitsbereich 6 · 10 <sup>6</sup> Maximaldosis
3.3 Karma, gekapselt	5 · 10 <sup>4</sup> sicherer Arbeitsbereich 4 · 10 <sup>6</sup> möglicher Ausfall
<b>4. Klebstoffe</b>	
4.1 Epoxidharzklebstoff	6 · 10 <sup>6</sup> Maximaldosis
<b>5. DMS-Abdeckmittel</b>	
5.1 Siliconkautschuk	4 · 10 <sup>6</sup> beginnende Erhärtung 6 · 10 <sup>6</sup> völlig hart, Bindung zum Objekt kann sich lösen
<b>6. Isolation</b>	
6.1 Teflon (PTFE)	1 · 10 <sup>4</sup> sicherer Bereich 1 · 10 <sup>5</sup> Obergrenze 2 · 10 <sup>5</sup> Rissbildung
6.2 Polyvinylchlorid (PVC)	8 · 10 <sup>3</sup> sicherer Bereich 1 · 10 <sup>6</sup> weißes PVC wird dunkel 6 · 10 <sup>6</sup> Maximaldosis
6.2 Glasfasergeflecht	5 · 10 <sup>4</sup> sicherer Bereich 4 · 10 <sup>5</sup> Obergrenze
<b>7. Lote</b>	
7.1 Zinn-Blei-Lote	2 · 10 <sup>5</sup> Obergrenze
7.2 Silberlot-Paste	5 · 10 <sup>4</sup> Normalbereich 3 bis 4 · 10 <sup>5</sup> Obergrenze
7.3 Punkt- oder Gasschweißung	6 · 10 <sup>6</sup> etwa Obergrenze

Tafel 3.4-5: Beständigkeit der Bestandteile einer DMS-Messstelle gegen Gammastrahlung

### 3.4.6 Magnetische Felder

Bei Messungen mit DMS in magnetischen Feldern treten vier Einflüsse in Erscheinung.

- die Magnetostriktion des Messobjektes, an welches der DMS appliziert ist,
- die Magnetostriktion des Messgitterwerkstoffs des DMS,
- der Magneto-Widerstandseffekt des Messgitterwerkstoffs,

- induzierte elektrische Spannungen im DMS (bzw. in dessen Verschaltung) durch pulsierende oder veränderliche Magnetfelder.

Die Magneto-Striktion führt bei magnetischen Feldern ausgesetzten, ferromagnetischen Werkstoffen zu Dimensionsänderungen, die von angeklebten DMS wahrgenommen und angezeigt werden.

Unterliegt ein DMS selbst der Magnetostriktion, so führt das zu falschen Anzeigen. Dieser Effekt tritt nur bei paramagnetischen Messgitterwerkstoffen auf. Der Magneto-Widerstandseffekt ist die durch die Einwirkung eines magnetischen Feldes hervorgerufene Änderung des Widerstandes eines elektrischen Leiters. Dieser Effekt wird bei fast allen ferromagnetischen Leitermaterialien beobachtet. Er war Gegenstand verschiedener Untersuchungen an DMS. Vor allem die in Amerika noch benutzte, ferromagnetische Legierung „Isoelastic“ zeigte starke Effekte.

Der in Deutschland überwiegend zur Herstellung der DMS verwendeten Kupfer-Nickel-Legierung „Konstantan“ wird durch verschiedene Autoren Unempfindlichkeit bzw. sehr geringe Empfindlichkeit bescheinigt. Die Unterschiede in der Beurteilung mögen in Legierungsunterschieden des von verschiedenen Herstellern gelieferten „Konstantan“-Materials begründet sein und auch in der Stärke des Magnetfeldes, in welchem die DMS untersucht wurden. In [3-43] wird über Untersuchungen im Magnetfeld des Berkeley „Bevatron“-Protonenbeschleunigers mit Flussdichten bis 2 Tesla (= 20000 Gauß) berichtet.

An DMS mit Messgittern aus Konstantan und aus der Legierung Pt/W 90/10 wurden keine Auswirkungen des Magnetfeldes beobachtet.

Es ist schwer, aus den erreichbaren Informationen eindeutige Schlüsse zu ziehen, weil die Ergebnisse kein einhelliges Bild ergeben. Das mag an den unterschiedlichen Versuchsbedingungen liegen, an den nicht oder unzulänglich beschriebenen Messeinrichtungen oder auch an der Unmöglichkeit, die eingangs erwähnten Effekte in ihrer Auswirkung zu trennen.

In [3-44] wird über DMS-Untersuchungen im Feld des Saturn Synchrotrons berichtet. Das Magnetfeld mit einer Flussdichte von 1,5 T (15000 Gauß) baut sich in 0,8 Sekunden auf und in der gleichen Zeit wieder ab. Der Zyklus wird alle 3,2 Sekunden wiederholt. Die untersuchten DMS stammten aus zwei nicht genannten Quellen. Um die Magneto-Striktion des Bauteils auszuschalten, wurden die DMS an nichtmagnetischem Material (Kupfer, Plexiglas usw.) befestigt. Die Messgitter-Richtung der DMS war z. T. parallel, z. T. senkrecht zur magnetischen Flussrichtung orientiert. Die DMS wurden z. T. in Viertelbrückenordnung, z. T. in Halbbrückenordnung geschaltet, letzteres um den Grad der Kompensation zu ermitteln. Die Speisung erfolgte mit Gleichspannung; die Polarität wurde während der Untersuchung vertauscht, um das magnetisch verursachte Signal von der übrigen Anzeige zu trennen. Der Störpegel überstieg nicht 7  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Die Tafel 3.4-6 enthält die Messwerte.

DMS Lieferant	DMS-Anordnung und Messgitterrichtung zur Flussrichtung	magnetische Flussdichte in Tesla					
		0,26	0,6	1	1,4	1,6	2
		Nullpunktverschiebung in $\mu\text{m/m}$					
1	1 DMS $\perp$	8	70	95	110	130	185
	1 DMS II	4	12	18	22	28	35
	2 DMS $\perp$	Kompensation					5
	2 DMS II	Kompensation					5
2	1 DMS $\perp$	2	8	10	12	16	20
	1 DMS II	5	8	10	12	15	20
	2 DMS $\perp$	Kompensation					3
	2 DMS II	Kompensation					3

**Tafel 3.4-6: Nullpunktverschiebung von DMS im statischen Magnetfeld (nach [3-44]).**

Weitere einschlägige Literaturstellen: [3-45 bis 3-48].

Bei Halbleiter-DMS hängt die Größe des Magneto-Widerstandseffektes von der Beweglichkeit der Ladungsträger ab. Sie wird durch die Gleichung

$$R = R_0 (1 + \beta^2 B^2) \quad (3:4-2)$$

beschrieben

R elektrischer Widerstand,

$R_0$  Widerstand ohne magnetische Beeinflussung,

$\beta$  Beweglichkeit der Ladungsträger,

B magnetische Flussdichte (Induktion).

Pulsierende oder veränderliche Magnetfelder induzieren in elektrischen Leitern elektrische Spannungen, die sich dem Messsignal als Fehler überlagern. Sie zu verhindern, werden teilweise induktionsfreie DMS (das sind DMS mit gegenläufig gewundenen Messgitterhälften) angewandt oder die DMS mit Mumetall-Folien oder -Kappen magnetisch abgeschirmt. Zur Verschaltung sind induktionsfrei verdrillte und/oder magnetisch geschirmte Kabel im Gebrauch. Besondere Vorteile bieten in solchen Fällen Trägerfrequenz-Messverstärker. Im Gegensatz zu Gleichspannungs-Verstärkern eliminieren sie alle Spannungen, deren Frequenzen außerhalb ihres Übertragungsbandes liegen (Abschnitt 5.3). Im täglichen Leben wird der Messingenieur kaum mit so gewaltigen Magnetfeldern konfrontiert werden. Die Tafel 3.4-7 ermöglicht eine grobe Abschätzung der Intensität magnetischer Felder (nach [3-48]).

Die magnetische Feldstärke H in der Umgebung eines Leiters errechnet sich nach der Gleichung.

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (3.4-3)$$

I = Strom

r = Radius

Flussdichte B in Millitesla [mT]	Ursprungs-Beispiel
niedrig ( $\leq 2$ )	Leistungstransformatoren, Fluoreszenzlampen und Starkstromkabel in ca. 1 m Abstand; Lötpistolen in 2 ... 4 m Abstand; Elektromotoren.
mittel (2 ... 50)	Alle vorgenannten Gegenstände, näher als 1 m; Lötpistolen 15 cm ... 2 m; Sammelschienen, Kabel, Anschlüsse usw. die einen Strom von $\geq 5000$ A führen in 3 ... 15 m Abstand, bei 1000 A bis 2 m Abstand
hoch (50 ... 3200)	Schütteltische innerhalb 3 m. Elektromotoren in unmittelbarer Nähe, Generatoren

**Tafel 3.4-7: Flussdichte (Intensität) magnetischer Felder (nach [3-48]).**

Die magnetische Flussdichte (Induktion) B beträgt

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H. \quad (3.4-4)$$

- $\mu$  = Permeabilität des Messobjekt-Materials ,
- $\mu_0$  = Permeabilität des Vacuums
- H = magnetische Feldstärke

Der magnetische Fluss verläuft bei einem geraden Leiter in Umfangsrichtung.

### 3.4.7 Lagerung

DMS sind unter normalen Bedingungen unbegrenzt lagerfähig. Sie sollten zum Schutz gegen mechanische Beschädigung bis zum Gebrauch in ihrer Originalverpackung belassen werden. Witterungsbedingte Temperaturschwankungen können DMS nicht beeinträchtigen. Gegen Feuchtigkeit sollte man DMS schützen; sie werden in Normalklima 23/50 nach DIN 50014 hergestellt. Abweichungen der relativen Feuchte von dem Wert 50 % können zu unbedeutenden Schwankungen des elektrischen Widerstandes führen. Bedenklich sind hohe Luftfeuchtigkeit, die auf die Dauer zu Korrosionsschäden führen können. Ebenso ist die direkte Einwirkung von Wasser, Säuren, Basen, aggressiven Gasen, verunreinigenden Stoffen und Kernstrahlung schädlich.

Abweichend hiervon gelten für einige Spezial-DMS die folgenden Einschränkungen:

Freigitter-DMS haben einen selbstklebenden Hilfsträger, dessen Klebeschicht im Laufe der Zeit austrocknet und ihre Klebrigkeit verliert. Deshalb wird

- a) für Flammstanzapplikationen (Rokide) eine maximale Lagerfrist von 6 Monaten,
- b) für Kittapplikationen (CR 760) eine Lagerfrist von mindestens 1 Jahr angegeben.

Der DMS selbst unterliegt nicht der Alterung.

Gekapselte DMS mit metallischer oder gummiähnlicher Kapselung sind unbeschränkt lagerfähig. Anschweißbare DMS sind wie normale DMS zu lagern.

## 4 Applikationsmittel für Dehnungsmessstreifen

Zu den Applikationsmitteln gehören die Mittel und Hilfsmittel zur Befestigung des DMS am Messobjekt, Schaltmittel zum Anschließen der DMS und die Mittel des Messstellenschutzes. Das Applizieren selbst ist eine Arbeit, die außerordentliche Gewissenhaftigkeit verlangt. Nur ein sorgsam und fachgerecht applizierter DMS kann verlässlich arbeiten.

Die Befolgung der Applikationsanweisungen für DMS und der Gebrauchsanweisungen der Applikationsmittel ist deshalb unerlässlich. Man denke daran, dass möglicherweise vom Ergebnis einer Messung Leben und Gesundheit vieler Menschen betroffen sein kann.

Empfehlenswert ist eine Schulung der Applikateure im Rahmen von Speziallehrgängen, die von HBM und Instituten der Ingenieur- und Techniker-Fortbildung veranstaltet werden. Einzelheiten der Applikationstechnik werden in dieser Schrift nicht behandelt. Es sei jedoch auf die Druckschrift [4-1] verwiesen, die eine ausführliche Anleitung zum Applizieren von DMS gibt; einzelne Passagen daraus werden zitiert.

### 4.1 DMS-Befestigungsmittel

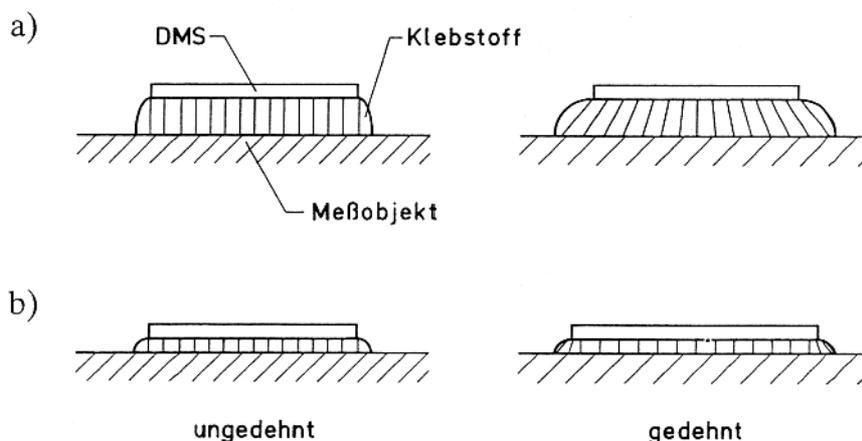
Die Befestigungsmittel haben die Aufgabe, den DMS fest mit der Oberfläche des Messobjekts zu verbinden und dessen Verformung verlustlos auf den DMS zu übertragen. Verschiedene Randbedingungen und Einflussgrößen sowie Rücksichten auf die Anwendungsmöglichkeiten erfordern unterschiedliche Bindemittel und Anwendungsverfahren. In seiner Bedeutung vornean steht das Kleben. Daneben sind noch andere Verfahren im Gebrauch, nämlich das Punktschweißen und die Befestigung mit keramischen Mitteln.

Als besondere Vorteile des Klebens sind im Hinblick auf seine Anwendung zur DMS-Applikation zu nennen:

- Die Möglichkeit, verschiedene Werkstoffe, auch einander artfremde, zu verbinden. Je nach Art des Klebstoffs erfolgt die Verbindung bei Raumtemperatur oder bei erhöhter Temperatur.
- Keine Beeinflussung der zu verbindenden Werkstoffe (Einschränkungen sind bei Kunststoffen möglich).

- Chemisch härtende Klebstoffe (nur solche haben in der DMS-Technik noch Bedeutung) zeichnen sich durch geringe Feuchtigkeitsaufnahme aus.
- Steuerung der Arbeitsgeschwindigkeit durch Wahl verschiedener Klebstoffsorten oder der Aushärtebedingungen (Heiß- oder Kalthärtung).
- Hoher spezifischer elektrischer Widerstand trägt zu hohem Isolationswiderstand zwischen DMS und Bauteil bei.

Zu den Vorteilen, welche die Klebstoffe bieten, muss sich ihre besondere Eignung zur DMS-Applikation gesellen, d. h., sie müssen in der Lage sein, die Dehnung des Messobjekts korrekt auf den DMS zu übertragen. Im Abschnitt 3.2.1.1, Bild 3.2-2, ist bereits der Übertragungsvorgang schematisch dargestellt. Die zur Dehnung des DMS erforderliche Kraft wird dem Messobjekt entnommen und von der Klebstoffschicht auf den DMS übertragen. Dabei entstehen in der Klebstoffschicht Schubspannungen, deren Größe von der zu übertragenden Kraft und der Übertragungsfläche abhängt. Infolge der Elastizität der Klebstoffe stellt sich eine Verzerrung der Schicht ein, die an den äußeren Rändern (in der Dehnungsrichtung gesehen) am größten ist und zur Mitte hin abnimmt. Diese Verzerrung bestimmt die Länge der Übergangsstrecken im Bild 3.2-2. Zuzufolge dieses Zustandes wird bei weichen Klebstoffen und dicken Schichten die Dehnung auf der dem DMS zugewandten Seite der Schicht kleiner sein als auf der mit dem Messobjekt in Kontakt stehenden Seite. Im Bild 4.1-1a wird versucht, dies darzustellen. In der linken Bildhälfte deuten die senkrechten Striche in der Klebstoffschicht die Richtung der Querschnittsebenen im umgedehnten Zustand an. Die rechte Bildhälfte zeigt das gleiche Objekt im gedehnten Zustand. Die Querschnittsebenen sind nunmehr nach den Rändern hin zunehmend gekippt. Das bedeutet, dass der Klebstoff die Dehnung des Messobjektes nur unvollständig auf den DMS überträgt.



**Bild 4.1-1: Dehnungsübertragung vom Bauteil auf den DMS durch den Klebstoff**

- a) ungeeigneter (zu weicher) Klebstoff und zu dicke Schicht  
 b) geeigneter Klebstoff in dünner Schicht

Verwendet man dagegen harten Klebstoff (Klebstoff mit hohem Elastizitätsmodul) und sorgt für eine dünne Klebstoffschicht, dann wird diese Verzerrung innerhalb der Klebstoffschicht sehr viel kleiner und sich im wesentlichen auf die äußeren Abschnitte beschränken. Diese Situation zeigt das Bild 4.1-1b. In diesem Fall sind die Einleitungsstrecken kurz und die Dehnungsübertragung ist korrekt.

Die Haftung geklebter Bauteile aneinander beruht auf Adhäsion zwischen dem Klebstoff und den vom Klebstoff benetzten Flächen. Adhäsion entsteht vorwiegend durch Anziehungskräfte zwischen benachbarten Molekülen. Der Beitrag einer Verklammerung des Klebstoffs in den Poren der aufgerauhten Fügeflächen oder durch Kapillarwirkung ist nur gering. Die zu beobachtende Steigerung der Bindefestigkeit bei mäßig rauhen Fügeflächen beruht auf der durch das Aufrauen erzielten Vergrößerung der wirksamen Kontaktflächen, nicht aber auf der „mechanischen Adhäsion“.

Die Ursache der Adhäsion ist recht verwickelter Natur und nur teilweise geklärt [4-2,4-3]. Einen wesentlichen Beitrag zu den Bindekräften liefert die Adsorption (man spricht auch von „Nebervalenzbildungen“), einen geringeren die chemische Bindung (Hauptvalenzbindung) und andere Energiequellen.

Unter dem Begriff „Van-der Waals'sche Kräfte“ sind verschiedenartige Bindungsmechanismen des Adsorptionsbereichs zusammengefasst, die im wesentlichen in drei Arten gegenseitiger Orientierungseffekte unterschieden werden:

- Das Dipolmoment (Keesom-Kräfte). Liegen in einem Molekül die positiven und negativen Ladungen asymmetrisch verteilt, so sind die Moleküle zwar insgesamt neutral, sie besitzen jedoch ein elektrisches Dipolmoment, sie sind polar. Benachbarte Moleküle suchen ihr Dipolmoment so auszurichten, dass der positiv geladenen Seite des einen Moleküls die negativ geladene Seite des Nachbarmoleküls zugekehrt ist und umgekehrt. Die mittlere Reichweite der Keesom-Kräfte beträgt 0,4 bis 0,5 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ).
- Der Induktionseffekt (Debye-Kräfte). Werden die Ladungsschwerpunkte des elektrischen Feldes eines Moleküls durch die induktive Wirkung eines äußeren Feldes (z. B. eines anderen Moleküls) verschoben, dann ergeben sich ebenfalls Wechselwirkungen. Im Unterschied zu den Keesom-Kräften besitzt bei den Debye-Kräften das eine Teilchen einen permanenten Dipol und das andere ein induziertes Dipolmoment. Die mittlere Reichweite der Debye-Kräfte beträgt 0,35 bis 0,45 nm.
- Der Dispersionseffekt (London-Kräfte). Dieser Effekt wird durch wellenmechanische Überlegungen gedeutet, wonach aufgrund der ständig wechselnden Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Schwerpunkte elektrischer Ladungen ein „in Phase“ schwingendes System zweier Teilchen entsteht, die sich dadurch gegenseitig ständig einen Dipol induzieren. Die mittlere Reichweite der London-Kräfte beträgt 0,35 bis 0,45 nm.

- Eine Sonderstellung innerhalb der Van-der-Waals'schen Kräfte nimmt die sogenannte „Wasserstoff-Brückenbindung“ ein. Sie beruht ebenfalls auf der Wechselwirkung orientierter Dipole, hat aber zur Besonderheit, dass der positive Pol mindestens eines Dipols von einem Wasserstoffatom dargestellt wird. Die Reichweite der Wasserstoffbrückenbindung beträgt 0,26 bis 0,3 nm. Der Anteil der chemischen Bindungskräfte (Hauptvalenzbindungen) ist noch wenig geklärt. Es scheint aber nach dem Bekannten, dass sie den geringeren Beitrag zu den adhäsiven Kräften liefern.

Sowohl die Arbeitsbedingungen am Applikationsort als auch unterschiedliche Anforderungen an das Leistungsvermögen der Bindemittel, vor allem hinsichtlich der Gebrauchstemperatur, sind Anlass für das Angebot verschiedener Befestigungsmittel. Das gleiche gilt auch für die DMS selbst. Dabei ergeben sich Paarungen zwischen gewissen DMS-Reihen und Klebstoff-Typen mit optimalen Eigenschaften in einem begrenzten Anwendungsbereich. Bei anderen Paarungen mit unterschiedlichem Leistungsvermögen bestimmt die Komponente mit dem engeren Leistungsbereich die Anwendungsgrenzen. Schließlich gibt es noch DMS und Befestigungsmittel, deren Kombination aus technologischen Gründen ausgeschlossen ist. Hier sind immer die Empfehlungen der Prospekte und technischen Datenblätter zu beachten.

Unbedingt zu warnen ist vor der Verwendung anderer als der empfohlenen Klebstoffe. DMS-Klebstoffe haben andere Anforderungen zu erfüllen als reine Verbindungsklebstoffe. Deshalb gehen sie in der Regel aus Spezialentwicklungen hervor oder sind zumindest Modifikationen handelsüblicher Klebstoffe. Dass ein DMS fest klebt ist allein noch kein ausreichendes Kriterium zur Beurteilung seiner Eignung als Klebstoff für Messzwecke.

Hinsichtlich der Anwendungstechnik unterscheidet man

- kalthärtende Klebstoffe
  - heißhärtende Klebstoffe
  - keramische Kitte
  - flammgespritzte Keramik
  - Punktschweißverbindungen.
- Kalthärtende Klebstoffe lassen sich leicht und mit geringem Aufwand anwenden. Man unterscheidet Einkomponenten-Klebstoffe, die z. B. durch Luftabschluss („anaerob“) zu reagieren beginnen, und Zweikomponenten-Klebstoffe, die vor der Anwendung gemischt werden müssen. Bei kurzen Reaktionszeiten spricht man auch von „Schnellklebstoffen“. Ihr bevorzugtes Anwendungsgebiet ist die experimentelle Spannungsanalyse und verwandte Gebiete.
  - Heißhärtende Klebstoffe sind nur dort anzuwenden, wo das Messobjekt auf die geforderte Härtungstemperatur gebracht werden kann. Das ist im allgemeinen beim Messgrößenaufnehmerbau möglich, aber auch vielfach dort,

wo Maschinenteile u. dgl. vor ihrem Einbau appliziert bzw. zur Applikation ausgebaut werden können. Gegenüber den kalthärtenden Klebstoffen bieten die heißhärtenden einen weiteren Anwendungsbereich in Richtung höherer Temperatur und eignen sich, in Verbindung mit Präzisions-DMS, zur Befriedigung der im Messgrößenaufnehmerbau üblicherweise höheren Genauigkeitsansprüche. Auch heißhärtende Klebstoffe sind als Ein- und Zweikomponenten-Versionen im Gebrauch.

- Keramische Kitte sind nur in Verbindung mit Spezial-DMS (sogenannten Freigitter-DMS) anwendbar. Ihr bevorzugter Einsatz liegt im Hochtemperaturbereich, gelegentlich auch im kryogenen Temperaturbereich. Keramische Kitte verlangen mehr oder weniger hohe Einbrenntemperaturen, wodurch ihr Einsatz eingeschränkt wird. Starke Hygroskopizität führt im Bereich oberhalb des Gefrierpunktes bis unterhalb der Wasserverdampfungstemperatur zu Nullpunktproblemen der Messstelle und erfordert wirksame Schutzmaßnahmen.
- Flamspritzkeramik verlangt die gleichen Spezial-DMS wie die keramischen Kitte und zusätzlich eine spezielle Anlage. Der Anwendungsbereich ist ähnlich dem der keramischen Kitte. Als besonderer Vorteil des Verfahrens ist zu erwähnen, dass sich das Messobjekt während der Applikation nur mäßig erwärmt. Das hygroskopische Verhalten flammgespritzter Applikationen gleicht dem der keramischen Kitte. Gegenüber Kernstrahlung zeigen Flamspritzapplikationen günstige Eigenschaften.
- Das Punktschweißen ist eines der einfachsten Applikationsverfahren. Es erfordert nur geringen apparativen Aufwand (ein kleines Schweißgerät), geringe Vorbereitungen und wenig Übung. Dass es trotzdem nur selten angewandt wird, hat folgende Gründe:

Man benötigt Spezial-DMS, die nur in geringer Typenzahl angeboten

Anschweißbare DMS können nicht an gekrümmte Flächen appliziert werden. Sie können auch nicht beliebig klein hergestellt werden, wodurch sich eine weitere Beschränkung des Anwendungsbereichs ergibt.

Das Messobjekt muss aus einem schweißbaren Werkstoff bestehen. An manchen Objekten wird trotz gegebener Schweißbarkeit die Anwendung abgelehnt wegen der Gefahr der Mikrokorrosion, z. B. bei hochbeanspruchten Teilen von Dampfkesseln, bei austenitischen Stählen u. dgl. Das Messobjekt muss so kräftig (dick) sein, dass die Spannungsverteilung in ihm nicht infolge der relativ großen Rückstellkraft des DMS verändert wird, d. h. es darf keine merkliche Dehnungsbehinderung eintreten.

## 4.2 Applikations-Hilfsmittel

### 4.2.1 Reinigungsmittel

Zur Vorbereitung einer Applikation sind verschiedene Maßnahmen erforderlich.

Zur Grobreinigung stark verschmutzter Teile eignen sich mechanische Reinigungsverfahren und handelsübliche Haushalts-Reinigungsmittel.

Zur Feinreinigung dienen vorzugsweise organische Lösungsmittel. In der Tafel 4.2-1 sind einige gebräuchliche Mittel verzeichnet, zusammen mit den Zahlen für die maximal am Arbeitsplatz zulässige Konzentration (MAK-Zahl). Die Vermerke „leicht entzündlich“ und „gesundheitsschädlich“ sind aus der „Verordnung über gefährliche Arbeitsstoffe“, Bundesgesetzblatt I S. 2493 vom 8. 9. 1975, übernommen und sollen auf die zu ergreifenden Sicherheitsmaßnahmen hinweisen.

allgemeine Bezeichnung od. Handelsname	andere chemische Bezeichnung	chem. Formel [Summenformel]	MAK-Zahlen		Bemerkungen
			ppm	$\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$	
Methyl-Ethyl- Keton	Butanon-(2)	$\text{CH}_3 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{CO} \cdot \text{CH}_3$ [ $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$ ]	200	590	leicht entzündlich
Aceton	Aceton	$\text{CH}_3 \cdot \text{CO} \cdot \text{CH}_3$ [ $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$ ]	1000	2400	leicht entzündlich
Isopropylalkohol	Isopropanol	$\text{CH}_3 \cdot \text{CH}(\text{OH}) \cdot \text{CH}_3$ [ $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$ ]	400	980	leicht entzündlich
Ethylalkohol	Ethanol	$\text{CH}_3 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{OH}$ [ $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ]	1000	1900	leicht entzündlich
Ethylacetat	Essigsäure- ethylester	$\text{CH}_3 \cdot \text{CO}_2\text{C}_2\text{H}_5$ [ $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ ]	400	1400	leicht entzündlich
Toluol	Methylbenzol	$\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{CH}_3$ [ $\text{C}_7\text{H}_8$ ]	200	750	gesundheitsschädlich; leicht entzündlich
Reinbenzin	–	–	*	*	leicht entzündlich; *keine offizielle Werte erhältlich

**Tafel 4.2-1: Gebräuchliche Lösemittel zur Reinigung und Entfettung vom DMS-Klebestellen.**

Einige dieser Lösungsmittel werden „technisch rein“ und „chemisch rein“ angeboten. Technisch rein bedeutet: frei von festen Verunreinigungen. Chemisch rein, auch durch den Zusatz „pro analysi“ oder „p. a.“ oder „reinst“ gekennzeichnet, bedeutet: frei auch von löslichen Verunreinigungen im Rahmen der technischen Möglichkeiten. Trotz des höheren Preises der chemisch reinen Lösungsmittel sind nur diese zur Reinigung von DMS-Klebestellen zu verwenden. Bei der Anwendung ist peinlichst darauf zu achten, dass sie nicht durch Unachtsamkeit verunreinigt und damit unbrauchbar gemacht werden.

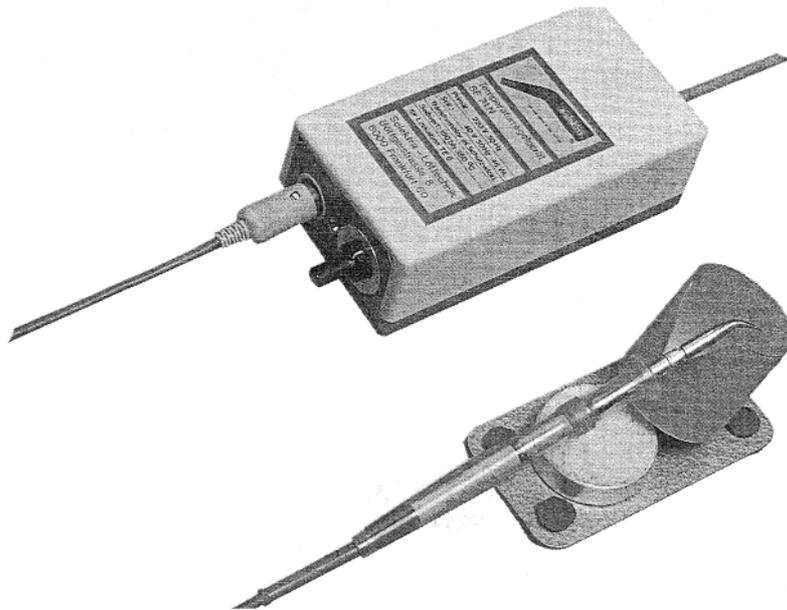
## 4.2.2 Lötmittel

### 4.2.2.1 Lötgerät

Die beste und überwiegend angewandte Art der elektrischen Verbindung zwischen DMS und Messleitung (Messkabel) ist das Löten. Ebenfalls hervorragende Verbindungen erhält man mit der Crimp-Technik (Quetschverbindungen). Klemmverbindungen können infolge veränderlicher Übergangswiderstände Nullpunktwanderungen auslösen. Steckverbindungen sind noch kritischer; hier haben sich nur erstklassige Qualitäten mit vergoldeten Kontaktelementen als ausreichend erwiesen, solange deren einwandfreie Funktion nicht durch Verschmutzung gestört wird. Grundsätzlich ist zu sagen, dass normale Starkstromverbindungen gerade wegen der niedrigen Messspannung und -ströme unzureichend sind.

Die Anforderung der Elektronik-Industrie führten zu ausgezeichneten LötKolben-Konstruktionen, von denen die DMS-Anwender vorteilhaften Gebrauch machen sollten. Zu empfehlen sind temperaturgeregelte NiederspannungslötKolben, die über ein Regelgerät aus dem Netz gespeist werden. Modelle mit feinfühler, stufenloser elektronischer Regelung und hoher Heizleistung (ca. 50 W) verdienen den Vorzug, weil Wärmeentzug an der Lötspitze während des Lötens sofort ausgeglichen wird. Der Temperatur-Bereich liegt bei handelsüblichen Lötstationen zwischen 120 und 400°C; er reicht aus für alle in der DMS-Technik benutzten Weichlote.

Entscheidend für die Herstellung zuverlässiger Lötstellen ist die Wahl der für den jeweiligen Anwendungsbereich richtigen Lötspitze. Die Bezeichnung „Lötspitze“ darf nicht zu wörtlich genommen werden, denn ein bleistiftähnlich angespitzter Loteinsatz ist ungeeignet, weil der Wärmefluss vom Einsatz zur Lötstelle ungenügend ist und weil sich das Lot von der Spitze weg nach oben zieht und deshalb an der Lötstelle fehlt. Eine kleine Fläche, in ihrer Größe dem Lötobjekt angemessen, ist richtig. Ob gerade oder gebogene LötKolbeneinsätze günstiger sind, hängt allein von der Zugänglichkeit der Lötstelle ab.



**Bild 4.2-1: Regelbare Lötstation**

Vergütete Lötspitzen nehmen nur an ganz bestimmten Stellen das Lot an, wodurch es auf die zum Löten benutzte Stelle konzentriert bleibt. Die Vergütung verhindert außerdem das Oxydieren des Einsatzes.

#### 4.2.2.2 Lote und Flussmittel

Es werden zahllose Weichlote angeboten. Je nach Legierungsbestandteilen und Komposition erfüllen sie gewisse Anforderungen optimal. In der DMS-Technik sind gute Benetzungs- und Fließeigenschaften geschätzt sowie eine den Einsatzbedingungen angemessene Schmelztemperatur. Die Gebrauchstemperatur sollte mit Rücksicht auf die mechanische Festigkeit der Lötverbindung mit eutektischen Lotlegierungen nicht höher als ca. 30 K unterhalb des Lotschmelzpunktes ansteigen.

Kleine Zusätze von Kupfer verhindern das lästige Anfressen der Lötspitze („Kupferschutzlot“). Bei dynamischer Dauerbelastung sind Lote mit hoher Ermüdungsbeständigkeit vorteilhaft. In der Tafel 4.2-2 sind einige gebräuchliche Weichlote verzeichnet. Weitere Informationen liefern DIN 1707 und die Listen der Lothersteller. Im Hochtemperaturbereich wende man möglichst Schweißverbindungen an. Hartlötungen sind wegen der aggressiven Flussmittel mit Vorsicht anzuwenden!

Flussmittel haben die Aufgabe, Lötstellen von Oxyd zu befreien und während des Lötvorgangs das erneute Oxydieren zu verhindern. Sie schaffen damit die

Lotbezeichnung	Legierungsbestandteile %					Schmelzbereich °C	empfohlene Lötspitzentemperatur °C	Bemerkungen
	Sn	Pb	Cu	Ag	In			
Röhrenlot DIN 8516 L-Sn 60 Pb Cu2/F-SW 32 (C3) 3.5; Ø 1 mm	60	38	2			183 ... 190	230	Bestell-Nr. 1-LOT Harzkern aus reinem Kolophonium, korrosionsfrei
Doduco-Ceramin- Weichlot CN 306 Ø 0,8 mm, massiv	1	97,5		1,5		304 ... 310	360	AMI GmbH Doduco Im Altgefäll 12 75181 Pforzheim warmfestes Lot
Blei-Indium-Lot 50/50 Ø 0,5 mm, massiv		50			50	190 ... 210	250	Gute Ermüdungsbe- ständigkeit, empfohlen bei dynam. Dauer- belastung vorwiegend für DMS der Serien LY41, LY43. Enthalten im Weichlot-Set WL 521 Bestell-Nr.: 214.04-2009

**Tafel 4.2-2: Weichlote (Beispiele)**

Voraussetzung für eine einwandfreie Verbindung des Lotes mit den Lötteilen. Die Auswahl des Flussmittels muss nach Art des Lötens (z. B. Weichlöten), der Art der zu verlötenden Werkstoffe (z.B. Schwermetalle) und der Art des Lötobjektes (z. B. elektrische Schaltungen) getroffen werden.

Stark beizende Flussmittel sind zwar bequem, weil auch an schlecht gereinigten Lötstellen gelötet werden kann; ihr Nachteil liegt darin, dass Rückstände unweigerlich Korrosion hervorrufen und das elektrische Isoliervermögen der Isolierstrecke empfindlich herabsetzen. Sie sind deshalb für Lötungen an elektrischen Schaltungen ungeeignet. Auf keinen Fall Löt fett verwenden!

Nicht korrodierende Flussmittel werden auf der Basis natürlich oder modifizierter natürlicher Harze hergestellt. Das bekannteste davon ist Kolophonium. Es wird in Röhrenloten als Flussmittelseele oder in Spiritus gelöst als Flüssigkeit angewandt. Diese „sanften“ Flussmittel verlangen gründliches Säubern und Blankmachen der Lötstelle unmittelbar vor dem Löten. Sie sind für die DMS-Technik sehr gut geeignet.

Anmerkung:

Die in vielen Röhrenloten enthaltene Flussmittelseele kann sowohl aus korrodierendem als auch aus nichtkorrodierendem Flussmittel bestehen. Vor der Anwendung sollte man sich unbedingt über die Art des Flussmittels Gewissheit verschaffen: Über die verschiedenen Flussmittel informiert das Norm-

blatt „DIN 8511: Flussmittel zum Löten metallischer Werkstoffe“.

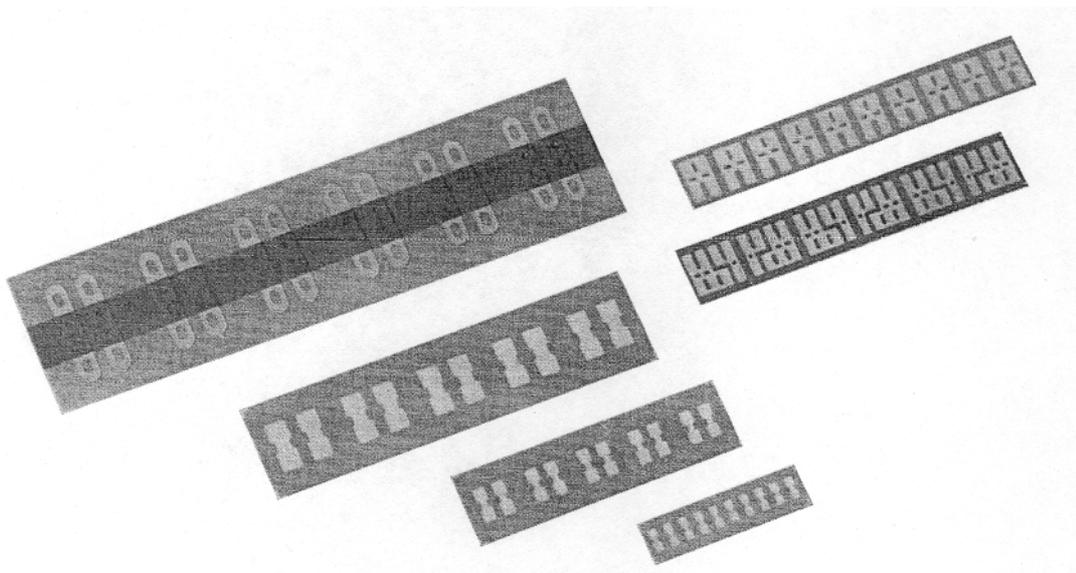
Blatt 2 behandelt Flussmittel zum Weichlöten von Schwermetallen.

Flussmittel mit dem Typ-Kurzzeichen F-SW 31 und F-SW 32 hinterlassen keine korrodierenden Rückstände. Die Benennung „säurefreies Flussmittel“ ist unsachlich und irreführend. Sie darf deshalb gemäß DIN 8511 nicht angewandt werden.

### 4.2.3 Anschlussmittel

#### 4.2.3.1 Lötstützpunkte

Lötstützpunkte haben die Aufgabe, einen festen Ankerpunkt zwischen DMS und Kabel zu schaffen. Sie werden in verschiedenen Ausführungen und Größen hergestellt. Das Bild 4.2-2 zeigt einige typische Ausführungen als Beispiel.



**Bild 4.2-2: Einige Formen von Lötstützpunkten (Werkbild HBM)**

Die Lötstützpunkte werden unmittelbar beim DMS angebracht, meist durch Ankleben (das zweckmäßigerweise gemeinsam mit dem Ankleben des DMS geschieht), bei speziellen, für den Hochtemperatur-Bereich vorgesehenen Ausführungen durch Punktschweißen. Einzelheiten über Formen, technische Daten und Anwendung entnehme man den Unterlagen der Hersteller und [4-1].

#### 4.2.3.2 Leitungsmaterial

Der Erfolg der Messung hängt auch von der Auswahl der richtigen, d. h. für den speziellen Fall geeigneten Verbindungsleitungen und Messkabel ab. Sie sollten nicht nur die Messsignale zwischen den Gliedern der Messkette (Aufnehmer - Anpasser - Ausgeber) übertragen, sie sollen auch Störsignale auf ein vertretbares Minimum beschränken und den Beanspruchungen aus Betrieb und Umgebung widerstehen.

Kurze Verbindungen, z. B. die interne Verschaltung innerhalb eines Aufnehmers, können durch Schaltdraht oder Schallitze mit relativ dünnem Querschnitt erfolgen. Die Aderisolation muss gut sein und die auftretenden Temperaturen ertragen können. Gute Lötbarkeit der Adern ist außerdem erwünscht. Bei extremer dynamischer Beanspruchung des Messobjektes kann sogenannte „Schwinglitze“ vorteilhaft sein. Bei ihr besteht eine Ader aus vielen sehr dünnen Litzen, die eine flexible Isolation umgibt.

Zusätzliche Anforderungen sind bei längeren Verbindungen und Kabeln zu erfüllen. Hier gilt es, durch richtige Wahl des Leiterquerschnitts den ohmschen Widerstand in akzeptablen Grenzen zu halten. Bei Trägerfrequenzbetrieb empfiehlt sich kapazitätsarmes Kabel, ebenfalls bei Gleichspannungsbetrieb, wenn Signale hoher Frequenz zu übertragen sind. Ein die Adern umhüllendes Kupfergeflecht hilft, die Kapazität der Adern untereinander zu symmetrieren und schützt gegen störende Einstreuungen durch elektrische Felder (elektrische Abschirmung). Zur Abschirmung magnetischer Felder verlege man die Kabel in Stahlpanzerrohr o. dgl. (s. Abschnitte 7.2 und 7.4).

Elektrostatische Beeinflussungen entstehen, wenn das elektrische Feld einer Spannungsquelle kapazitiv auf den Messkreis einwirkt. Der beste Schutz dagegen ist, das Kabel oder die Leitung mit einem geschlossenen Schirm zu umgeben. Üblich ist ein Kupferdrahtgeflecht ausreichender Bedeckung. Spezial-Messkabel enthalten einen solchen Schirm. Die Erdung des Schirms ist wichtig, da ein auf freiem Potential liegender Schirm keinerlei Wirkung hat.

Elektromagnetische Beeinflussungen entstehen, wenn Kabel des Messkreises in der Nähe stromdurchflossener Leiter oder elektrischer Anlagen (z. B. Generatoren, Schweißgeräten, Transformatoren, Motoren usw.) verlegt sind. Nach dem Transformator-Prinzip werden in der Messleitung störende elektrische Spannungen induziert. Ein wirksamer Schutz ist das Verdrillen der Adern (bei fertigen Kabeln sind die Adern verdrillt). Wo dies nicht ausreicht, hilft eine zusätzliche Abschirmung durch Stahlpanzerrohr oder Gas-(Wasser-)Rohr.

Das Trägerfrequenz-Verfahren (s. Abschnitt 5.3) ist gegen Störeinstreuungen weit weniger empfindlich als das Gleichspannungsverfahren, weil bei ersterem alle Störfrequenzen außerhalb des Übertragungsbandes verfahrensbedingt eliminiert werden.

Werkstoff-Name Kriterium	PVC Polyvinylchlorid	PE Polyethylen (niedere Dichte)	PTFE Polytetrafluor- äthylen (Teflon®)	PUR Polyurethan	SiR Silikonkautschuk	PA Polyamid	Pi Polyimid	Glasfaser- umspinnung	Glasfaserschlauch	Steatitperlen
Temperatur beständigkeit °C dauernd kurzzeitig	-50...80 ...90	-80... 80 ...100	-100...260 -269...300	-60... 90 ...100	-80...105 ...250	-55...105 ...125	-269...275 ...400	-269...280 ...480	-269...400 ...600	> 600
spez. Durchgangs- widerstand bei 20 °C Ω cm	10 <sup>14</sup> ...10 <sup>15</sup>	10 <sup>16</sup>	> 10 <sup>18</sup>	10 <sup>11</sup> ...10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup> ...10 <sup>15</sup>	10 <sup>12</sup> ...10 <sup>13</sup>	10 <sup>14</sup> ...10 <sup>16</sup>	-	-	
Abriebfestigkeit	mittel	mittel	mäßig	sehr gut	mäßig	sehr gut	sehr gut	mäßig	mäßig	sehr gut
Brennbarkeit <sup>1)</sup>	sv	ef	nef	sv	sv	sef	sv	nef	nef	nef
Beständigkeit gegen verd. Säuren und Laugen Öl Lösungsmittel	gut mäßig meist unbeständig	sehr gut gut	2) sehr gut sehr gut sehr gut	wenig gut unbest.	3) gut unbest. bedingt beständig	S: unbest. L: gut gut gut	S: sehr gut L: mäßig gut meist beständig	gut sehr gut sehr gut	gut sehr gut sehr gut	sehr gut sehr gut sehr gut
Wasseraufnahme %	1... 2	0	0	1,4	0,1... 0,4	2 ... 10	1... 3	-	-	-

1)

sv = selbstverlöschend

ef = entflammbar

sef = schwer entflammbar

nef = nicht entflammbar

2)

gegen geschmolzenes

Alkali. und Fluor unbeständig

3)

in Dampf ab 130 °C unbeständig

Tafel 4.2-3: Die wichtigsten Kabel-(Leitungs-)Isolierstoffe und einige ihrer technischen Daten.

Wichtig ist ein hoher Isolationswert der Aderisolation, der sich auch durch Temperatur, Feuchtigkeit und dgl. nicht wesentlich ändern darf. Beim Anschluss von Halb- und Vollbrückenschaltungen kommt es darauf an, dass die Symmetrie benachbarter Brückenweige erhalten bleibt, und zwar sowohl hinsichtlich des Widerstandes als auch der Kabelkapazität zwischen den Adern (s. Abschnitte 7.2 bis 7.4). Der Kabelmantel soll gegen äußere Einwirkungen schützen und beständig sein gegen Feuchtigkeit, Wasser, Öl, Chemikalien, Temperatur (hohe und niedrige) sowie mechanische Beanspruchungen. Handelsübliche Messkabel werden zwar vielen Anforderungen gerecht; ein Kabel, das alles kann, gibt es leider nicht.

In Tafel 4.2-3 sind die wichtigsten Isoliermaterialien und einige Hinweise auf ihre Eigenschaften verzeichnet.

#### 4.2.4 Prüfmittel

Jede DMS-Applikation und jede DMS-Messstelle ist vor einer Messung auf ihren einwandfreien Zustand zu überprüfen. Es sind optische (visuelle) und elektrische Prüfungen durchzuführen.

##### 4.2.4.1 Visuelle Inspektion

Als Prüfmittel genügt eine gute, ca. 6fach vergrößernde Lupe. Damit können Mängel der DMS-Klebung gefunden werden, wie z. B.

- Luftblasen unter dem DMS,
- schlecht geklebte Ränder,
- unzuverlässige Lötverbindungen,
- Flussmittelreste und
- Orientierungsfehler.

Diese Inspektion kann durch einen sogenannten „Radiergummitest“ ergänzt werden [4-1].

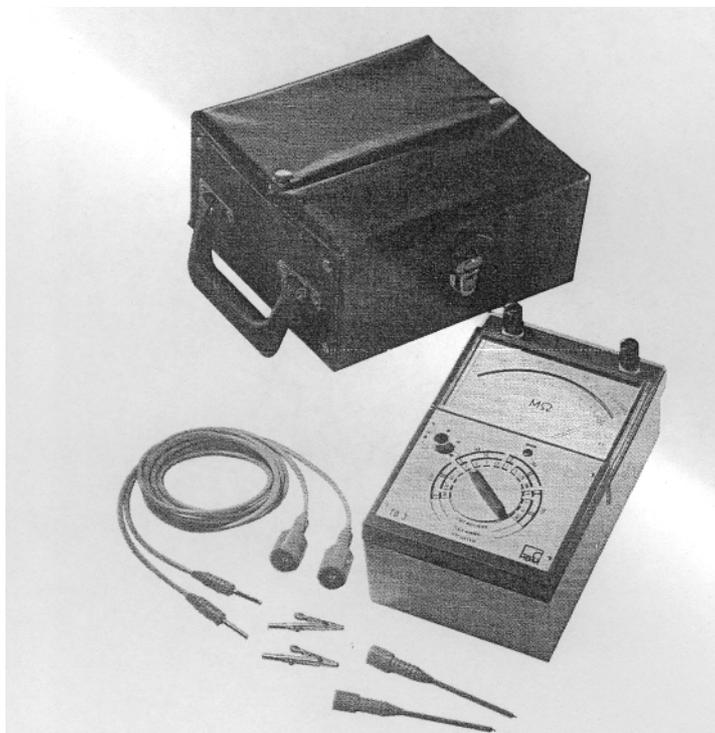
##### 4.2.4.2 Durchgangswiderstand

Dazu genügt ein gutes Ohmmeter, mit dem der DMS-Widerstand mit einer Unsicherheit  $< 0,25\%$  gemessen werden kann. Die Prüfung soll zeigen, ob sich der DMS-Widerstand infolge unsachgemäßer Applikation geändert hat. Ohmmeter mit einer Auflösung auf  $0,1\ \Omega$  sind außerdem geeignet, die DMS vor der Applikation auf übereinstimmenden Widerstand auszusuchen, eine Maßnahme, die im Messgrößen-Aufnehmerbau empfohlen wird, um eine gute Symmetrie der Brückenschaltung zu erhalten.

Der Widerstand der DMS-Anschlusskabel bewirkt bei den üblichen Messsystemen mit Konstantspannungs-Speisung eine scheinbare Empfindlichkeitsminderung des DMS. Deshalb ist er zu messen und zur Korrektur des Messwertes zu verwenden (s. Abschnitt 7.2). Der Kabelwiderstand wird von Geräten, die nach der „Kreuzerschaltung“ arbeiten (für Voll- und Halbbrückenschaltungen) oder nach der „erweiterten Kreuzerschaltung“ (für Viertel-, Halb- und Vollbrückenschaltung) automatisch kompensiert, weshalb eine Korrektur nicht notwendig ist (s. Abschn. 7.3).

#### 4.2.4.3 Isolationswiderstand

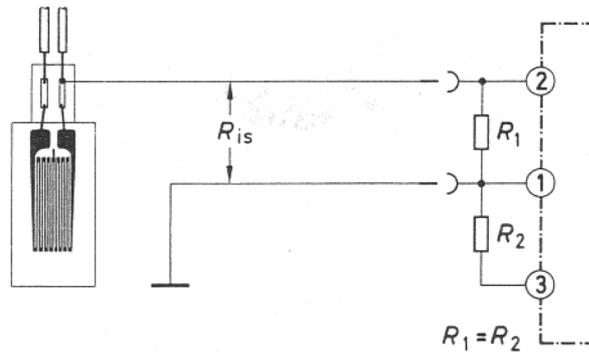
Zur Messung der Isolationswiderstände zwischen DMS und Messobjekt sowie zwischen den einzelnen Kabeladern und zwischen den Kabeladern und der Abschirmung sind Geräte mit einer Prüfspannung nicht über 50 Volt und mit einem Messbereich bis zu 20000 M $\Omega$  oder mehr geeignet. Kurbelinduktoren sind ungeeignet.



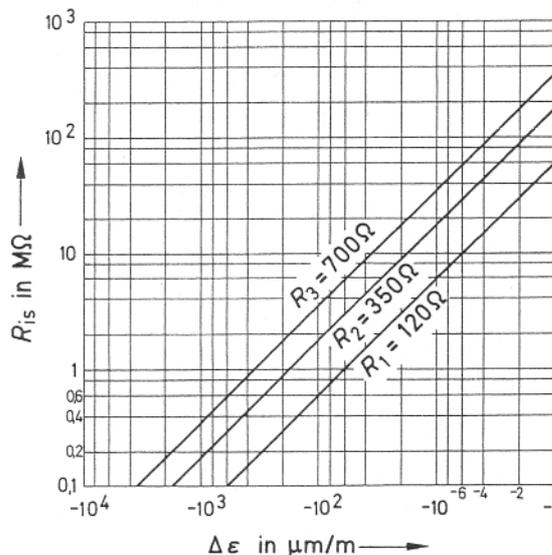
**Bild 4.2-3: Taschenohmmeter TO 3 zur Messung des Durchgangs- und des Isolationswiderstandes applizierter DMS**

Unter gewissen Bedingungen zeigt sich eine Abhängigkeit des Isolationswiderstandes von der Art der Prüfspannung, ob Gleich- oder Wechselspannung und deren Frequenz. Schließlich hat auch die Höhe der angelegten Spannung und die Temperatur des zu messenden Isolators einen Einfluss. So treten besonders

bei höheren Temperaturen in keramischen Bindemitteln Ionenwanderungen auf, welche die Messung verfälschen [4-4]. Aber auch andere Isolierstoffe sind davon betroffen. Es gibt eine einfache Methode, den Isolationswiderstand der DMS unter den Bedingungen der Dehnungsmessung zu ermitteln: Man verwendet dazu den Messverstärker selbst. Das Verfahren ist sozusagen die Umkehrung der im Abschn. 6.3 beschriebenen Nebenschlusskalibrierung. Man schaltet den zu messenden Isolationswiderstand einer separaten Brücken- (oder Halbbrücken-)schaltung parallel und beobachtet die Dehnungsanzeige; sie ist ein Maß für den Isolationswiderstand.



**Bild 4.2-4: Schaltung zur Messung des Isolationswiderstandes von DMS mit einem Messverstärker. Die Hilfsschaltung  $R_1, R_2$  kann auch als Vollbrücke ausgebildet sein.**



**Bild 4.2-5: Diagramm zur Ermittlung des Isolationswiderstandes einer DMS-Applikation. Erläuterung im Text.**

Das Bild 4.2-4 zeigt die anzuwendende Schaltung. Die mit dem Isolationswiderstand  $R_{is}$  zu verstimmende Hilfsschaltung (im Bild eine Halbbrückenschaltung  $R_1, R_2$ ) kann aus DMS bestehen oder aus stabilen Widerständen.

Zur einfachen Ermittlung des Isolationswiderstandes dient das Diagramm Bild 4.2-5. In ihm sind die Widerstandswerte handelsüblicher DMS als Parameter eingetragen. Dem Diagramm liegt die Gl. (6.3-9a) und ein k-Faktor von  $k = 2$  zugrunde. Auf der  $\Delta\varepsilon$ -Skala suche man den gemessenen Dehnungswert auf, fahre senkrecht bis zum Schnittpunkt mit dem zutreffenden Parameter und von dort nach rechts bis zur  $R_{is}$ -Skala, auf welcher der Isolationswiderstand in  $M\Omega$  abzulesen ist.

### 4.3 Mittel zum Messstellenschutz

DMS-Messstellen müssen gegen mechanische oder chemische Einwirkungen geschützt werden. Selbst unter idealen Bedingungen, z. B. im Laboratorium, werden die Eigenschaften der Messstelle im Laufe der Zeit beeinflusst, wenn nicht geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Ebenso unterschiedlich, wie die Einwirkungen auf die Messstelle, sind die Maßnahmen zu ihrer Abwehr. Im Labor bei gleichmäßig trockener Luft genügt schon ein leichter Schutz gegen Berührung (Handschweiß), während sich im rauen Walzwerkbetrieb der Schutz auf Dampf, Wasser, Öl, Hitze und mechanische Einwirkungen erstrecken muss. Im ersten Fall reicht ein einfacher Lacküberzug, im zweiten Fall muss man aus mehreren Schichten verschiedener Schutzstoffe eine Barriere aufbauen.

Man sollte sich jedoch darüber klar sein, dass ein absoluter Schutz über unbegrenzte Zeit nur durch eine hermetisch dichte metallische Kapselung möglich ist. Diese Schutzart wird deshalb bei handelsüblichen Aufnehmern angewendet, soweit die Funktion es zulässt. Alle anderen Abdeckmittel, auch die allerbesten, gewähren nur einen temporären Schutz. Die Schutzdauer hängt dabei sowohl von der Art des Abdeckmittels und seiner Schichtdicke als auch von der Art des einwirkenden Mediums ab. Die Zeitspannen der Schutzdauer reichen dabei von Stunden bis zu mehreren Jahren, je nach den Gegebenheiten. Welche Schutzdauer notwendig ist, hängt nicht allein von der zu fordernden Lebensdauer der Messstelle ab, sondern auch von der Dauer der einzelnen Messungen, der Möglichkeit von zwischenzeitlichen Kontrollen des Nullpunktes und des Isolationswiderstandes und schließlich noch von den Genauigkeitsforderungen.

Leichte Beeinträchtigungen der Messstelle, z. B. durch Einwanderung von Feuchtigkeit infolge Diffusion, wirken sich in erster Linie in Veränderungen des Nullpunktes aus. Sind diese kontrollierbar, z. B. durch Entlasten des Messobjektes, und bewegen sie sich in akzeptablen Grenzen (z. B. 100 ... 200  $\mu\text{m}/\text{m}$ ), dann kann man weiterhin mit für spannungsanalytische Untersuchungen ausreichender Genauigkeit messen. Ein weiteres Indiz für die Brauchbarkeit einer Messstelle ist der Isolationswiderstand. Das Absinken des Isolationswiderstandes von 1000  $M\Omega$  auf 1  $M\Omega$  bewirkt bei einem 120  $\Omega$ -DMS eine Nullpunktverschiebung von -60  $\mu\text{m}/\text{m}$ , bei einem 350  $\Omega$ -DMS von -175  $\mu\text{m}/\text{m}$  und bei einem 700  $\Omega$ -DMS

von  $-350\mu\text{m}/\text{m}$ ! Das heißt, dass die untere Grenze des Isolationswiderstandes auch vom Messgitterwiderstand des verwendeten DMS abhängt.

Schwere Beeinträchtigungen der Messstelle entstehen durch die Diffusion ätzen der und leitender Stoffe sowie durch Korrosion. Korrosion wird enorm gefördert bei Anwendung von Gleichspannung zur Speisung der DMS! Dabei können sich, wie schon zu beobachten war, galvanische Elemente ausbilden, deren Spannung sich dem Messsignal überlagert und so große Messfehler verursacht. Schließlich darf nicht übersehen werden, dass die Anforderungen zum Schutz der Messstelle in gleichem Maß auch für die Zuleitungen, die Kabel, gelten.

Die Schutzmaßnahmen sollen wirksam sein, sie dürfen aber auch die Eigenschaften des Messobjektes nicht verändern. Dünne Objekte dürfen nicht so versteift werden, dass die Verformung behindert wird; Kunststoffe dürfen nicht durch lösungsmittelhaltige Stoffe angegriffen werden.

Für jeden Einzelfall eine konkrete Anweisung zu geben, ist nicht möglich. Die folgenden Hinweise sollten jedoch genügen, um für die überwiegend vorkommenden Probleme die jeweils richtige Maßnahme zu treffen.

Bei der **Auswahl** der Schutzstoffe sind zu beachten:

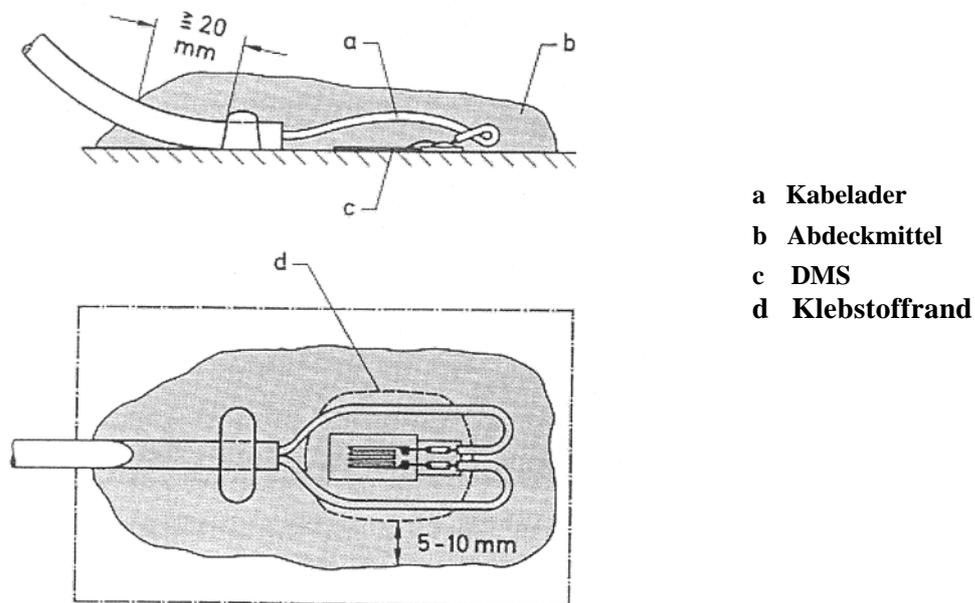
- Die Umgebungsbedingungen,
- die Dauer der Messung bzw. die geforderte Lebensdauer der Messstelle,
- die geforderte Messgenauigkeit,
- die evtl. unzulässige Versteifung des Messobjektes,
- der mit der Messstelle einschließlich dem Anschlusskabel in Kontakt kommende Stoff muss sehr hohen Isolationswiderstand besitzen und darf keine chemischen Reaktionen oder Korrosionen auslösen.

Für die **Anwendung** gilt:

- Die Messstelle muss vor dem Abdecken in einwandfreiem Zustand sein. Eingeschlossene Feuchtigkeit, Handschweiß, Flussmittelreste vom Löten u. dgl. sind Zeitzünder, die früher oder später zu Messfehlern oder gar zum Ausfall der Messstelle führen. Man bedenke, dass wirksame Abdeckmittel nicht nur äußere Feuchtigkeit abhalten, sondern auch innere Feuchtigkeit
- Die Messstelle ist unmittelbar nach der Applikation abzudecken.
- Ist die Applikation eines DMS in feuchter Umgebung unumgänglich (Termindruck, schlechtes Wetter, feuchte Räume), dann sollte das Messobjekt in einem Ofen ausgeheizt werden (Temperatur ca.  $110 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$  wenn möglich), oder - wo dies nicht anwendbar ist - die Messstelle mit einem Warmluftgebläse (Haartrockner o. dgl.) getrocknet werden.
- Das Abdeckmittel muss einwandfrei mit dem die Messstelle umgebenden Rand binden. Fehlstellen und Kapillaren (Kratzer, Rillen) sind Tore, durch

welche aggressive Medien einwandern können. Die Bindung des Abdeckmittels mit dem Rand muss während der gesamten Nutzungsdauer der Messstelle unverändert bestehen bleiben. Deshalb muss der Rand ebenso sorgfältig gereinigt sein, wie die Klebstelle und soll etwa 1 bis 2 cm über die äußeren Klebstoffränder hinausreichen. Handschweiß (Fingerabdrücke) kann dazu führen, dass trotz zunächst einwandfreier Bindung das Abdeckmittel unterrostet und damit wirkungslos wird.

- Kabeleinführungen sind mit größtmöglicher Sorgfalt abzudichten. Die Abdeckmittel müssen das Kabelende von allen Seiten einhüllen, also auch von unten, damit keine Kanäle oder Kapillaren entstehen, durch welche Feuchtigkeit ins Innere der Abdeckung vordringen kann. Bei mehradrigen Kabeln sind die Kabeladern einzeln in die Abdeckmasse einzubetten und ein Stück des Kabelmantels in die Abdeckung einzubeziehen. Das Bild 4.3-1 zeigt ein Beispiel.
- Bei handelsüblichen Abdeckmitteln für DMS-Messstellen sollten unbedingt die Verarbeitungsanweisungen befolgt werden.



**Bild 4.3-1: Beispiel für die Schutzabdeckung einer DMS-Messstelle**

#### Gebräuchliche Abdeckmittel

-Polyurethanlack PU 120

Lufttrocknender Lack. Geeignet für leichten Messstellenschutz gegen Berühren (Handschweiß) und Staub, normale Luftfeuchtigkeit und deren in den gemäßigten Zonen übliche Schwankungen (Laborbedingungen). Auch

gut geeignet als isolierende Schicht unter anderen Abdeckmitteln. Ölbeständig. Gute Abriebfestigkeit. Temperaturbeständigkeit - 30 ... +100 °C, kurzzeitig bis 120 °C.

- Nitrilkautschuklack NG 150

Lufttrocknender Lack, enthält Methyl-Aethyl-Keton als Lösungsmittel. Anwendungsbereich und Eigenschaften ähnlich PU 120. Beständig gegen Öl und Benzin, bevorzugte Anwendung bei Kontakt mit verflüssigten Gasen (nicht Sauerstoff!). Temperaturbeständigkeit - 269 ... +150 °C.

- Siliconharz SL 450

Transparenter Silikonharz, heißaushärtend. Vorzugsweise zum Schutz keramischer Kitten (Hochtemperatur-Applikationen) gegen Feuchtigkeitsabsorption und Verschmutzung. Temperaturbeständigkeit -50 ... +450 °C.

- AK 22, dauerplastischer Kitt

#### Vorteile:

Einfache Anwendung durch Aufkneten. Hervorragende Haftung infolge starker Eigenklebrigkeit. Sehr guter Schutz gegen Feuchtigkeit und Wasser; auch unter Wasser verwendbar, Schutz im Wasser von ca. 20 °C bis ca. 1 Jahr, im Wasser von 75 °C bis ca. 3 Wochen. Im Druckwasser bis 400 bar erprobt über einige Tage, Grenzwerte nicht bekannt. Sehr gute Witterungsbeständigkeit. Der Langzeitschutz kann erheblich verbessert werden durch Aufkneten einer Aluminiumfolie als Diffusionssperre. Mechanischer Schutz gegen Stoß und herabfallende Gegenstände läßt sich auf einfache Weise durch Andrücken einer Blechplatte auf den selbsthaftenden Kitt herstellen. Temperaturbeständigkeit in Luft - 50 ... +170 °C. Unbegrenzte Lagerfähigkeit.

#### Nachteile:

Unbeständig gegen Öl und Lösungsmittel. Bei hohen Fliehkräften am Außenumfang von Objekten nicht anwendbar.

- ABM 75, dauerplastischer Kitt mit Aluminiumfolie

- Anwendungsbereich und Eigenschaften ähnlich AK 22 mit folgenden Abweichungen:

Das plattenförmig vorliegende Material ist bereits mit einer 50 µm dicken Aluminiumfolie als Diffusionssperre kaschiert. Der Temperaturbereich reicht von - 200 ... +75 °C, wobei die Obergrenze durch beginnendes Fließen gesetzt wird.

- SG 250, transparenter, lösungsmittelfreier Siliconkautschuk

Geeignet zum Schutz gegen Feuchtigkeit und Bewitterung, gegen Wasser bei Raumtemperatur, bedingt beständig gegen Öl. Der gummiartige Überzug bietet sehr guten mechanischen Schutz. Temperaturbeständigkeit: -70 ... +180 °C, kurzzeitig bis 250 °C; in diesem Bereich bleibt das Material gummielastisch.

- Vaseline, ungebleicht

Vorteile:

Billig, leicht anwendbar; sehr guter Schutz gegen Feuchtigkeit und Wasser, auch unter Wasser anwendbar.

Nachteile:

Nicht anwendbar in strömendem Wasser und bei Regen oder Spritzwasser; wird an offenen Stellen leicht versehentlich abgewischt; schmilzt bei ca.

50 °C. - Polychlortrifluoräthylen-Fett (Handelsname: Halocarbon®)

Vorteile: Bei Temperaturen bis 200 °C anwendbar, sonstige Vor- und Nachteile wie Vaseline.

- Siliconfett

Vor der Anwendung von Siliconfett wird trotz guter Eigenschaften dringend abgeraten, weil es leicht auf Werkzeug und von dort auf andere Gegenstände übertragen wird. Infolge seiner hervorragenden Haftung lässt sich Siliconfett nur sehr schwer rückstandslos entfernen. Als excellentes Trennmittel verhindern schon geringste Spuren die einwandfreie Klebung von DMS.

- Mikrokristallines Wachs, Bienenwachs

Guter Schutz gegen Feuchtigkeit und allgemeine atmosphärische Einwirkungen. Muss in geschmolzenem Zustand auf erwärmtes Objekt aufgetragen werden, um einwandfreie Bindung zu erhalten. Geringer mechanischer Schutz. Temperaturbereich ca. -70 ... +100 °C.

- Polysulfid-Kautschuk

Zweikomponenten-Material, ergibt gummiartige Massen, die hervorragend lösungsmittel- und alterungsbeständig sind. Sie zeichnen sich ebenfalls durch gute Bewitterungsbeständigkeit aus. Temperaturbereich -50...+120 °C.

- Epoxidharz (Handelsname: Araldid®, UHU-plus® u. a.)

Für DMS-Abdeckungen eignen sich vor allem nicht zu harte Einstellungen. Das unter dem Handelsnamen UHU-plus erhältliche Material, ein Zweikomponenten-Harz, eignet sich vor allem als Schutz gegen Öl, Motorentreibstoff, verdünnte Säuren, verdünnte Laugen, viele Lösungsmittel und ergibt außerdem einen guten mechanischen Schutz. Temperaturgrenzen sind von den Härtingsbedingungen abhängig (Kalt- oder Heißhärtung).

- Aluminium-Klebstreifen

Mit Aluminiumfolie kaschierte Klebstreifen bilden eine gute Wasserdampfsperre (Diffusionssperre). Als zusätzliche Überdeckung der Messstelle sind sie geeignet, die Eigenschaften anderer Abdeckmittel zu verbessern, insbesondere deren Zeitstandverhalten. Die Aluminiumfolien eignen sich ebenfalls sehr gut als zusätzliche Schutzabdeckung für Messkabel, die in vielen Fällen das schwächste Glied innerhalb der Messstelle bilden.

- Flüssige Mittel des Messstellenschutzes

Manche Probleme des Messstellenschutzes lassen sich durch Anwendung

isolierender Flüssigkeiten lösen. Als Beispiel sei die Innenapplikation eines kleineren Gefäßes, das einer Druckprobe unterzogen werden soll, genannt. Wenn man anstatt der üblichen Druckflüssigkeit Wasser ein anderes Druckmedium anwenden kann, lösen sich viele Probleme auf einfachste Weise. Voraussetzung ist, dass das gewählte Druckmedium beste Isolationseigenschaften besitzt und frei ist von Zusätzen, welche den DMS angreifen. Hier bieten sich an:

Wasserfreies und säurefreies Öl,  
Paraffinöl,  
reines Petroleum.

Diese Art des Messstellenschutzes mit flüssigen Mitteln wurde auch schon erfolgreich zum Schutz von Dauermessstellen eingesetzt, bei welchen eine umgebende Kapsel mit dem Schutzmedium gefüllt wurde. In diesem Zusammenhang sei auch noch auf ein anderes, ausgezeichnetes Mittel hingewiesen: Polyisobutylene, dessen niedermolekulare Einstellungen wie Öl oder zäh wie Honig fließen (Handelsname: Oppanol® B 3, B 10 und B 15).

#### - Kombinierte Mittel

Nicht immer genügt ein Abdeckmittel allein für einen ausreichenden Messstellenschutz. Beispiele für kombinierten Einsatz mehrerer Mittel sind bereits bei AK 22 und bei ABM 75 gegeben (plastische Masse plus Aluminiumfolie). Will man der Metallfolie noch einen zusätzlichen Schutz geben, dann trage man z. B. Siliconkautschuk SG 250 zusätzlich auf.

Oftmals sind es mehrere unterschiedliche Medien, die auf einer Messstelle einwirken, z. B. Öl und Wasser. In solchem Falle sollte, als Beispiel, das öllösliche ABM 75 direkt auf den DMS aufgebracht werden, die Alu-Folie als Diffusionssperre ist die 2. Schicht und darüber wäre das ölbeständige Epoxidharz anzubringen.

Bei so undefinierbaren Medien wie z. B. Seewasser ist ein Mehrlagenschutz unbedingt notwendig. Als obere Schichten, die nicht mit dem DMS in Berührung kommen, können auch andere als die genannten Stoffe verwendet werden, z. B. Asphalt. Sie dürfen die darunterliegenden Schichten weder anlösen noch chemisch verändern, hinsichtlich ihres elektrischen Isolationswiderstandes werden jedoch keine Forderungen gestellt.

Das Problem des Messstellenschutzes ist so vielseitig, dass nur ein allgemeiner Überblick gegeben werden kann. In kritischen Fällen ist eine vorherige Untersuchung unter Einsatzbedingungen unbedingt zu empfehlen.

## 5 Die Wheatstone'sche Brückenschaltung

Sir Charles Wheatstone (1802 - 1875), ein englischer Naturwissenschaftler, berichtete im Jahre 1843 in [1-2] über eine Schaltung, mit deren Hilfe die genaue Messung elektrischer Widerstände möglich wurde. Diese Schaltung ist unter dem Namen „Wheatstone'sche Brückenschaltung“ (hier abgekürzt WB) bekannt geworden.

Die WB kann auf verschiedene Weise zur Messung elektrischer Widerstände benutzt werden:

- zur Bestimmung des Absolutwertes eines Widerstandes durch Vergleich mit einem Widerstand bekannter Größe,
- zur Bestimmung relativer Widerstandsänderungen.

In der DMS-Technik wird die zweite Anwendungsart benutzt. Sie erlaubt es, die sich meistens in der Größenordnung  $10^{-4}$  bis  $10^{-2} \Omega/\Omega$ , bewegenden relativen Widerstandsänderungen der DMS mit großer Genauigkeit zu messen. Die außerordentlich vielseitig anwendbare WB wird nachstehend ausschließlich unter dem Gesichtspunkt ihrer Anwendung in der DMS-Technik bekannt.

## 5.1 Das Schaltbild der Wheatstone'schen Brücke

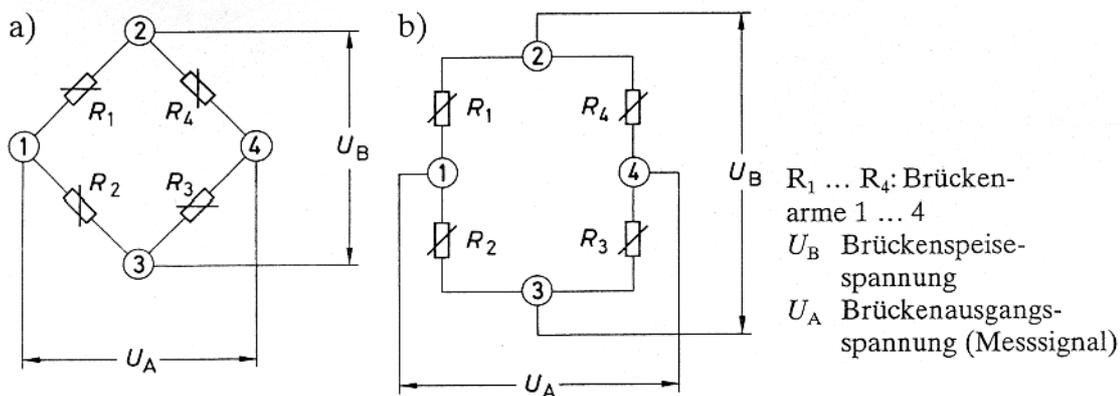
Das Bild 5.1-1 zeigt zwei verschiedene, jedoch elektrisch identische Darstellungen der WB: Bild 5.1-1a zeigt die übliche, auf Wheatstone zurückgehende rhombusartige Darstellung;

Bild 5.1-1b ist eine erfahrungsgemäß für Nichtelektriker leichter durchschaubare Darstellung der gleichen Schaltung.

Die vier Arme (oder Zweige) der Brückenschaltung werden durch die Widerstände  $R_1$  bis  $R_4$  gebildet. Die Brückeneckpunkte 2 und 3 bezeichnen die Anschlüsse für die Brückenspeisespannung  $U_B$ , an den Eckpunkten 1 und 4 steht die Brückenausgangsspannung  $U_A$  an, das Messsignal.

Die Brückenspeisung erfolgt überwiegend mit einer eingepprägten (stabilisierten) Gleich- oder Wechselspannung  $U_B$ . Gelegentlich wird auch die Stromspeisung angewandt, z. B. das Doppelstromverfahren.

Die Vorteile der spannungsgespeisten Brückenschaltung hinsichtlich ihrer automatischen Korrektur von Linearitätsabweichungen der DMS-Charakteristik



**Bild 5.1-1: Wheatstone'sche Brückenschaltung in unterschiedlicher Darstellungsweise**

(s. Abschnitt 3.3-6) ist in [5-1 bis 5-4] nachgewiesen und in [3-29] anhand eines Versuchs belegt. Ein weiterer Vorteil ist die Unempfindlichkeit gegenüber Toleranzen des DMS-Widerstandes. Die weiteren Ausführungen beschränken sich deshalb auf die spannungsgespeiste Brückenschaltung.

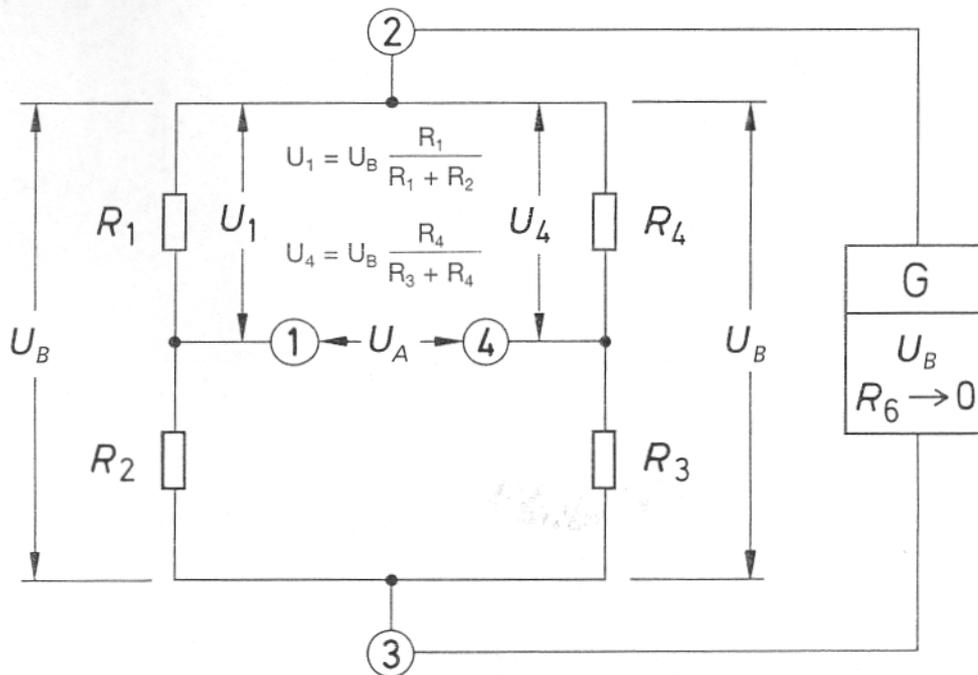
#### Hinweis:

Für die Bezeichnung der Brückenglieder und Anschlüsse gibt es leider keine allgemeingültige Regel. Die Bezeichnungen unterscheiden sich demzufolge in der Literatur in jeder denkbaren Art und Reihenfolge, was sich auch in den Brückengleichungen widerspiegelt: Es ist deshalb unbedingt notwendig, die in den Gleichungen verwendeten Bezeichnungen und Indizes im Zusammenhang mit der Lage der Brückenglieder innerhalb der Schaltung zu sehen, um Fehlinterpretationen zu vermeiden: In dieser Schrift werden einheitlich die im Bild 5.1-1 benutzten Bezeichnungen verwendet.

## 5.2 Die Wirkungsweise der Wheatstone'schen Brückenschaltung

Legt man an die beiden Brückenspeisepunkte 2 und 3 eine Brückenspeisungsspannung  $U_B$  an, dann teilt sich diese in den beiden Brückenhälften,  $R_1$ ,  $R_2$ , und  $R_4$ ,  $R_3$  jeweils im Verhältnis der Brückenwiderstände auf, d. h. jede Brückenhälfte bildet einen Spannungsteiler (s. Bild 5.2-1).

Die weiteren Betrachtungen zur Brückenschaltung gehen von der Voraussetzung aus, dass der Innenwiderstand  $R_6$  der Speisespannungsquelle vernachlässigbar klein und der Innenwiderstand des Gerätes zur Messung der Brückenausgangsspannung sehr hoch ist und keine störende Belastung der Brückenschaltung verursacht. Diese Betrachtungsweise ist vertretbar, weil die in der DMS-Praxis verwendeten Geräte diese Forderungen weitgehend erfüllen.



**Bild 52-1: Prinzip der Wheatstone'schen Brückenschaltung**

Die Brückenverstimung ist die Differenz der Spannungen, die sich an den Spannungsteilern bestehend aus  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$ ,  $R_4$  ergeben. Diese berechnet sich zu:

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

Für den

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (5.2-2)$$

ist die Brücke abgeglichen, die Brücken-Ausgangsspannung ist Null.

Bei einer vorgegebenen Dehnung ändert sich der Widerstand der DMS um den Betrag  $\Delta R$ . Dadurch ergibt sich:

$$U_A = U_B \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right) \quad (5.2-3)$$

Für DMS-Messungen muss gefordert werden, dass in der Wheatstone'schen Brücke die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  gleich sind. Gleiches gilt für  $R_3$  und  $R_4$ . Deshalb definiert man:

$$R_1 = R_2 = R_1 \quad (5.2-4)$$

und entsprechend:

$$R_3 = R_4 = R_3 \quad (5.2-5)$$

somit ergibt sich:

$$U_A = U_B \left( \frac{(R_1 + \Delta R_1) \cdot (2R_3 + \Delta R_3 + \Delta R_4) - (R_3 + \Delta R_4) \cdot (2R_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2)}{(2R_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2) \cdot (2R_3 + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \right) \quad (5.2-6)$$

Durch Ausmultiplizieren ergeben sich viele Ausdrücke der Termen  $\Delta R_x - \Delta R_y$ , die im Vergleich zu den anderen Termen sehr klein sind. Diese können deshalb vernachlässigt werden, da es sich um eine Addition handelt. Somit erhält man:

$$U_A = U_B \frac{R_1 (\Delta R_3 + \Delta R_4) - R_1 (\Delta R_1 + \Delta R_2) + 2R_3 \Delta R_1 - 2R_1 \Delta R_4}{4R_1 R_3 + 2R_1 \Delta R_3 + 2R_1 \Delta R_4 + 2R_3 \Delta R_1 + 2R_3 \Delta R_2} \quad (5.2-7)$$

Eine weitere Vereinfachung ergibt sich, wenn man den Nenner ( $4R_1 R_3 + \dots$ ) genauer betrachtet. Nehmen wir eine Vollbrücke aus 120  $\Omega$ -DMS an, die mit einer Dehnung von 10.000  $\mu\text{m}/\text{m}$  belastet wird, so ergibt sich:

$$4R_1 R_3 = 57600 \Omega^2 \quad (5.2-8)$$

hingegen sind die anderen Terme sehr klein:

$$2R_1 \Delta R_3 = 0,48 \Omega^2 \quad (5.2-9)$$

Ist der Widerstand der DMS größer oder die Dehnung geringer, wird der Unterschied noch größer. Aus diesem Grund dürfen wir unter dem Bruchstrich alle Terme mit Ausnahme von  $4R_1 R_3$  vernachlässigen.

Somit erhält man:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1 \Delta R_3}{4R_1 R_3} + \frac{R_1 \Delta R_4}{4R_1 R_3} - \frac{R_3 \Delta R_1}{4R_1 R_3} - \frac{R_3 \Delta R_2}{4R_1 R_3} + \frac{2R_3 \Delta R_1}{4R_1 R_3} - \frac{2R_1 \Delta R_4}{4R_1 R_3} \quad (5.2-10)$$

Durch kürzen:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{\Delta R_3}{4R_3} + \frac{\Delta R_4}{4R_3} - \frac{\Delta R_1}{4R_1} - \frac{\Delta R_2}{4R_1} + \frac{\Delta R_1}{2R_1} - \frac{\Delta R_4}{2R_3} \quad (5.2-11)$$

Im nächsten Rechenschritt wird Gleichung (11) zusammengefasst. Dabei ist zu beachten, dass die Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$  sowie  $R_3$ ,  $R_4$  gleich sein müssen.

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (5.2-12)$$

Als letzter Rechenschritt ist es notwendig, die Terme  $\Delta R/R$  durch die folgende, in der DMS-Technik wichtige Beziehung zu ersetzen:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (5.2-13)$$

Dabei ist  $k$  der  $k$ -Faktor der DMS,  $\varepsilon$  ist die Dehnung. Es ergibt sich:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (5.2-14)$$

Anzumerken ist, dass es für DMS-Messungen ausreichend ist, wenn die in Reihe geschalteten DMS gleich sind. Es ist also möglich, eine 120- $\Omega$ -Halbbrücke mit einer 350- $\Omega$ -Halbbrücke zu ergänzen.

Die Gln. (5.2-3) und (5.2-14) gehen davon aus, dass sich alle Widerstände der Wheatstone'schen Brücke ändern. Diese Gegebenheit findet man z. B. bei Messgrößenaufnehmern oder bei Messobjekten, die in ähnlicher Funktion eingesetzt werden. In der experimentellen Spannungsanalyse trifft dies kaum zu, dort ist meist nur ein Teil der Brückenarme mit DMS besetzt, der Rest wird durch Ergänzungswiderstände gebildet. Zur Unterscheidung sind Bezeichnungen wie Viertelbrücke, Halbbrücke, Zweiviertel- oder Diagonalbrücke und Vollbrücke üblich. Bild 5.2-2 zeigt die verschiedenen Formen.

An die Brückenergänzungswiderstände sind hohe Anforderungen hinsichtlich ihrer zeitlichen Stabilität und Temperatur-Unabhängigkeit zu stellen. Hochstabile Metallschichtwiderstände haben sich dafür bewährt. In manchen Messverstärkern sind solche Brückenergänzungen enthalten. Anstelle dieser passiven Widerstände können auch Kompensations-DMS als Brückenergänzungswiderstände benutzt werden. Die Bedingungen, die ein Kompensations-DMS erfüllen muss, sind in Abschnitt 7.1.3 beschrieben.

Wie die verschiedenen Brückenformen anzuwenden sind, wird in Abschnitt 8 erläutert.

Aus den Gln. (5.2-12 und 5.2-14) wird ersichtlich, dass die Widerstandsänderungen bzw. die sie verursachenden Dehnungen mit unterschiedlichem Vorzei-

chen an der Brückenverstimmung und damit am Messsignal teilhaben. Bei Anschluss eines für Dehnungsmessungen mit DMS konzipierten Messgerätes ergibt sich

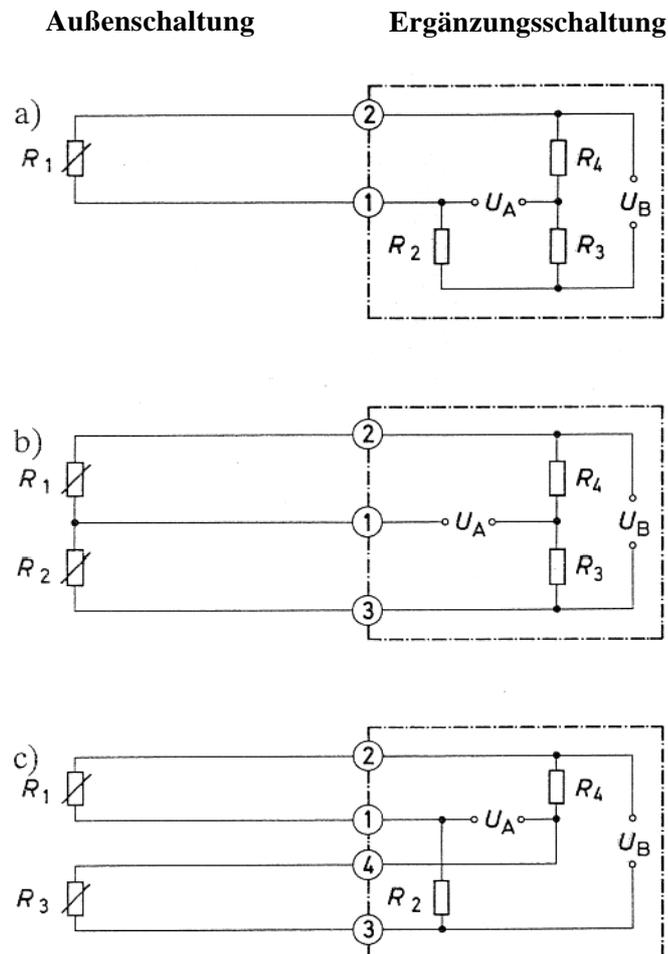
positive Anzeige, wenn  $\epsilon_1 > \epsilon_2$  und/oder  $\epsilon_3 > \epsilon_4$

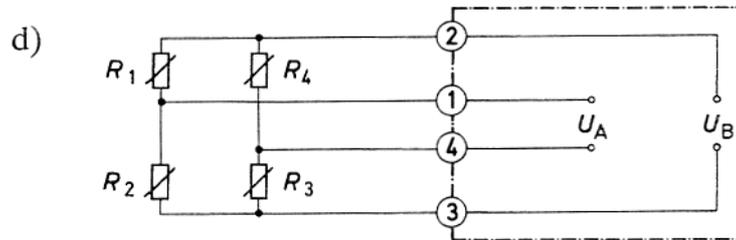
negative Anzeige, worin  $\epsilon_1 < \epsilon_2$  und/oder  $\epsilon_3 < \epsilon_4$

Anmerkung: Die Zeichen „größer als“ ( $>$ ) und „kleiner als“ ( $<$ ) gelten im algebraischen Sinne, nicht betragsmäßig!

Man beachte:

Die Änderungsbeträge der in der Schaltung benachbart liegenden DMS subtrahieren sich, wenn sie gleiches Vorzeichen haben; (Anwendungsbeispiel: Temperaturgangkompensation, Abschnitt 7.1);  
sie addieren sich, wenn die Vorzeichen verschieden sind; (Anwendungsbeispiel: Signalvergrößerung, z. B. bei Messgrößenaufnehmern u. dgl., Abschn. 8.4).

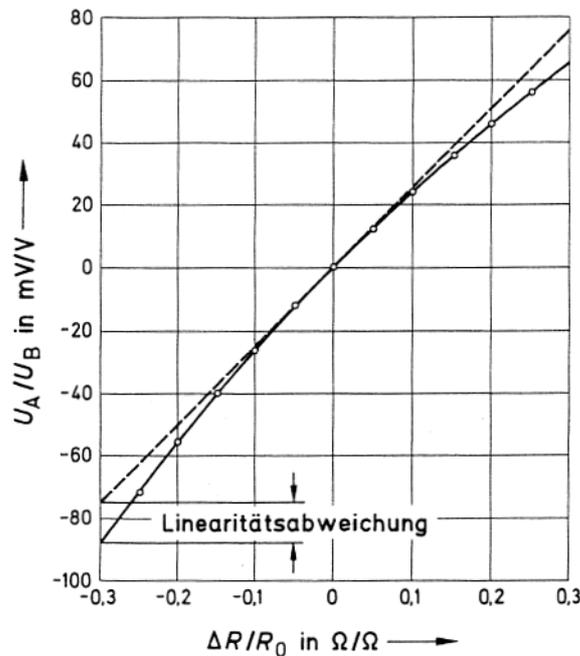




**Bild 5.2-2: Anwendungsformen der Wheatstone'schen Brückenschaltung in der DMS-Technik**

- a) Viertelbrücke
- b) Halbbrücke
- c) Zweiviertel- oder Diagonalbrücke
- d) Vollbrücke

Je nachdem die Widerstandsänderungen in einem oder in mehreren Brückenarmen auftreten und in Abhängigkeit von Betrag und Vorzeichen der Widerstandsänderung(en) kann eine mehr oder weniger große Linearitätsabweichung der Brückenverstimmung auftreten.



**Bild 5.2-3: Kennlinie der Wheatstone'schen Brückenschaltung in der Betriebsart „Viertelbrücke“ nach Gl. (5.2-15) und Vergleichskennlinie nach der Näherungsformel (5.2-16).**

Eine streng lineare Kennlinie entsteht, wenn die Summe der Widerstandsänderungen in den beiden Brückenhälften  $\Delta R_1 + \Delta R_2$  und  $\Delta R_4 + \Delta R_3$  Null wird. Eine maximale Linearitätsabweichung entsteht bei der Viertelbrückenschaltung (und in gleichem Maße bei der Zweiviertel- oder Diagonalbrückenschaltung). Das Bild 5.2-3 zeigt den Verlauf der Brückenverstimmung  $U_A/U_B$  in Abhängig-

keit von der relativen Widerstandsänderung  $\Delta R/R$  im Brückenarm 1, gerechnet nach der Gleichung

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{\Delta R}{2(2R_0 + \Delta R)} \quad (5.2-15)$$

Vorausgesetzt ist  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R = R_0$ . Zum Vergleich ist die nach der Näherungsformel

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{\Delta R}{4 R_0} \quad (5.2-16)$$

gerechnete lineare Kennlinie gestrichelt eingetragen.

Die Linearitätsabweichung der Viertelbrückenschaltung wird in der Literatur meist als großer Nachteil der spannungsgespeisten Wheatstone'schen Brückenschaltung gegenüber der stromgespeisten Brücke dargestellt. Dabei wird außer Acht gelassen, dass der DMS selbst bei großer Dehnung eine nahezu gleichgroße, jedoch entgegengesetzt verlaufende Linearitätsabweichung aufweist (s. Abschnitt 3.3.6). Ein Vergleich mit Bild 3.3-18 zeigt, dass sich beide Linearitätsabweichungen fast völlig kompensieren [3-29] (die Konstantstromspeisung ist zu dieser Selbstkompensation nicht fähig [5-1, 5-4]).

### 5.3 Brückenspeisung und Verstärkung der Brückenausgangsspannung

Die Wheatstone'sche Brückenschaltung kann sowohl mit Gleichspannung als auch mit Wechselspannung gespeist werden. Die Art der Brückenspeisung muss im Zusammenhang mit dem nachgeschalteten Verstärkersystem zur Verstärkung der Brückenausgangsspannung gesehen werden.

Handelsübliche Messverstärker enthalten eine Konstantspannungsquelle zur Speisung der Brückenschaltung. Die Speisespannung ist meist umschaltbar auf feste Werte zwischen 1 und 10 Volt, wodurch die zulässige elektrische Belastbarkeit der DMS berücksichtigt werden kann (s. Abschnitt 3.3.8).

Die Verstärker enthalten ferner Justiermöglichkeiten zum Abgleich des Nullpunktes und zur Einstellung der Verstärkung auf gewünschte Werte. Beim Wechselspannungs- oder Trägerfrequenz-Messverstärker sind im Bedarfsfall noch Mittel zum Abgleich der Phasenlage vorhanden.

Es ist die primäre Aufgabe des Messverstärkers, das Ausgangssignal der Brückenschaltung vom Millivoltbereich auf einen Pegel im Voltbereich anzuheben.

Die verstärkte Signalspannung soll eine Möglichst fehlerfreie Abbildung der Messgröße sein. Störgrößen, wie Thermospannungen und Netzeinstreuungen, sollen keinen Einfluss haben.

Die Ausführungsformen und Modifikationen der Messverstärker sind so zahlreich, dass sie in diesem Rahmen nicht abgehandelt werden können. Detailinformationen entnehme man den einschlägigen Prospekten. Nachstehend wird nur auf die prinzipiellen Unterschiede der beiden Systeme kurz eingegangen.

Der Gleichspannungs-Messverstärker enthält einen Generator, der eine stabilisierte Gleichspannung zur Speisung der Brückenschaltung liefert. Der Gleichspannungsverstärker, welchem die Brückenausgangsspannung zugeführt wird, verstärkt statische Signale ebenso wie dynamische Signale bis zu hohen Frequenzen. In der Praxis des Messens mechanischer Größen genügt eine obere Grenze von 10 kHz in den meisten Fällen, weil massebehaftete mechanische Objekte nur in extremen Fällen diese Grenze übersteigen werden (für die der Gleichspannungsverstärker im Bedarfsfall leicht eingerichtet werden kann). Ein Beispiel für einen hochfrequenten mechanischen Vorgang ist im Abschnitt 3.3.7.2 beschrieben.

In der Regel werden höhere Frequenzen von Störimpulsen herrühren, die aus dem Messsignal möglichst ferngehalten werden sollen. Der Nachteil des Gleichspannungsverfahrens ist, dass Störeinstreuungen durch elektrische oder magnetische Felder sowie im Messkreis entstehende Thermospannungen und galvanische Spannungen voll verstärkt werden und als Fehler in das Messergebnis eingehen. Gegen Störeinstreuungen sind elektrische oder magnetische Abschirmungen erforderlich. Fehler infolge Thermospannungen kann man durch Umpolen der Speisespannung erkennen; sie müssen rechnerisch korrigiert werden.

Beim Trägerfrequenzverfahren liefert der Generator eine spannungs- und frequenzstabilisierte Wechselspannung zur Speisung der Brückenschaltung. Wird die Brückenschaltung durch die Messgröße, z. B. eine Dehnung des DMS, verstimmt, dann liefert sie in gleicher Weise wie beim Gleichspannungsverfahren eine Ausgangsspannung, hier aber eine Wechselspannung, deren Amplituden der Brückenverstimmung proportional sind (Amplitudenmodulation).

Der Verstärker ist so ausgelegt, dass er nur die Frequenz der Speisespannung und relativ schmaler Seitenbänder verstärkt, andere Frequenzen darunter und darüber jedoch nicht annimmt. Dadurch werden alle störenden Gleichspannungsanteile am Messsignal (z. B. Thermospannungen, die sich im Messkreis bilden können) völlig ausgeschieden. Die Trägerfrequenz wird so gewählt, dass störende Wechselspannungen, z. B. Störeinstreuungen durch die Netzfrequenz und deren Oberwellen sowie hochfrequente Störimpulse, ebenfalls ohne Einfluss auf das Messsignal bleiben.

Übliche Trägerfrequenzen sind 225 Hz und 5 kHz. 225 Hz-TF-Verstärker sind zur Messung statischer und quasistatischer Vorgänge (bis 9 Hz) geeignet, 5 kHz-TF-Verstärker bewältigen statische und dynamische Vorgänge bis zu einer Frequenz von 1 kHz (bei 1 dB Amplitudenabfall).

Eine über die vorstehende grobe Unterscheidung hinausgehende vergleichende Betrachtung des Gleichspannungs- und des Trägerfrequenzverfahrens aus anwendungstechnischer Sicht ist in [5-5] gegeben.

## 6 Das Kalibrieren einer Messeinrichtung

Die Aufgabe des Messens besteht darin, den Wert einer physikalischen Größe zu erfassen und als Zahlenwert oder in verschlüsselter Form darzustellen. Um den Messwert zu erfassen, bedient man sich einer Messeinrichtung, an deren Anfang die Messgröße aufgenommen wird (Aufnehmer) und an deren Ende der Messwert ausgegeben wird (Ausgeber). Die Bestandteile der Messeinrichtung fügen sich wie die Glieder einer Kette aneinander, deshalb auch die Bezeichnung Messkette.

Vorn Anwender einer Messeinrichtung wird verständlicherweise erwartet, dass zwischen dem Zahlenwert der aufgenommenen Messgröße und dem des ausgegebenen Messwertes Übereinstimmung herrscht. Diese Übereinstimmung erhält man durch „Kalibrieren“ der Messeinrichtung, auch „Einmessen“ genannt. Der früher verwendete Begriff „Eichen“ ist dem entsprechenden amtlichen Vorgang der Eichbehörde vorbehalten. Die hier verwendeten Begriffe und Bezeichnungen folgen den Festlegungen in [6-1] (siehe Bild 6.0-1).

Das Prinzip des Kalibrierens soll an einem einfachen Beispiel

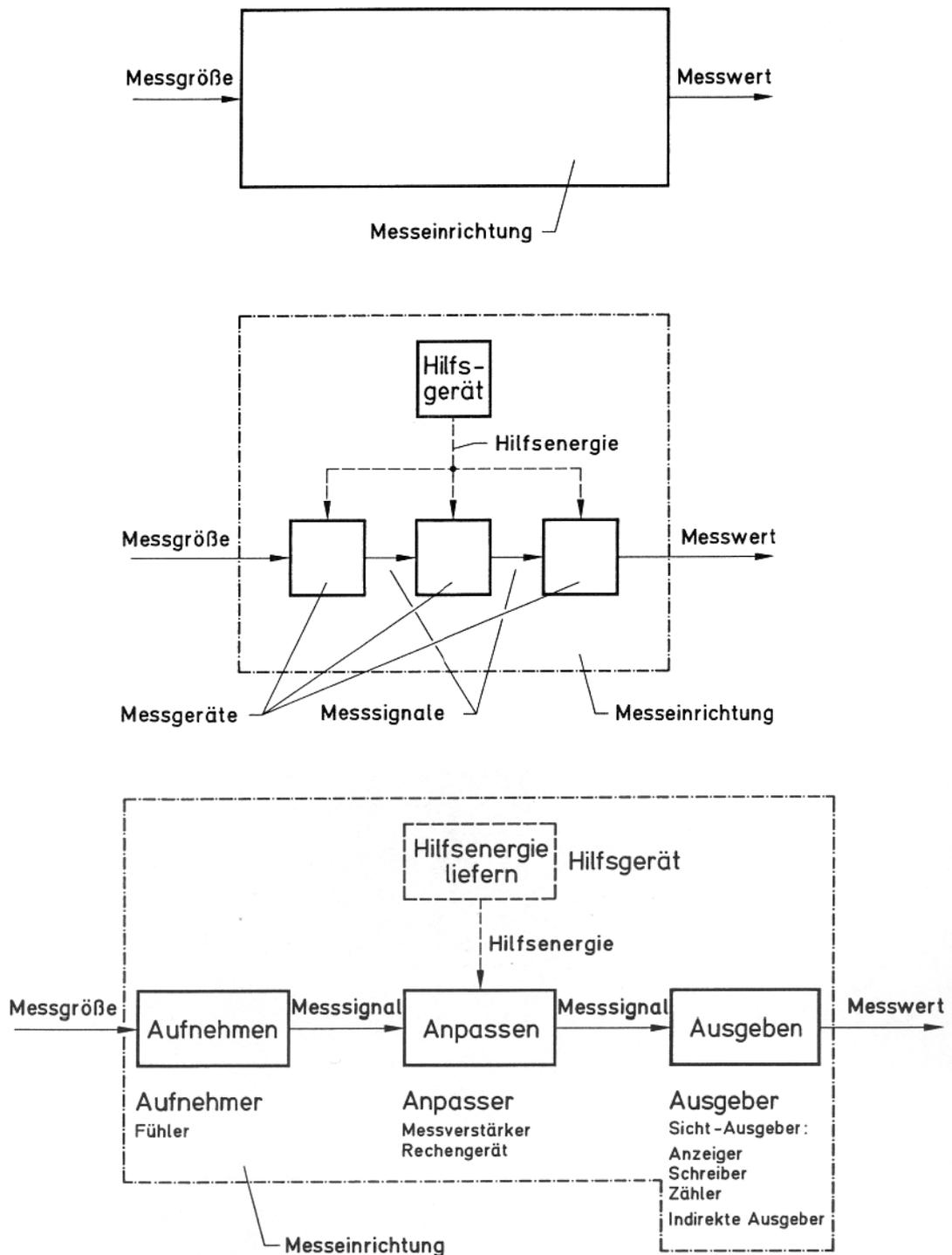
erläutert werden, dem Kalibrieren einer Federwaage (hierzu Bild 6.0-2).

Man markiert auf der Skala die Stellung des Zeigers im unbelasteten Zustand und beziffert die Marke mit „0“. Dann hängt man unterschiedlich schwere Gewichtsstücke  $Q$  mit bekanntem Gewicht nacheinander an die Feder an und markiert und beziffert jeweils die Zeigerstellung auf der Skala. Danach ist man in der Lage, das unbekannte Gewicht anderer Objekte zu bestimmen, solange sich der Zeiger innerhalb des kalibrierten Skalenbereiches befindet. Werte zwischen den Markierungen können durch Schätzung mehr oder weniger genau abgelesen werden.

Die Genauigkeit der Kalibrierung hängt ab von der Genauigkeit der verwendeten Kalibriergewichte.

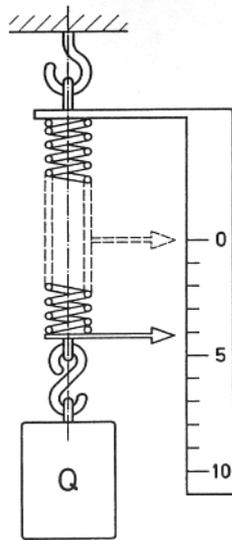
Die Übereinstimmung des angezeigten Skalenwertes mit dem Wert der Messgröße muss nicht unbedingt in einer an sich wünschenswerten Zahlengleichheit bestehen, es genügt auch, wenn der Zusammenhang durch einen bekannten Proportionalitätsfaktor hergestellt wird. Dieser Proportionalitätsfaktor wird in gleicher Weise durch Kalibrieren bestimmt und muss beim Ablesen des Messwertes berücksichtigt werden.

$$\text{Messwert} = \text{Skalenwert} \text{ mal Faktor.}$$



**Bild 6.0-1: Definition des Begriffs „Messeinrichtung“ und Benennung ihrer Glieder nach [6-1].**

Wie an diesem einfachen Beispiel gezeigt wurde, erfordert das Kalibrieren, dass die Messgröße mit einem zahlenmäßig möglichst genau bekannten Wert in die Federwaage eingeleitet wird. Dabei muss sowohl auf die richtige Gebrauchslage



**Bild 6.0-2: Schema zum Kalibrieren einer Federwaage Erläuterungen im Text**

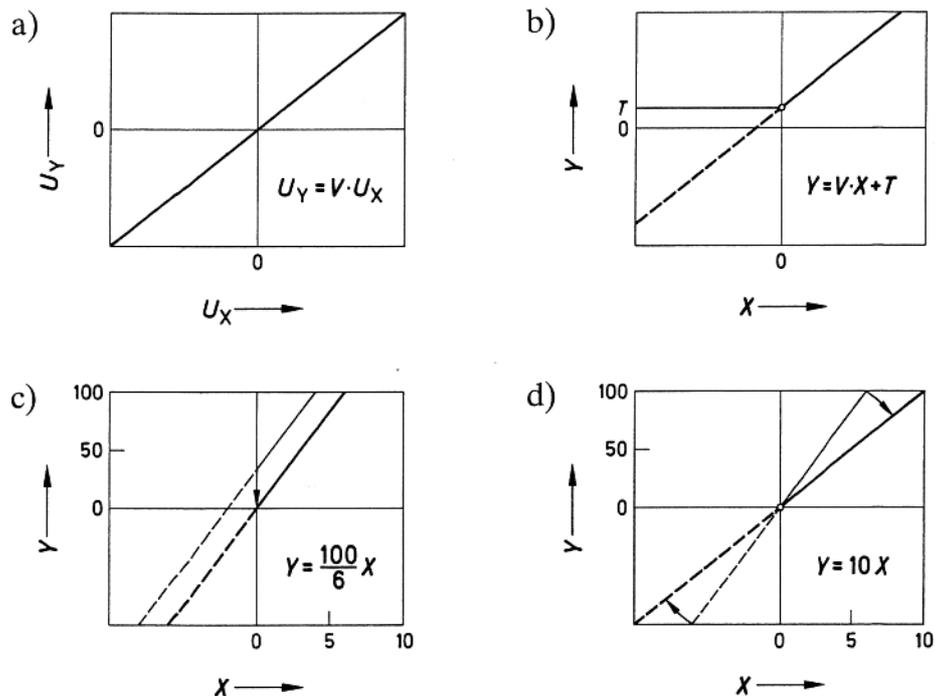
der Federwaage geachtet werden als auch auf unbehindertes Einwirken der Messgröße (der Gewichtstücke). Diese Bedingung gilt für jegliche Kalibrierung. Bei mechanischen Messeinrichtungen erfolgt die Einleitung der Messgröße zum Zwecke der Kalibrierung in der Regel auf direktem Wege (Anhängen eines Gewichts, Abgreifen einer Strecke usw.). Bei den elektrischen Messverfahren wird man in gleicher Weise vorgehen, soweit dies durchführbar ist. Probleme ergeben sich dort, wo entweder ein Kalibriernormal (Eichgewicht, Endmaß o. dgl.) nicht verfügbar ist oder anderweitige technische Hinderungsgründe bestehen. So lässt sich bei Dehnungsmessungen mit DMS diese direkte Art der Kalibrierung nicht anwenden. Der Grund ist, dass sich eine Dehnung als Kalibrierwert mit vertretbarem Aufwand nicht darstellen lässt. Stattdessen sind andere Verfahren in Gebrauch:

- Das Kalibrieren mit einem vom Messverstärker gelieferten Kalibriersignal (Abschn. 6.2),
- die direkte Nebenschlusskalibrierung (Abschn. 6.3),
- die Kalibrierung mit einem Kalibriergerät (Abschn. 6.4).

## 6.1 Die Wirkungsweise der Abgleich- und Kalibriereinrichtungen eines Messverstärkers

Die unter der Bezeichnung „Messverstärker“ angebotenen Geräte (s. Abschn. 5.3) enthalten - sofern sie auf die DMS-Technik zugeschnitten sind - neben

dem eigentlichen Verstärker noch zahlreiche Hilfsaggregate, wie z. B. die Brücken-Ergänzungsschaltung, die Speisequelle, Messbereichsumschaltungen, Kalibriereinrichtungen und verschiedene Abgleich-(Justier-)einheiten, die für die praktische Arbeit mit DMS unerlässlich sind. Der Begriff „Messverstärker“ umfasst also sehr viel mehr als nur den Verstärker. Die eigentlichen Verstärker-Bausteine haben aufgrund ihrer Konzeption eine streng lineare Kennlinie, Bild 6.1-1a. Das gilt gleichermaßen für Trägerfrequenzverstärker wie für Gleichspannungsverstärker. Die Ausgangsspannung  $U_Y$  ist um den Verstärkungsfaktor  $V$  größer als die Eingangsspannung  $U_X$ . Schließt man eine aus einem oder auch aus mehreren DMS gebildete Brückenschaltung an den Verstärker an, dann wird man finden, dass infolge unvermeidlicher, geringfügiger Widerstandsunterschiede der Brückenarme bereits eine Brückenverstimmung vorliegt. Der Verstärker erhält dadurch bereits eine Brückenausgangsspannung zugeführt, obwohl die Messgröße (Dehnung, Gewicht, Drehmoment o. dgl.) noch gar nicht einwirkt. Dieses Signal sei hier „Tarasignal“ genannt, in Anlehnung an die Begriffe der Wägetechnik. (Anstatt „Tarasignal“ findet sich auch die Bezeichnung

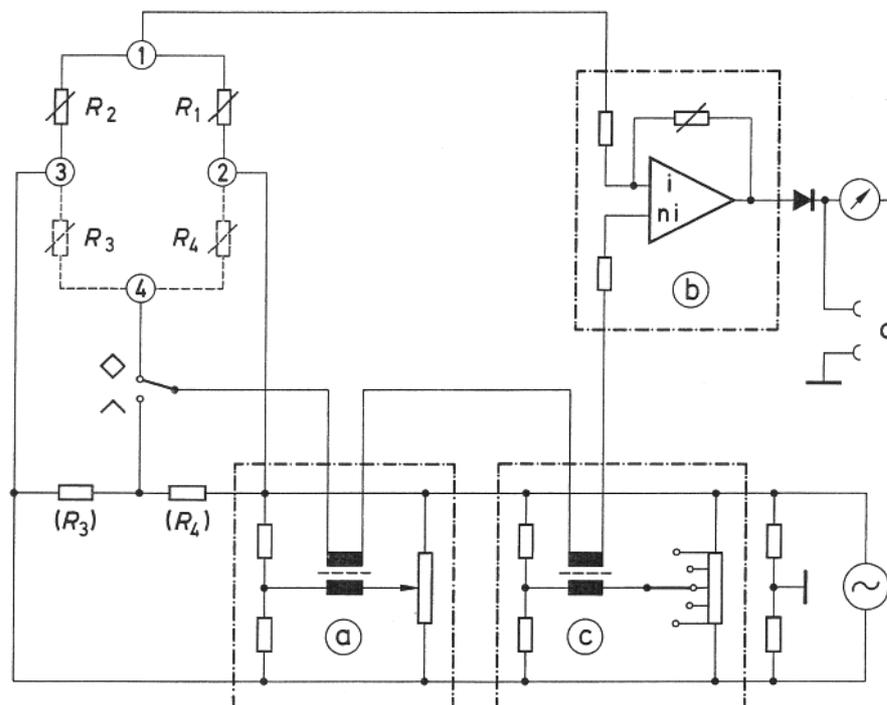


**Bild 6.1-1: Die Wirkungsweise von Abgleichelementen der Messverstärker**

- a) Kennlinie des Verstärkers
- b) Auswirkungen von Tarasignal  $T$  auf das Verhältnis Messgröße  $X$  zu Anzeige  $Y$  (Nullpunktverschiebung)
- c) Beseitigung der Tara-Anzeige mit Hilfe der Nullpunkt-Abgleicheinrichtung
- d) Justierung auf ein ganzzahliges Verhältnis zwischen Messgröße und Anzeige mit Hilfe der Justiereinrichtung für den Verstärkungsgrad

„Nullsignal“, weil die Messgröße den Betrag „null“ hat.) Die Kennlinie des Verstärkers ist um das Tarasignal  $T$  verschoben (Bild 6.1-1b); die Verschiebung kann positiv oder negativ sein.

Mit Hilfe einer Abgleicheinrichtung, Nullpunkts-, Betrags- oder R-Abgleich genannt, kann man die Tara-Anzeige beseitigen, so dass die Anzeige  $Y$  nunmehr dem Signal  $X$  proportional ist, Bild 6.1-1c. Das Zahlenverhältnis zwischen der Messgröße und der Anzeige, der Verstärkungsfaktor  $V$ , ist jedoch noch willkürlich. Durch eine Justierung des Verstärkungsgrades lässt sich innerhalb gewisser Grenzen eine Anpassung vornehmen mit dem Ziel eines ganzzahligen Verhältnisses zwischen der Messgröße und der Anzeige. Im Diagramm Bild 6.1-1d erscheint die Änderung der Verstärkung als Drehung der Kennlinie um den Nullpunkt.



- a Additiv eingekoppeltes Signal zum Nullpunktgleich
- b Verstärkungsregelung zur Empfindlichkeitsjustierung
- c Erzeugung eines Signals mit definiertem Betrag zur unabhängigen Kalibrierung des Messverstärkers
- d Signalausgang für externe Weiterverarbeitung

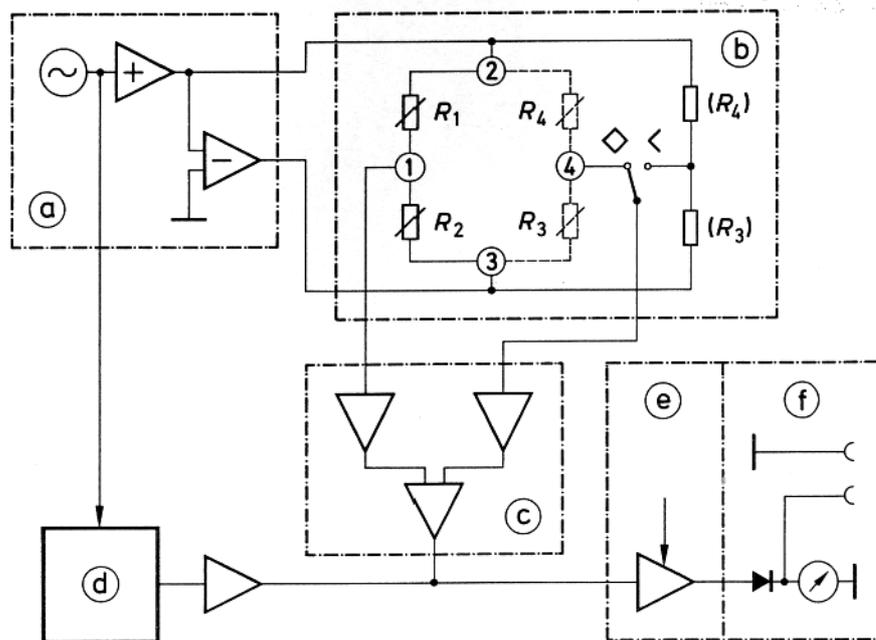
**Bild 6.1-2: Schaltung der Abgleich- und Justiereinrichtungen eines Trägerfrequenz-Messverstärkers (ältere Ausführung)**

Ein Beispiel für die Wirkungsweise der Abgleich- und Justiereinrichtung zeigt das Bild 6.1-2. Diese Schaltung ist zwar inzwischen überholt und durch modernere ersetzt, sie eignet sich aber recht gut zur Erläuterung des Prinzips.

Eine mittels Potentiometers einstellbare Hilfsspannung (**a**) wird additiv in den Signalkreis eingekoppelt und dient zur Kompensation von Signalspannungen aus der Eingangsschaltung, der Wheatstone'schen Brücke, die infolge einer Unsymmetrie oder einer Taralast auftreten können. Das Kompensationssignal - es kann nach Bedarf positiv oder negativ sein - gleicht die Differenz zwischen dem Nullwert der Messgröße und dem Nullwert des Signals aus und macht damit Korrekturen entbehrlich. In der Praxis ist der Nullpunktgleich meist aufgelöst in einen stufenweise schaltbaren Grob- und Mittelbereich und einen stufenlosen Feinabgleich.

Die Verstärkungsregelung (**b**) ist aus Gründen der Zweckmäßigkeit stufenlos ausgeführt. Vielfach lässt sich zusätzlich mit einem besonderen Schalter der Messbereich des Geräts in geeichten Stufen umschalten und an einem sogenannten „k-Faktor-Wähler“ der genaue Zahlenwert des k-Faktors des verwendeten DMS einstellen. Die Messbereichsumschaltung und der k-Faktor-Wähler sind ihrer Wirkung gemäß ebenfalls Verstärkungsregler.

Mit dem Kalibriersignal (**c**) lassen sich Signale eines definierten Betrages ebenfalls additiv in den Signalkreis einkoppeln. Damit kann die Messkette vom Signaleingang bis zur Anzeige unabhängig von dem angeschlossenen Aufnehmer kalibriert werden. Diese Art der Kalibrierung ist dann vom Nutzen, wenn eine direkte Kalibrierung der Messkette nicht möglich ist.



- a** Speisequelle, erdsymmetrisch
- b** Aufnehmerschaltung und Brückenergänzung für Halbbrücken
- c** Vorverstärkung
- d** Baugruppe zur Erzeugung der Abgleich- und Kalibrierspannung
- e** Endverstärker mit Verstärkungsregelung und k-Faktor-Anpassung
- f** Anzeige und Ausgangssignal für externe Weiterverarbeitung

**Bild 6.1-3:** Schaltschema eines Messverstärkers neuerer Ausführung

Das Bild 6.1-3 zeigt das Prinzipschaltbild eines modernen Messverstärkers. Die Funktionen sind die gleichen wie zuvor, so dass der Anwender in gewohnter Weise mit dem Gerät arbeiten kann; lediglich der innere Aufbau ist verändert, woraus sich Vorteile ergeben. Der extrem niedrige Innenwiderstand des Speisegenerators gewährleistet völlig gleichartige Speisebedingungen auch bei großem Unterschied des Innenwiderstandes der anzuschließenden Brückenschaltung (des Aufnehmers). Die symmetrische Vorverstärkung hebt das Messsignal auf einen höheren Pegel. Hohe Gleichtaktunterdrückung von Störeinstreuungen gewährleistet hohe Messgenauigkeit sowie höhere Genauigkeit der in einer eigenen Baugruppe erzeugten Abgleich- und Kalibrierspannungen. Deren Einkopplung in den Messkreis erfolgt mit Operationsverstärkern, was gegenüber der früher üblichen transformatorischen Kopplung Vorteile bringt, insbesondere beim Anschluss induktiver Aufnehmer, deren Betrieb bei Trägerfrequenz-Messverstärkern ab 5 kHz-Trägerfrequenz alternativ zu resistiven (ohmschen) Aufnehmern und DMS möglich ist.

Die Verstärkungsregelung einschließlich Bereichsumschaltung und k-Faktor-Anpassung erfolgt wie bisher im Endverstärker.

## 6.2 Das Kalibrieren mit dem vom Messverstärker gelieferten Kalibriersignal

Die für die DMS-Technik angebotenen Messverstärker enthalten entweder einen Schalter oder eine Drucktaste, womit ein definiertes Signal in den Messkreis eingespeist werden kann. Der Betrag des Kalibriersignals kann entweder im Dehnungsmaß  $\mu\text{m}/\text{m}$  angegeben sein oder in der Brückenverstimmung  $\text{mV}/\text{V}$ .

### Wichtiger Hinweis!

Eine Kalibrierung mit dem vom Messverstärker gelieferten Kalibriersignal berücksichtigt nicht den empfindlichkeitsmindernden Widerstand langer Verbindungskabel zwischen DMS und Messverstärker. Sie ist ausreichend genau bei kurzen Kabeln (siehe auch Abschn. 7:2).

Werden  $\mu\text{m}/\text{m}$  angegeben, dann gilt der Zahlenwert nur dann genau, wenn der k-Faktor des DMS den Wert 2,0 besitzt. Bei abweichendem k-Faktor gehe man gemäß Abschn. 6.5 vor.

Wird das Kalibriersignal in  $\text{mV}/\text{V}$  angegeben, dann gilt:

$$1 \text{ mV}/\text{V} \hat{=} 2000 \mu\text{m}/\text{m} \text{ bei } k = 2,0.$$

Die Herleitung dieser Entsprechung ist einfach. Im Abschnitt 6.3 (siehe dort) wird die Brückenverstimmung  $U_A/U_B$  infolge der Dehnung des DMS erläutert.

Setzt man in die Gl. (6.3-9) für  $k = 2$  und für  $\varepsilon = 2000 \cdot 10^{-6}$  ein, dann erhält man

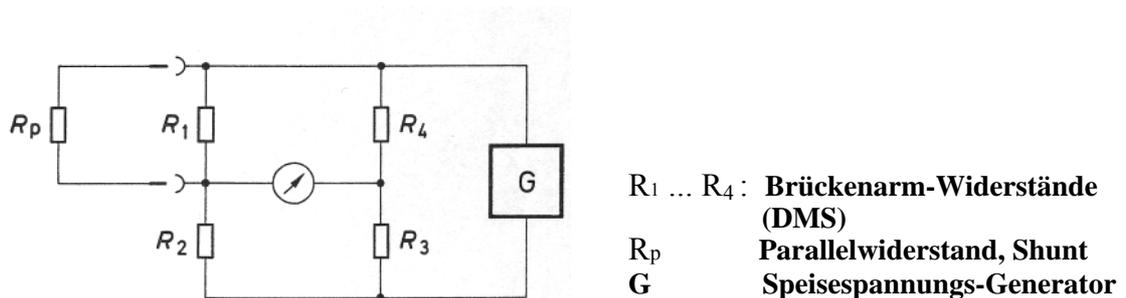
$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} k \cdot \varepsilon = \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot 2000 \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{mV}}{\text{V}}$$

Auch hier muss man bei abweichendem k-Faktor nach den in Abschn. 6.5 beschriebenen Möglichkeiten vorgehen.

### 6.3 Die Nebenschluss- (Shunt-) Kalibrierung

In allen Fällen, in denen eine Messeinrichtung nicht durch unmittelbare Einwirkung der Messgröße mit einem hinreichend genau bekannten Betrag auf den Aufnehmer (hier den DMS) kalibriert werden kann, zieht man eine sogenannte „Maßverkörperung“ heran. Man versteht darunter eine Hilfseinrichtung, mit der man einen vergleichbaren, definierten Einfluss auf die Messeinrichtung ausüben kann, wie ihn der Aufnehmer selbst ausübt.

Im konkreten Fall ist es möglich, die Brückenschaltung mittels eines Nebenschluss-Widerstandes (Shunts) zu verstimmen. Das Bild 6.3-1 zeigt das Prinzip der Shunt-Kalibrierung. Die Schaltung entspricht weitgehend der realen DMS-Schaltung.



**Bild 6.3-1: Prinzip der Shunt-Kalibrierung**

Für die Berechnung der Brückenverstimmung genügt es, die Näherungsgleichung

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (6.3-1 = 5.2-12)$$

anzuwenden.

Bei der Viertelbrückenschaltung sind  $\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = 0$

und es bleibt

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (6.3-2)$$

Es gilt ferner

$$R_p \parallel R \rightarrow R_r \quad (6.3-3)$$

$$R_r = \frac{R \cdot R_p}{R + R_p} \quad (6.3-4)$$

$$\Delta R = R_r - R \quad (6.3-5)$$

$R_p$  = Parallelwiderstand (Shunt)

$R$  = DMS-Widerstand

$R_r$  = resultierender Widerstand

$\Delta R$  = Widerstandsänderung

Daraus ergibt sich

$$\begin{aligned} \frac{U_A}{U_B} &= \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{R_r - R}{R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\frac{R \cdot R_p}{R + R_p} - R}{R} \\ &= \frac{1}{4} \left( \frac{R_p}{R + R_p} - 1 \right). \end{aligned} \quad (6.3-6)$$

Für den DMS gilt nach Umstellung der Gl. (3.3-1):

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (6.3-7)$$

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{4} \cdot k \cdot \varepsilon. \quad (6.3-8)$$

Bezeichnet man den zu errechnenden Kalibrierwert mit  $\varepsilon^*$ , dann ergibt sich

$$\varepsilon^* = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{k} \left( \frac{R_p}{R + R_p} \right) - 1 \quad \text{in m/m} \quad (6.3-9)$$

oder

$$\varepsilon^* = \frac{1}{k} \left( \frac{R_p}{R + R_p} - 1 \right) \cdot 10^6 \quad \text{in } \mu\text{m/m}. \quad (6.3-9a)$$

Schaltet man einem DMS das Tausenfache seines Widerstandes parallel, und geht man weiterhin von einem angenäherten k-Faktor = 2 aus, dann ergibt sich ein Kalibrierwert  $\varepsilon^* = 499,5 \mu\text{m/m} \approx 500 \mu\text{m/m}$ .

Beispiel:

$$\begin{aligned} R_{\text{DMS}} = R &= 120 \Omega \\ R_{\text{p}} &= 120 \text{ k}\Omega \\ K &= 2 \end{aligned} \quad \varepsilon = \frac{1}{2} \left( \frac{120\,000}{120\,120} - 1 \right) \cdot 10^6 = -499,5 \mu\text{m/m} \approx -500 \mu\text{m/m}$$

Das Vorzeichen des Kalibrierwertes wird negativ, wenn man einen der Brücken-zweige  $R_1$  oder  $R_3$  shuntet, es wird positiv, wenn man die Brücken-zweige  $R_2$  oder  $R_4$  shuntet.

Bei Viertelbrückenschaltungen wird man den DMS wegen der erwünschten Vorzeichen-Übereinstimmung zwischen Dehnung und Anzeige immer in die Position  $R_1$  der Brückenschaltung einsetzen. Deshalb ist die Kalibrierung für den negativen Bereich möglich. Das setzt ein Anzeigegerät mit negativem Bereich voraus. Die Kalibrierung gilt dann auch für den positiven Bereich. Bei Halb- und Vollbrückenschaltungen ist die Kalibrierung natürlich für beide Bereiche möglich, je nach Position des geschunteten Widerstandes. Das ausgeführte Beispiel mag als Daumenwert für eine grobe Überprüfung von DMS-Messstellen dienen; zum Kalibrieren müssen die Zahlenwerte für  $R_{\text{DMS}}$ ,  $R_{\text{p}}$  und  $k$  möglichst genau bekannt sein, weil davon die Genauigkeit der Kalibrierung abhängt.

Shuntet man unmittelbar am DMS, dann werden, im Gegensatz zu der im Abschnitt 6.2 beschriebenen Methode, alle auf die Anzeige einwirkenden Einflüsse erfasst, wie z. B. der Widerstand des Anschlusskabels, der Verstärkungsgrad des Verstärkers und die Empfindlichkeit des Anzeigegerätes.

Setzt man den errechneten Kalibrierwert  $\varepsilon^*$  zum angezeigten Messwert  $\varepsilon_{\text{a}}$  ins Verhältnis, dann erhält man einen Korrekturfaktor  $F_{\text{c}}$ :

$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_{\text{a}}} = F_{\text{c}}. \quad (6.3-10)$$

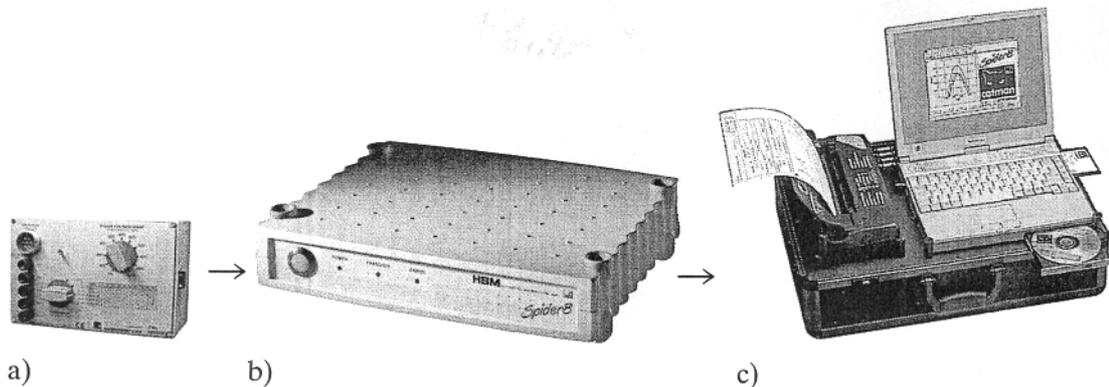
$\varepsilon_{\text{a}}$  multipliziert mit  $F_{\text{c}}$  ergibt den der Dehnung  $\varepsilon$  zahlengleichen Kalibrierwert  $\varepsilon^*$

$$\varepsilon_{\text{a}} \cdot F_{\text{c}} = \varepsilon^* = \varepsilon. \quad (6.3-11)$$

Ein eleganter Weg lässt sich beschreiten, wenn man Messverstärker mit justierbarer Verstärkung benutzt (s. Abschn. 6.1). Mit ihnen kann man die Anzeige in zahlenmäßige Übereinstimmung mit dem Kalibrierwert  $\varepsilon^*$  bringen, so dass sich eine Korrekturrechnung erübrigt.

## 6.4 Kalibrierung mit einem Kalibriergerät

Während das in 6.3 beschriebene Verfahren weitgehende Unabhängigkeit von den Widerstandswerten der verwendeten DMS und der Shuntwiderstände gewährt (sie müssen nur genau bekannt sein), sind Kalibriergeräte und bestimmte Standard-Widerstandswerte festgelegt, z. B.  $120\ \Omega$ , und  $350\ \Omega$ . Damit Kabeinflüsse richtig erfasst und eliminiert werden, müssen die Nennwiderstände von Kalibriergerät und DMS übereinstimmen. Das Kalibriergerät wird immer anstelle der DMS oder Aufnehmer in die Schaltung eingefügt. Bild 6.4-1, und nach der Kalibrierung wieder durch den DMS bzw. Aufnehmer ersetzt.



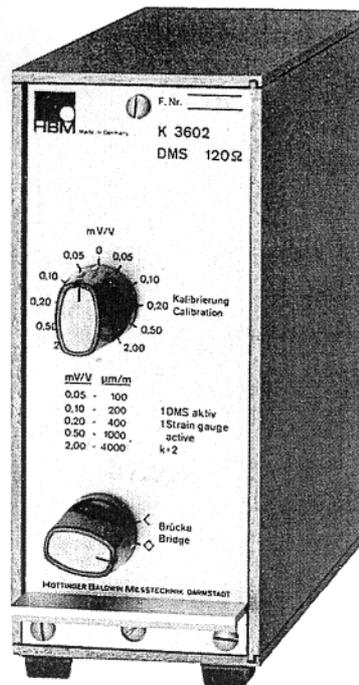
**Bild 6.4-1: Anordnung des Kalibriergerätes innerhalb der Messeinrichtung**

- a) Kalibriergerät
- b) Messverstärker
- c) Auswertesoftware

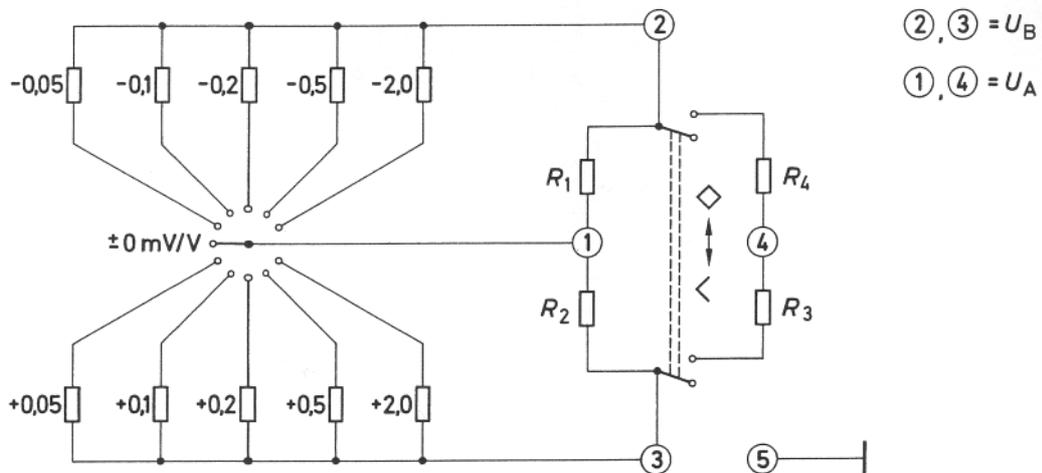
Kalibriergeräte können nach verschiedenen Verfahren arbeiten. Das im Bild 6.4-2 gezeigte Gerät arbeitet nach dem im Abschnitt 6.4-3 beschriebenen Shuntverfahren, Bild 6.4-3 zeigt das Prinzipschaltbild.

Mit den im Kalibriergerät eingebauten, genau bemessenen Shuntwiderständen kann man sowohl positive als auch negative Brückenverstellung unterschiedlichen Ausmaßen erzeugen. Die verschiedenen Stufen der Brückenverstellung sind an der Schalterskala in  $\text{mV/V}$  angeschrieben. Den Zusammenhang zwischen der in  $\text{mV/V}$  angegebenen Brückenverstellung  $U_A/U_B$  und der Dehnung  $s$  nennt die Entsprechung  $1\ \text{mV/V}$  entspricht  $2000\ \mu\text{m/m}$  bei  $k = 2,0$  (s. Abschn. 6.2).

Die Brückenschaltung im Kalibriergerät lässt sich nach Bedarf auf Halb- oder Vollbrücke umschalten. Die Shunt-Widerstände werden jeweils nur 1 Brücken-zweig parallelgeschaltet; parallel zu  $R_1$  ergibt sich eine negative Anzeige, parallel zu  $R_2$  eine positive. Es lassen sich jedoch ebenso problemlos auch Viertelbrückenschaltungen kalibrieren, eine Schaltungsart, die in der experimentellen Spannungsanalyse sehr oft angewandt wird. In diesem Falle schließe man das DMS-Anschlusskabel an die Klemmen 1 und 2 des Kalibriergerätes. Die Kalibrierung ist dann allerdings nur in negativer Richtung möglich.



**Bild 6.4-2: Kalibriergerät K3602 System „Shuntkalibrierung“**



**Bild 6.4-3: Prinzipschaltbild eines Kalibriergerätes nach der Shuntmethode**

Wenn die tatsächlichen  $k$ -Faktoren der verwendeten DMS von dem Näherungswert 2 abweichen, dann sind Korrekturen notwendig. Die verschiedenen Möglichkeiten zur Korrektur der Kalibrierung oder zur Korrektur des Messwertes sind im Abschnitt 6.5 beschrieben.

Ein anderes Prinzip wird in dem Kalibriergerät K 3607, Bild 6.4-4, angewandt. Es enthält ein hochgenaues Widerstandsnetzwerk in Sternschaltung, welches zur

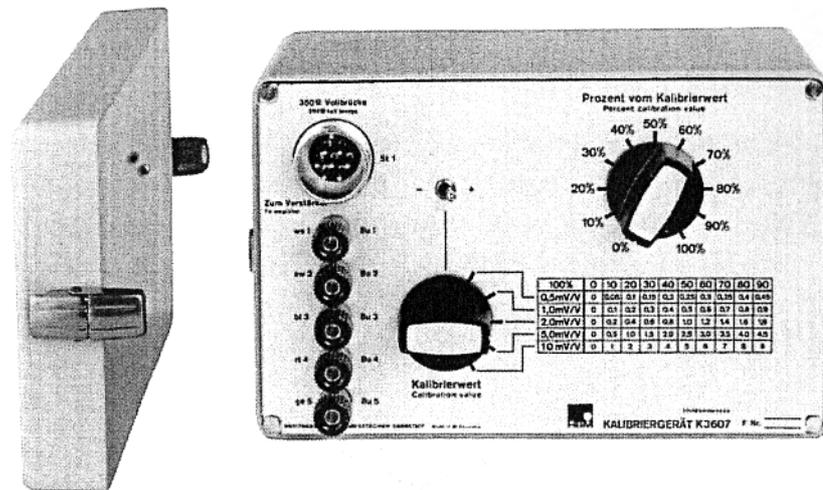


Bild 6.4-4: Kalibriergerät K 3607

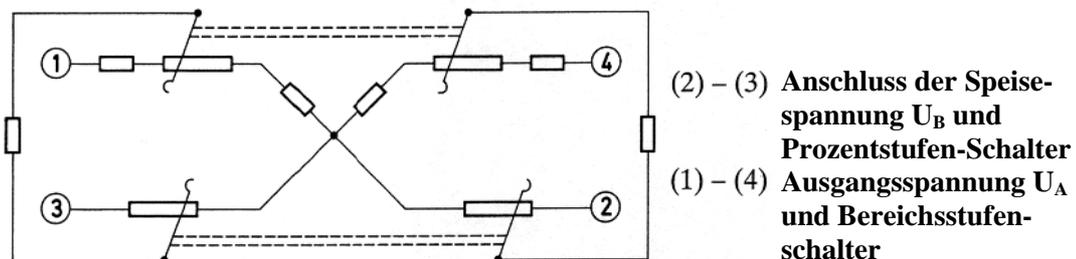


Bild 6.4-5: Prinzipschaltbild des Kalibriergerätes K 3607

Simulation der Brückenverstimmung von Aufnehmern mit DMS-Vollbrückenschaltung dient. Mit dem Kalibriergerät können Messeinrichtungen kalibriert werden, ohne dass der zugehörige Aufnehmer mit der Messgröße beaufschlagt wird. Es ist für einen Brückenwiderstand von  $350\ \Omega$  ausgelegt in Übereinstimmung mit dem Standard-Brückenwiderstand handelsüblicher Aufnehmer. Durch fünf unterschiedliche Bereichsstufen für das Kalibriersignal, die wiederum jeweils 10 %-Stufen unterteilt sind, kann das Gerät auch zur Überprüfung der Linearität der Messeinrichtung verwendet werden. Die extrem niedrigen Eigenkapazitäten und Eigeninduktivitäten der eingebauten Präzisionswiderstände ermöglichen die Genauigkeitsklasse 0,025 des Kalibriergerätes.

Grundsätzlich beziehe man längere Verbindungsleitungen zwischen DMS und Messverstärker in die Kalibrierung ein, um ohmsche und kapazitive Kabeleinflüsse mit zu erfassen. Bei dazu vorgesehenen Messverstärkern kann das Kalibriergerät auch in 6-Leiter-Schaltung betrieben werden (s. Abschn. 7.3.2).

### 6.5 Berücksichtigung eines vom Näherungswert 2 abweichenden k-Faktors

Auf den Datenblättern der DMS-Packungen ist der für das betreffende Fertigungslos ermittelte k-Faktor und dessen Toleranz als Prozentsatz angegeben. Die tatsächlichen k-Faktoren können um einige Prozent von dem in der Tafel 3.3.1 genannten Mittelwert abweichen. Die Toleranzen innerhalb eines Fertigungsloses sind jedoch wesentlich enger und liegen meist zwischen 0,5 und 1 %. Die Toleranz gilt für fachgerecht applizierte DMS und enthält außer den wesentlich kleineren Streuwerten des k-Faktors selbst die unvermeidlichen Einflüsse der Applikation.

Für Anwender ist es nun wichtig, die Messeinrichtung auf den tatsächlichen k-Faktor zu kalibrieren.

Bei Messverstärkern mit k-Faktor-Wähler stelle man diesen zunächst auf den Zahlenwert 2,0 und justiere mit der Empfindlichkeitsregelung den Anzeigewert

- entweder auf den Zahlenwert des in  $\mu\text{m}/\text{m}$  vorliegenden Kalibriersignals
- oder auf den Zahlenwert 2000 bei einem Kalibriersignal von 1 mV/V.

Dann schalte man den k-Faktor-Wähler auf den Zahlenwert des tatsächlichen k-Faktors der DMS. Der k-Faktor-Wähler verändert die Verstärkung im Verhältnis 2:k, so dass die Kalibrierung für den abweichenden k-Faktor wieder stimmt.

Bei Messverstärkern ohne k-Faktor-Wähler und bei Kalibriergeräten errechne man den Kalibrierwert  $\varepsilon^*$  wie folgt:

- a) wenn das Kalibriersignal mit dem Zahlenwert Z in  $\mu\text{m}/\text{m}$  vorliegt:

$$\varepsilon^* = Z \cdot \frac{2}{k_{\text{DMS}}} \quad \text{in } \mu\text{m}/\text{m}, \quad (6.5-1)$$

- b) wenn das Kalibriersignal als Brückenverstimmung  $U_A/U_B$  in mV/V vorliegt erhält man

$$\varepsilon^* = \frac{U_A}{U_B} \cdot 2000 \cdot \frac{2}{k_{\text{DMS}}}, \quad \text{ebenfalls in } \mu\text{m}/\text{m}, \quad (6.5-2)$$

Beispiel zu a):

$$Z = 5000 \mu\text{m}/\text{m}$$

$$k_{\text{DMS}} = 2,07$$

$$\varepsilon^* = 5000 \cdot \frac{2}{2,07} = 4830,9 \mu\text{m}/\text{m}.$$

Beispiel zu b):

$$\frac{U_A}{U_B} = 0,5 \text{ mV/V}$$

$$k_{\text{DMS}} = 2,06$$

$$\varepsilon^* = 0,5 \cdot 2000 \cdot \frac{2}{2,06} = 970,9 \text{ } \mu\text{m/m.}$$

Nunmehr stelle man den Verstärkungsregler des Messverstärkers so ein, dass das Anzeigegerät den errechneten Zahlenwerte  $\varepsilon^*$  anzeigt.

Bei digitalen Anzeigegeräten wird man im Falle des vorstehend gegebenen Beispiels a) den Wert auf 4831 einstellen, beim Beispiel b) auf 971.

Bei einem analogen Anzeigegerät mit 100teiliger Skala würde man die Anzeige im Fall a) auf 48,3 Skalenteile einstellen, im Fall b) auf 97,1 Skalenteile (Zehntel-Skalenteile sind zu schätzen). Bruchteile von  $\mu\text{m/m}$  sollte man immer auf den nächstliegenden vollen Zahlenwert runden.

## **7 Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Messfehlern**

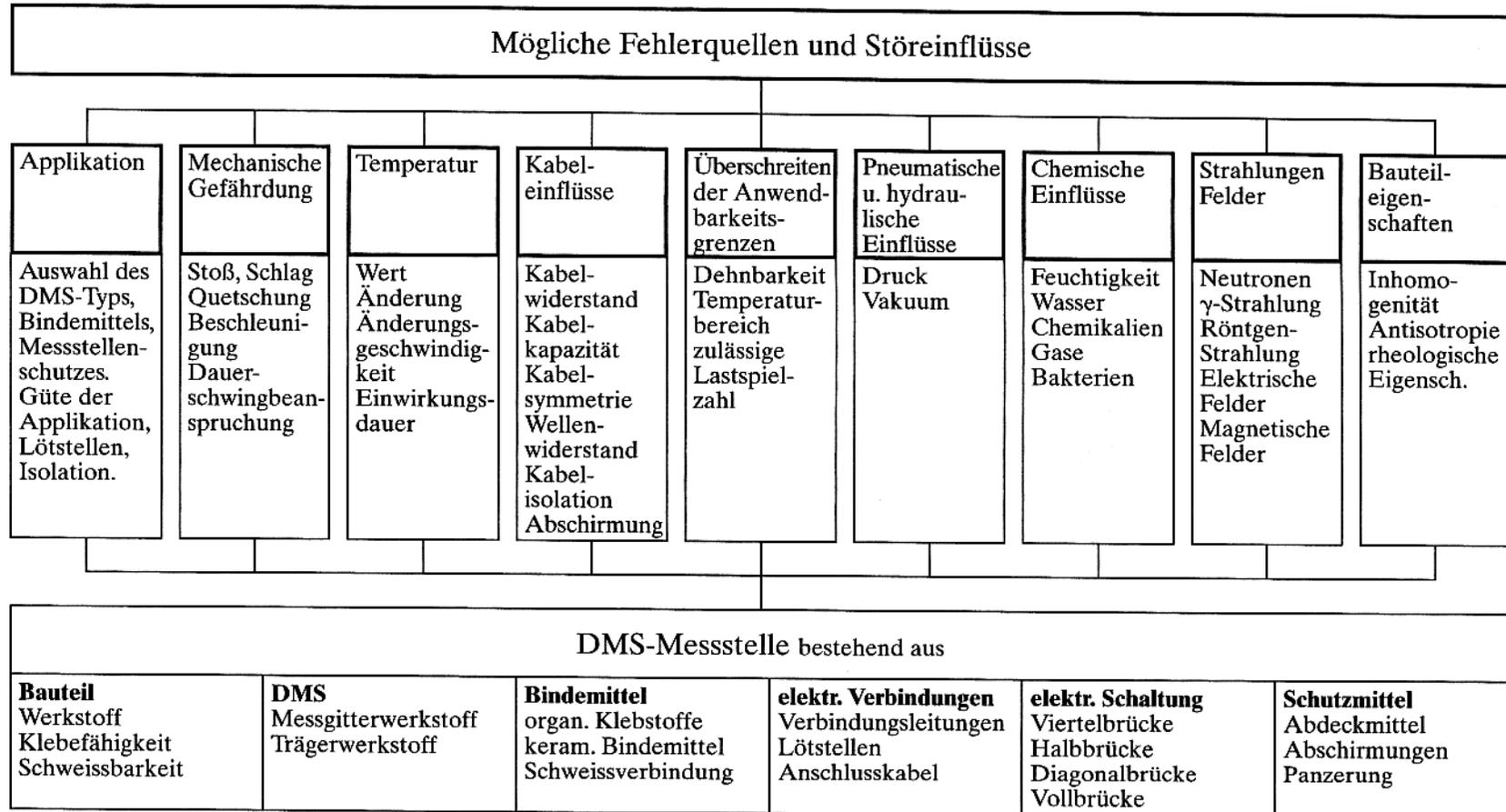
Jede Messung - gleich welcher Art - ist unabwendbar mit einem Messfehler behaftet. Für den Messenden stellt sich die Aufgabe, die Fehler im Rahmen eines vertretbaren Aufwandes in akzeptablen Grenzen zu halten. In welchem Umfang Messfehler beeinflusst werden können hängt ab

- vom Messverfahren
- von der Sorgfalt und Umsicht des Anwenders
- von der Kenntnis der möglichen Fehlerquellen
- von dem zur Fehlerausschaltung bzw. zur Fehlerkorrektur getriebenen Aufwand.

Die außerordentliche Anwendungsbreite des DMS-Verfahrens bringt zwangsläufig auch eine breite Skala von möglichen Störeinflüssen mit sich. Eine Übersicht über mögliche Fehlerquellen und Störeinflüsse gibt die Tafel 7.0-1. In ihr sind auch die Elemente genannt und erläutert, welche der Begriff „DMS-Messstelle“ umfasst.

Auf Fehlerquellen in den Messverstärkern, Zusatzgeräten u. ä. wird nachstehend nicht eingegangen. Eine wesentliche Methode zur Vermeidung von Messfehlern, das Kalibrieren, ist bereits in Abschnitt 6 abgehandelt. Andere, gerätespezifische Fehlerquellen können wegen der Vielfalt der Geräteausführungen in diesem Rahmen nicht behandelt werden; es sei deshalb auf die zugehörigen Bedienungsanleitungen hingewiesen, in welchen die notwendigen Hinweise zur Vermeidung von Fehlern enthalten sind. Darüberhinaus sind die gerätebedingten Fehler in der Regel von vergleichsweise geringer Bedeutung, sofern nicht Bedienungsfehler vorliegen.

Eine Anzahl der in der Tafel 7.0-1 genannten Störeinflüsse sind in ihren Auswirkungen auf die DMS bereits im Abschnitt 3 besprochen. Dort sind auch schon Empfehlungen gegeben, wie dadurch entstehende Fehler vermieden oder wenigstens vermindert oder korrigiert werden können. Die folgenden Abschnitte beschreiben zunächst Maßnahmen dieser Art.



**Tafel 7.0-1: Mögliche Fehlerquellen und Störeinflüsse auf eine DMS-Messstelle und Erläuterung des Begriffs „Messstelle“**

## 7.1 Temperaturgangkompensation

Ein Temperaturgang kann nur entstehen, wenn sich die Temperatur am Messobjekt, an den Verbindungskabeln und/oder an der übrigen Messeinrichtung während der Messung ändert. „Während der Messung“ bedeutet: zwischen der Aufnahme des Bezugswertes (Nullablesung) und der Aufnahme des Lastmesswertes. Die Ursache eines vom DMS herrührenden Temperaturgangs ist bereits im Abschnitt 3.3.4 beschrieben. Dort werden auch die Wirkungsweise und die Grenzen einer automatischen Temperaturgangkompensation durch selbstkompensierende DMS erklärt.

Einen weiteren, oft nicht unerheblichen Beitrag zum Temperaturgang einer Messstelle können die elektrischen Verbindungen innerhalb der Brückenschaltung liefern. Er tritt besonders dann in Erscheinung, wenn die DMS über längere Kabel untereinander oder mit den Verstärkern verbunden sind. Kompensationsmöglichkeiten schaltungstechnischer Art sind in den folgenden Unterabschnitten beschrieben.

Die Möglichkeit eines Temperaturgangeffektes durch nachgeschaltete Verstärker sei hier nur angedeutet. Ob und in welchem Umfang er auftreten kann, entnehmen man den technischen Daten der Geräte.

Wie schon einleitend festgestellt wurde, kann bei konstanter Temperatur kein Temperaturgang entstehen. Dennoch kann an räumlich ausgedehnten Objekten ein Luftzug vom offenen Fenster oder einer kurzzeitig geöffneten Tür ausreichen, eine Messung völlig durcheinander zu bringen, obwohl eine nur geringfügige Temperaturdifferenz herrscht. In diesem Falle ist weniger der Temperaturgang die Ursache als vielmehr die Verspannung des Objektes infolge ungleichmäßiger Abkühlung. Diese verursacht entsprechende Dehnungen, welche die DMS aufnehmen und anzeigen. Obgleich in einem solchen Falle die DMS-Messwerte korrekt sind, kann deren Interpretation in Bezug auf das Ziel der Messung unmöglich werden. (Siehe auch Abschnitt 8.4.7: Messung von Wärmespannungen.) Hier gilt es, die Fehlerursachen zu beseitigen.

Grundsätzlich sollte man DMS verwenden, die für den jeweiligen Wärmedehnungskoeffizienten des Messobjekt-Werkstoffs selbstkompensierend sind. Wo die Selbstkompensation des DMS aus den im Abschnitt 3.3.4 geschilderten Gründen nicht ausreicht oder ein an den Wärmedehnungskoeffizienten des Messobjekt-Werkstoffs angepasster DMS nicht verfügbar ist, wende man die von der Wheatstone'schen Brückenschaltung gebotenen Kompensationsmöglichkeiten an.

Das Kompensationsprinzip der Brückenschaltung beruht auf der Tatsache, dass gleichsinnige Störsignale, die auf benachbarte Brückenarme einwirken, mit einander entgegengesetztem Vorzeichen an der Brückenverstimmung teilhaben und sich dadurch gegenseitig vermindern und, wenn sie gleichen Betrag haben,

vollständig kompensieren. Die Wirkungsweise wird deutlich, wenn man sich die aus Gl. (5.2-14) hervorgegangene Gl. (7.1-1) ansieht.

$$\varepsilon_a = \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_B} = + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4. \quad (7.1-1)$$

Darin ist  $\varepsilon_a$  der angezeigte Dehnungswert,  $\varepsilon_1$  bis  $\varepsilon_4$  sind die von den Brückenarmen 1 bis 4 gelieferten Dehnungssignale.

Problematisch in Bezug auf den Temperaturgang sind Messungen an inhomogenen Werkstoffen, z. B. an faserverstärkten Kunststoffen. Die Kohlenstoff- und Glasfasern haben einen wesentlich kleineren Ausdehnungskoeffizienten als die sie verbindenden Kunststoffe. Dadurch ergeben sich, insbesondere bei Stücken mit gerichteter Faserlage, in Längs- und Querrichtung unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten mit allen Zwischenwerten in den Richtungen zwischen den beiden Extremen. Die Beträge der Koeffizienten hängen von den beteiligten Werkstoffen ebenso ab wie vom Füllungsgrad. Selbstkompensierende DMS sind für solche Werkstoffe nicht herstellbar. Eine Temperaturgangkompensation mittels Kompensations-DMS kann nur dann befriedigen, wenn dieser unter identischen Bedingungen an einem Stück des gleichen Werkstoffs appliziert ist. Größere Streuwerte der Werkstoffeigenschaften, als bei Metallen üblich, und damit größere Temperaturgang-Restfehler müssen hierbei in Kauf genommen werden.

### 7.1.1 Temperaturgangkompensation bei einfacher Viertelbrückenschaltung

In der experimentellen Spannungsanalyse und in verwandten Anwendungsgebieten werden die DMS fast ausschließlich in der Viertelbrückenschaltung angewandt (Abschn. 5.2, Bild 5.2-2a). Zur Temperaturgangkompensation sind nur die von selbstkompensierenden DMS gebotenen Möglichkeiten nutzbar (s. Abschn. 3.3.4). Der Temperaturgang der Anschlussleitungen, d. h. der Verbindungsleitungen zwischen DMS und der restlichen Brückenschaltung, bleibt jedoch wirksam. Seine Ursache ist die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes der Leiterwerkstoffe. Bei Kupfer beträgt der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes ca. 0,4 %/K (Widerstandszunahme bei steigender Temperatur). Bei den im Hochtemperaturbereich üblichen Werkstoffen (Chrom-Nickel-Legierungen, Platinlegierungen) sind die temperaturabhängigen Widerstandsänderungen noch weitaus größer.

Alle Widerstandsänderungen, die innerhalb der Brückenschaltung auftreten, bewirken eine Brückenverstimmung. Die Brückenschaltung kann nicht unterscheiden zwischen Widerstandsänderungen des DMS und denen der An-

schlussleitungen, die mit dem DMS in Reihe (in Serie) geschaltet sind. Dieser zusätzliche Temperaturgang verfälscht auch die Wirksamkeit selbstkompensierender DMS oder macht sie gar völlig zunichte.

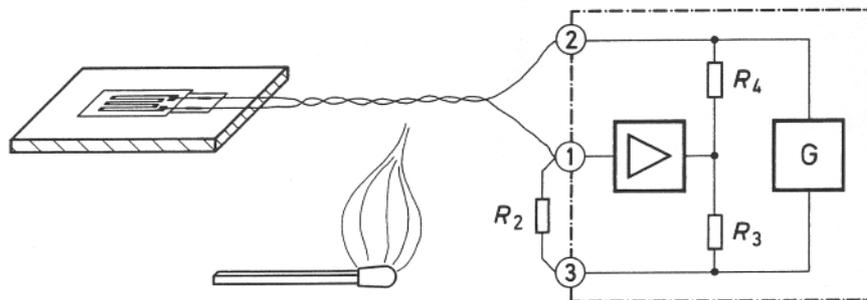
Das Bild 7.1-1 zeigt eine einfache Viertelbrückenschaltung. Durch Erwärmen der Anschlussleitungen entsteht eine Anzeige auch dann, wenn die Applikationsstelle selbst mechanisch und thermisch unbeanspruchst bleibt. Die Anzeige wird positiv im Brückenarm 1; sie wäre negativ im Brückenarm 2.

Ein Beispiel soll das Ausmaß eines kabelbedingten Temperaturgangs verdeutlichen.

#### Beispiel:

Eine Kupferleitung von 1 m Länge (je 0,5 m Hin- und Rückleitung) und  $0,15 \text{ mm}^2$  Querschnitt in Serie mit einem  $120 \text{ }\Omega$ -DMS verursacht bei einer Temperaturänderung von 10 K einen Temperaturgang von  $20 \mu\text{m/m}$ . Bei einem  $350 \text{ }\Omega$ -DMS beträgt der Temperaturgang unter sonst gleichen Bedingungen nur  $7 \mu\text{m/m}$ .

Die einfache Viertelbrückenschaltung gemäß Bild 7.1-1 sollte deshalb nur bei kurzen Leitungen und einigermaßen konstanter Temperatur, z. B. unter Laborbedingungen, angewandt werden. Im Freien verlaufende, längere Leitungen, die während einer Messung Sonnenschein und Regen ausgesetzt sind, können erhebliche Messfehler verursachen.



**Bild 7.1-1: Temperaturgang durch Kabelerwärmung bei der einfachen Viertelbrückenschaltung**

Berechnung des Temperaturgangs durch Kabelerwärmung bei Leitungen, die mit dem DMS in Serie im gleichen Brückenarm liegen.

$\alpha_{\text{MK}}$  = Temperaturgang der Messstelle infolge der Kabelerwärmung

$\alpha_{\text{K}}$  = Temperaturkoeffizient des Kabelleitungswerkstoffs

$$\alpha_{\text{Cu}} \approx 0,004 \frac{\Omega}{\Omega} \cdot \frac{1}{\text{K}}$$

$$Q = \text{Leitfähigkeit des Leitungswerkstoffs} \quad \rho_{\text{Cu}} \approx 0,018 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

- $\Delta\vartheta$  = Temperaturänderung  
 $R_K$  = Kabelwiderstand  
 $\Delta R_K$  = Änderung des Kabelwiderstands  
 $R_{DMS}$  = Widerstand des DMS  
 $k$  = k-Faktor des  
 $l$  = Leitungslänge  
 $A$  = Leiterquerschnitt

$$\alpha_{MK} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R_K}{R_{DMS} + R_K} \quad (7.1-2)$$

$$R_K = \varrho \cdot \frac{l}{A}; \quad \begin{array}{l} l \text{ in m} \\ A \text{ in mm}^2 \end{array} \quad (7.1-3)$$

$$\Delta R_K = R_K \cdot \alpha_K \cdot \Delta\vartheta = \varrho \cdot \frac{l}{A} \cdot \alpha_K \cdot \Delta\vartheta \quad (7.1-4)$$

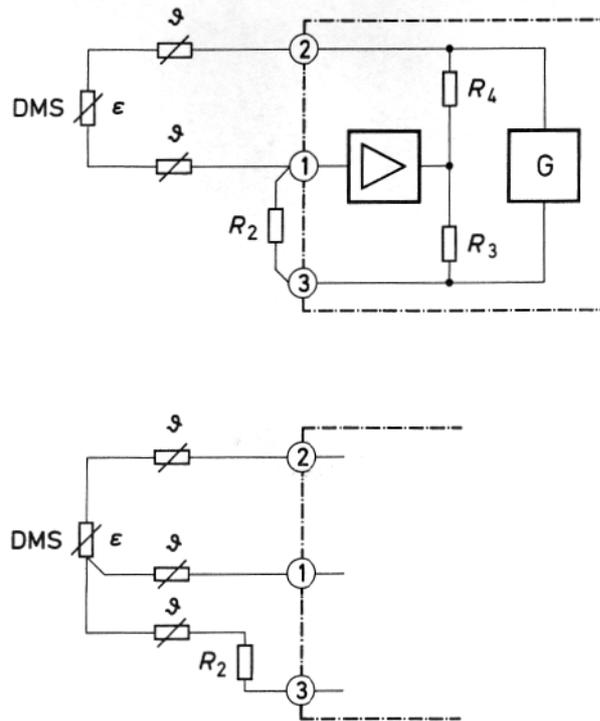
$$\alpha_{MK} = \frac{\varrho \cdot l/A \cdot \alpha_K \cdot \Delta\vartheta}{k (R_{DMS} + \varrho \cdot l/A)} \cdot 10^6 \quad \text{in } \mu\text{m/m} \quad (7.1-5)$$

### 7.1.2 Temperaturkompensation einer Viertelbrücke in Dreileiterschaltung

Die Ausführungen über die Wirkungsweise der Wheatstone'schen Brückenschaltung (Abschn. 5) machen deutlich, dass Widerstandsänderungen, die mit gleichem Vorzeichen in benachbarten Brückenarmen auftreten, die Brückenverstimmung mindern und bei gleichen Beträgen sich gegenseitig aufheben. Diese Eigenart der Brückenschaltung nutzt man in mannigfacher Weise zur Kompensation von Störeffekten, so auch zur Kompensation von Temperaturgängen.

Mit der sogenannten Dreileiterschaltung ist es möglich, die temperaturgangverursachenden Leitungen in benachbarte Brückenarme zu schalten. Das gelingt, wenn man das elektrische Potential der Brückenausgangsspannung unmittelbar am DMS über eine dritte Leitung abgreift und dem Messgerät zuführt (deshalb „Dreileiter-Schaltung“).

Im Bild 7.1-2 ist der einfachen Viertelbrückenschaltung (a) die Dreileiterschaltung (b) gegenübergestellt.



**Bild 7.1-2: Gegenüberstellung von Zweileiter- und Dreileiteranschluss der Viertelbrückenschaltung**

a) Zweileiteranschluss, Hin- und Rückleitung in Serie mit dem DMS

b) Dreileiteranschluss, Hinleitung in Serie mit dem DMS, Rückleitung in Serie

$\text{S}$  - mit dem Ergänzungswiderstand  $R_2$

$\text{---S---}$  - Symbol für den temperaturabhängigen Leitungswiderstand

Zur vollständigen Kompensation ist es erforderlich, dass Hin- und Rückleitung identische physikalische Daten haben (Länge, Querschnitt, Temperaturkoeffizient) und gleichem Temperaturerlebnis auf ihrer gesamten Länge ausgesetzt sind (Leiter in gemeinsamer Hülle, z. B. dreiadriges Kabel). Vorsicht! Äußerlich gleichartig erscheinende Adern können unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten haben, wenn sie nicht aus gleicher Fertigung stammen. Die 2. (Potential-) Leitung führt zu dem sehr hochohmigen Verstärkereingang; ihr Eigenwiderstand und dessen kleine Veränderungen haben infolgedessen keinen störenden Einfluss auf die Messung.

Die Dreileiterschaltung ist bei Gleichspannungspeisung der Brückenschaltung und bei Leitungen von wenigen Metern Länge auch bei Trägerfrequenzspeisung anwendbar. Bei großen Leitungslängen und Speisung mit höherfrequenter Speisespannung (z. B. 5 kHz Trägerfrequenz) kann kapazitive Unsymmetrie Probleme verursachen (erkennbar an der Aussteuerungskontrolle der TF-Messverstärker). Hierüber siehe Abschnitt 7.4

### 7.1.3 Temperaturgangkompensation einer Viertelbrücke mit Kompensations-DMS

Eine sehr gute Kompensation der Wärmedehnung wird bei Viertelbrückenschaltungen durch die Anwendung von Kompensations-DMS erreicht.

Die Kompensations-DMS unterscheidet sich von messenden (aktiven) DMS allein durch seine Funktion innerhalb der Messschaltung. Im übrigen muss er die gleichen physikalischen Eigenschaften besitzen wie der messende DMS. Er sollte deshalb der gleichen DMS-Packung bzw. dem gleichen Produktionslos entstammen wie jener.

Es ist zwar nicht unbedingt notwendig, aber durchaus zweckmäßig, für den messenden und den Kompensations-DMS selbstkompensierende DMS zu verwenden, insbesondere dann, wenn die nachstehend genannten Forderungen nicht voll erfüllt werden können. Weitere Forderungen sind:

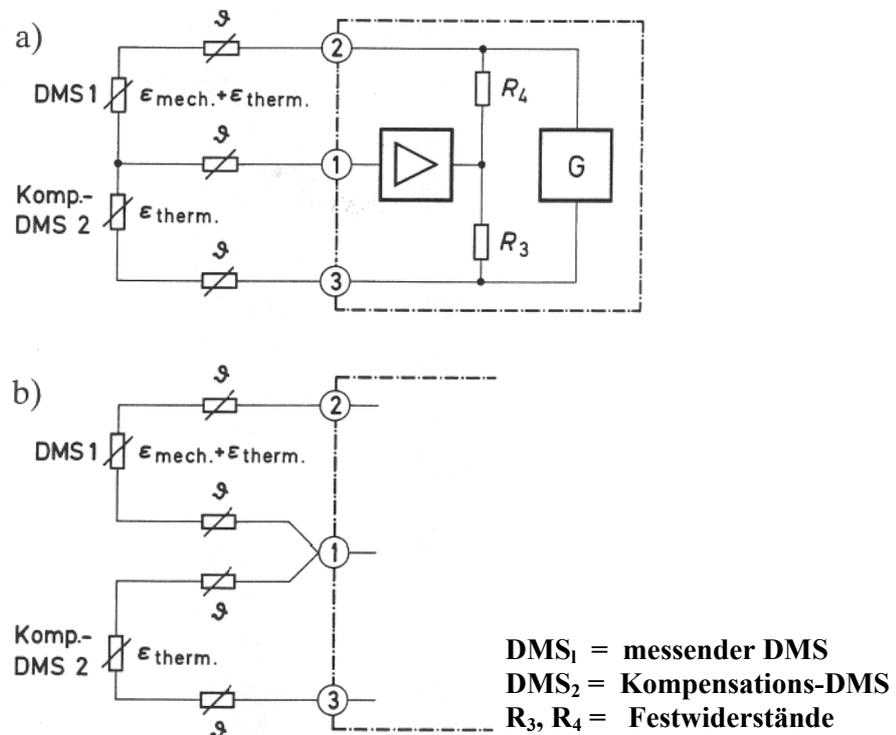
Der Kompensations-DMS muss an einer mechanisch unbeanspruchten Stelle des Messobjekts appliziert werden und dort die gleichen zeitlichen und betragsmäßigen Temperaturvariationen erleben wie der messende DMS. Eine solche Stelle ist an einem Messobjekt zuweilen nur schwer oder überhaupt nicht zu finden. Man kann den Kompensations-DMS dann auch an ein Stück des gleichen Werkstoffs, aus welchem das Messobjekt besteht, applizieren (ein Stückchen Blech oder ein Klötzchen) und es in Wärmekontakt mit dem Messobjekt bringen. Der Wärmekontakt kann durch einfaches Auflegen, durch teilweises Ankleben oder auch mechanisches Befestigen, etwa an einer Ecke oder Kante mittels Schraube oder Schweißpunkt, hergestellt werden. Auf das Kompensationsstück darf keine mechanische Beanspruchung vom Messobjekt übertragen werden und es darf sich auch nicht, etwa infolge von Eigenspannungen, bei Temperatureinwirkungen verziehen. Es muss auch steif genug sein, damit es bei Erschütterungen nicht anfängt zu schwingen. Solches Eigenleben würde Messfehler verursachen.

Die Wärmekapazität (das Volumen) des Kompensationsstücks sollte klein sein, damit seine Temperatur derjenigen des Messobjekts bei Veränderungen möglichst schnell folgt. Erst nach dem Temperatúrausgleich ist die Kompensation wieder vollständig. Bei kleinen Krümmungsradien der Messstelle beachte man die Ausführungen des Abschnitts 3.3.4 und Sorge auch in dieser Hinsicht für Übereinstimmung zwischen Messobjekt und Kompensationsstück.

Elektrisch geschaltet werden messender und kompensierender DMS als Wheatstone'sche Halbbrücke (Abschn. 5.2 und Bild 5.2-2b), mit  $R_1$  als messendem DMS und  $R_2$  als Kompensations-DMS, Bild 7.1-3. Messtechnisch ist dies eine Viertelbrückenschaltung, schaltungstechnisch eine Halbbrückenschaltung. Man beachte den funktionellen Unterschied! Die Schaltungsart

- a) findet Anwendung, wenn der Kompensations-DMS in nächster Nähe des messenden DMS angebracht werden kann. Die Form
- b) wendet man an, wenn der Kompensations-

DMS entfernt vom messenden DMS appliziert wird. Sie wird auch benutzt, wenn mehrere messende DMS nacheinander, z. B. über einen Messstellen-Umschalter, mit einem gemeinsamen Kompensations-DMS betrieben werden. Die Temperaturangeffekte der Anschlussleitungen kompensieren sich, wenn die im Abschn. 7.1.2 für die Dreileiterschaltung geforderten Bedingungen auch hier eingehalten sind.



**Bild 7.1-3: Schaltung mit Kompensations-DMS**  
a) und b) : alternative Anschlussmöglichkeiten

An einem Beispiel soll die Kompensation der Wärmedehnung erläutert werden. Der DMS 1 liefert als Dehnungssignal  $\varepsilon_1$  die Summe aus der mechanischen Dehnung  $\varepsilon_{\text{mech}}$  und der Wärmedehnung  $\varepsilon_{\text{therm}}$ . Der Kompensations-DMS 2 liefert als Dehnungssignal  $\varepsilon_2$  nur die Wärmedehnung  $\varepsilon_{\text{therm}}$  des Kompensationsstücks.

$$\varepsilon_a = \underbrace{(\varepsilon_{\text{mech}} + \varepsilon_{\text{therm}})}_{\varepsilon_1} - \underbrace{(\varepsilon_{\text{therm}})}_{\varepsilon_2}.$$

Die Brückenarme  $R_3$ ,  $R_4$  sind durch Festwiderstände ersetzt. Deren Beitrag zum Gesamtsignal  $\varepsilon_a$  in Gl. (7.1-1) ist null, so dass sich der Ausdruck verkürzt auf

$$\varepsilon_a = \varepsilon_1 - \varepsilon_2. \quad (7.1-6)$$

Der angezeigte Messwert  $\epsilon_a$  entspricht damit allein der durch mechanische Beanspruchung des Messobjekts verursachten Dehnung  $\epsilon_{\text{mech}}$ .

Bei richtig angewendetem Kompensations-DMS werden auch die unvermeidlichen Temperaturgangreste selbstkompensierender DMS vollständig beseitigt (s. Bilder 3.3-10 und 3.3-11).

#### 7.1.4 Temperaturgangkompensation bei der Zweiviertel- oder Diagonalbrücke

Die Bezeichnung Zweiviertelbrücke kennzeichnet besser als die Bezeichnung Diagonalbrücke die Funktionsweise der Schaltung nach Bild 7.1-4. Jede der Brückenhälften 2-1-3 und 2-4-3 besteht messtechnisch aus einer Viertelbrücke mit Ergänzungswiderstand gemäß Bild 7.1-4a oder alternativ aus einer Viertelbrücke mit Kompensations-DMS gemäß Bild 7.1-4b. Schaltungstechnisch handelt es sich zwar um eine Vollbrückenschaltung, in der Funktion darf sie jedoch mit dieser nicht verwechselt werden.

Zur Kompensation der durch die Anschlussleitungen verursachten Temperaturgänge wird im Bild 7.1-4a die Dreileiterschaltung nach Abschn. 7.1.2 und im Bild 7.1-4b die Kompensationsschaltung nach Abschn. 7.1.3 angewandt.

Der Messwert  $\epsilon_a$  setzt sich bei Verwendung von Festwiderstände für  $R_2$ ,  $R_4$  zusammen zu

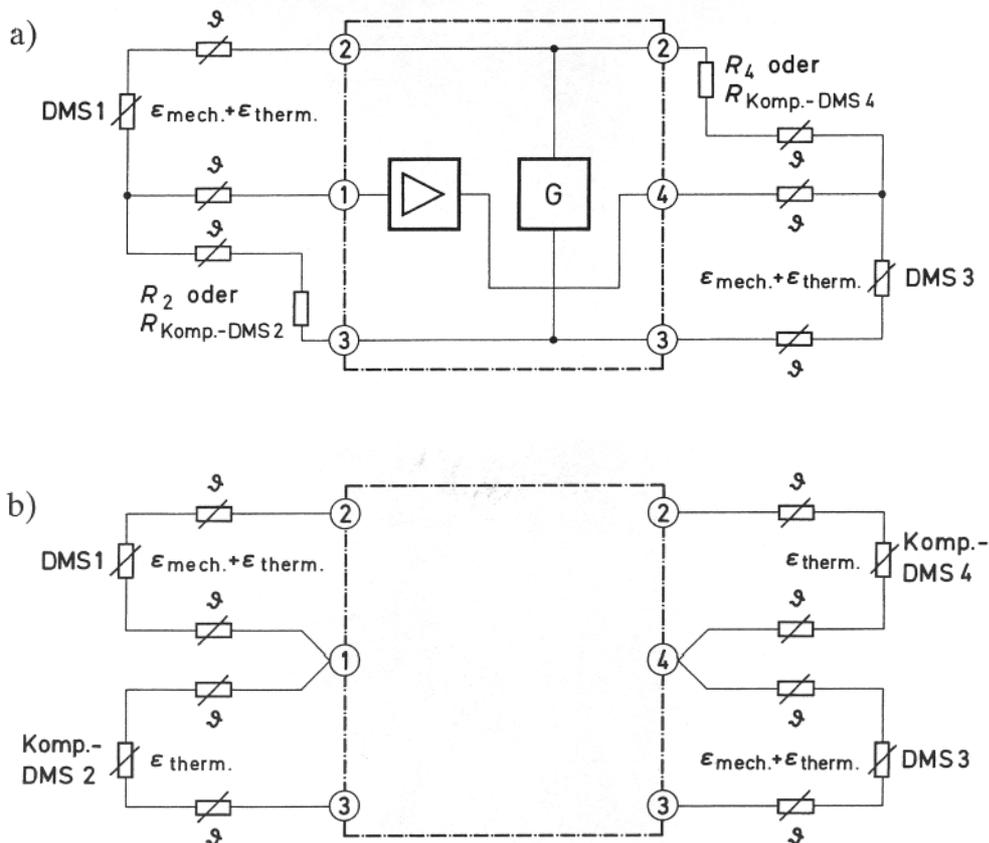
$$\epsilon_a = \underbrace{(\epsilon_{\text{mech } 1} + \epsilon_{\text{therm } 1})}_{\epsilon_1} - \underbrace{\text{null}}_{\epsilon_2} + \underbrace{(\epsilon_{\text{mech } 3} + \epsilon_{\text{therm } 3})}_{\epsilon_3} - \underbrace{\text{null}}_{\epsilon_4}.$$

Die Schaltung liefert die Summe der mechanischen Dehnungen  $\epsilon_1$  plus  $\epsilon_3$ . Die Wärmedehnungen müssen durch Verwendung selbstkompensierender DMS und unter Beachtung der für deren Funktion geltenden Bedingungen ausgeschieden werden (s. Abschn. 7.1.1 und 7.1.2). Bei Verwendung von Kompensations-DMS für  $R_2$ ,  $R_4$  wird

$$\epsilon_a = \underbrace{(\epsilon_{\text{mech } 1} + \epsilon_{\text{therm } 1})}_{\epsilon_1} - \underbrace{(\epsilon_{\text{therm } 2})}_{\epsilon_2} + \underbrace{(\epsilon_{\text{mech } 3} + \epsilon_{\text{therm } 3})}_{\epsilon_3} - \underbrace{(\epsilon_{\text{therm } 4})}_{\epsilon_4}.$$

Hält man die im Abschnitt 7.1.3 beschriebenen Voraussetzungen ein, dann ergibt sich eine sehr gute Temperaturgangkompensation.

Die Zweiviertel-Brücke wird relativ selten angewendet.



**DMS 1 und DMS 3 sind messende DMS**

**R<sub>2</sub> und R<sub>4</sub> sind Ergänzungswiderstände oder Kompensations-DMS**

**Bild 7.1-4: Zweiviertel- oder Diagonalbrücke**  
 a) in Dreileiterschaltung  
 b) mit Kompensations-DMS

### 7.1.5 Temperaturgangkompensation bei der Halbbrückenschaltung

Die Temperaturgangkompensation durch die Halbbrückenschaltung funktioniert in genau der gleichen Weise wie mit dem Kompensations-DMS. Es müssen die gleichen Voraussetzungen erfüllt sein. Sie unterscheidet sich von derjenigen mit Kompensations-DMS nur dadurch, dass der DMS im Brückenarm 2 nicht an einer mechanisch unbelasteten Stelle appliziert sein muss, sondern an der Messung der mechanischen Dehnung beteiligt ist. Alle übrigen Bedingungen, die für den Kompensations-DMS genannt sind, gelten auch hier. In den Schaltbildern 7.1-3a und b denke man sich den Kompensations-DMS  $R_2$  durch einen messenden DMS ersetzt.

Der Messwert, die angezeigte Dehnung  $\varepsilon_a$ , setzt sich zusammen gemäß dem Ausdruck

$$\varepsilon_a = \underbrace{(\varepsilon_{\text{mech } 1} + \varepsilon_{\text{therm } 1})}_{\varepsilon_1} - \underbrace{(\varepsilon_{\text{mech } 2} + \varepsilon_{\text{therm } 2})}_{\varepsilon_2}.$$

Die Wärmedehnungen  $\varepsilon_{\text{therm } 1}$  und  $\varepsilon_{\text{therm } 2}$  kompensieren einander, wenn die Voraussetzungen erfüllt sind. Die mechanischen Dehnungen werden sich bei entgegengesetzten Vorzeichen addieren, bei gleichen Vorzeichen subtrahieren:

$$\varepsilon_a = (+ \varepsilon_{\text{mech } 1}) - (- \varepsilon_{\text{mech } 2}) = \varepsilon_{\text{mech } 1} + \varepsilon_{\text{mech } 2},$$

$$\varepsilon_a = (+ \varepsilon_{\text{mech } 1}) - (+ \varepsilon_{\text{mech } 2}) = \varepsilon_{\text{mech } 1} - \varepsilon_{\text{mech } 2}.$$

Die Anwendung der Halbbrückenschaltung ist nur dann angebracht, wenn die Anteile der Dehnungen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  am Gesamtsignal  $\varepsilon_a$  nach Betrag und Vorzeichen bekannt sind, z. B. bei reiner Normalbeanspruchung oder reiner Biegebeanspruchung eines Messobjekts mit symmetrischem Querschnitt (hierzu siehe Abschnitt 8).

Zwecks Kompensation der Temperaturgeffekte der Anschlussleitungen achte man auf die Symmetrie der Leitungen 2 und 3 hinsichtlich ihrer Länge, ihres ohmschen Widerstandes, ihres Temperaturkoeffizienten und ihres Temperaturlebens (s. auch Abschn. 7.1.1 und 7.1.2).

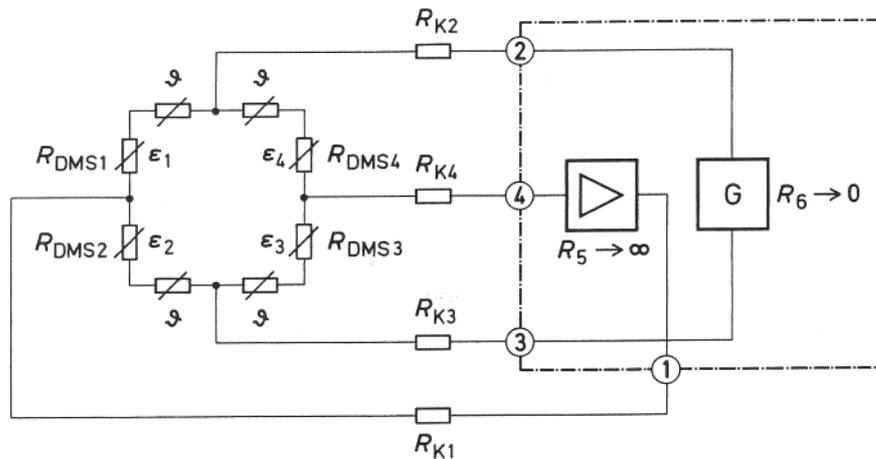
### 7.1.6 Temperaturgangkompensation bei der Vollbrückenschaltung

Die Vollbrückenschaltung Bild 7.1-5 wird vornehmlich im Messwertaufnehmerbau und zu artverwandten Messungen angewandt. Bei ihr sind alle vier Brückenarme mit messenden DMS besetzt und räumlich in enger Nachbarschaft angeordnet. Deshalb sind die brückeninternen Verbindungsleitungen, welche einen unerwünschten Beitrag zum Temperaturgang leisten, sehr kurz und in ihrer Fehlerwirkung entsprechend klein. Wenn sehr hohe Genauigkeit verlangt wird, sollten diese Verbindungen in den vier Brückenarmen einander im Querschnitt und in der Länge möglichst genau übereinstimmen.

Die Wärmedehnung des Messobjekts wirkt auf alle vier DMS in gleicher Weise ein, wodurch sich eine sehr gute Temperaturgangkompensation ergibt. Das Messsignal  $\varepsilon_a$  besteht aus der arithmetischen Summe der von den vier DMS erfassten Einzeldehnung  $\varepsilon_1$  bis  $\varepsilon_4$ :

$$\varepsilon_a = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4.$$

Sollte das Messobjekt ungleichmäßig erwärmt sein, z. B. durch einseitige Wärmestrahlung, dann versuche man, durch Kapselung in wärmeisolierende Massen, Abschirmung der Wärmestrahlung oder andere geeignete Maßnahmen einen Temperatursgleich herbeizuführen.



**Bild 7.1-5: Vollbrückenschaltung Erläuterungen im Text**

Die im Bild 7.1-5 gezeichneten Brückenausgleichsleitungen (Signalleitungen) mit den Leitungswiderständen  $R_{K1}$  und  $R_{K4}$  haben weder auf den Temperaturgang noch auf das Messsignal einen Einfluss. Die beiden Brückenspeiseleitungen mit den Leitungswiderständen  $R_{K1}$  und  $R_{K4}$  haben auf den Temperaturgang ebenfalls keinen Einfluss; ihr Einfluss auf das Messsignal bzw. den Messwert ist im Abschnitt 7.2 behandelt.

Zur Spannungsanalyse ist die Vollbrückenschaltung nur dann anwendbar, wenn die Dehnungsverteilung auf die einzelnen DMS entsprechend ihrem Vorzeichen und dem Verhältnis zueinander genau bekannt sind, z. B. beim Biegestab mit symmetrischem Biegequerschnitt und beim Zug- bzw. Druckstab (hierzu Abschnitt 8). Für alle Fälle mit unbekannter Dehnungsverteilung muss die Viertelbrückenschaltung angewandt werden.

## 7.2 Der Einfluss der Leitungswiderstände

Der Widerstand der Anschlussleitungen zwischen den DMS und den Eckpunkten der Brückenschaltung (das sind die in den nachfolgenden Schaltbildern mit 1 und 4 bezifferten Verbindungsstellen der Brückenschaltung) können bei den asymmetrischen Schaltungen (einfache Viertelbrücke, Zweiviertel- oder Diagonalbrücke) schon eine so große Brückenverstimmung erzeugen, dass sie mit der Justiereinrichtung (dem R-Abgleich) des angeschlossenen Messverstär-

kers nicht mehr korrigiert werden kann und der Verstärker schon zum großen Teil ausgesteuert oder gar übersteuert wird. In einem solchen Fall muss der Widerstand des benachbarten Ergänzungswiderstandes ( $R_2$  bei der Viertelbrücke,  $R_2$  und  $R_4$  bei der Zweiviertelbrücke) entsprechend vergrößert werden. Als Ergänzungswiderstände eignen sich nur hochstabile Metallschichtwiderstände.

Auf einen zweiten Einfluss der Leitungswiderstände wurde bereits im Abschnitt 6 (Kalibrieren) hingewiesen: die Widerstände der Verbindungsleitungen mindern den vom DMS aufgenommenen Messwert. Dort sind auch Maßnahmen beschrieben, wie durch spezielle Kalibrieremethoden dieser Fehler eliminiert werden kann (Abschn. 6.3). Wenn die Möglichkeit geboten ist und hinreichend genaue Shuntwiderstände verfügbar sind, kann die Shuntkalibrierung als die sicherste Methode zur Verminderung von Messfehlern gelten. Wird Vielstellentechnik angewandt, dann ermöglicht die Shuntkalibrierung gleichzeitig, die Zuordnung des DMS zur Schalterposition des Messstellenumschalters zu überprüfen. Scheidet das Kalibrieren aus, dann müssen Kabeinflüsse korrigiert werden. Die folgenden Ausführungen setzen Konstantspannungspeisung voraus.

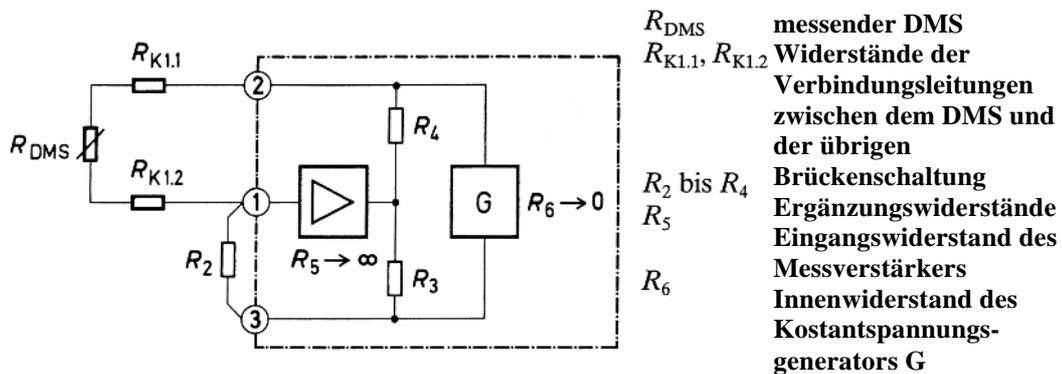
In Schaltbildern werden die Verbindungen zwischen den einzelnen Schaltungselementen als widerstandsfrei angesehen. In der Realität ist diese Betrachtungsweise nur bedingt zulässig, nämlich nur dann, wenn die Kabel kurz und ihr Widerstand um wenigstens zwei oder drei Größenordnungen kleiner ist als der des DMS bzw. der Brückenschaltung und deshalb vernachlässigt werden kann. Die Voraussetzung trifft bei langen Kabelverbindungen jedoch nicht mehr zu. Bei Verwendung dünner Kabeladern oder von Leitungen aus Werkstoffen mit hohem spezifischen Widerstand (z. B. im Hochtemperaturbereich) können schon ziemlich kurze Kabelstrecken zu beachtlichen Messfehlern führen. Maßgeblich ist nicht die Länge des Kabels, sondern dessen Widerstand.

Die Abschnitte 7.2.1 bis 7.2.6 enthalten die Gleichungen zur rechnerischen Korrektur der Messwerte für die verschiedenen Schaltungen, der Abschnitt 7.2.7 enthält die Gleichungen zur Fehlerkorrektur mittels des k-Faktor-Wählers am Messverstärker.

Über den Einfluss von Übergangswiderständen in Schleifringübertragern siehe Abschnitt 8.4.4.1.

### 7.2.1 Einfache Viertelbrückenschaltung

Auf welche Weise der Widerstand der Anschlussleitungen das Signal eines DMS vermindert, soll zunächst an der einfachen Viertelbrückenschaltung, Bild 7.2.-1, erläutert werden. Der DMS bildet zusammen mit den Anschlussleitungen den Brückenarm 1; die Festwiderstände  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  vervollständigen die Brückenschaltung.



**Bild 7.2-1: Einfluss der Kabelwiderstände bei der einfachen Viertelbrückenschaltung**

Der Widerstand des Brückenarms 1 setzt sich zusammen aus den Einzelwiderständen des DMS ( $R_{DMS}$ ), der Hinleitung ( $R_{K1.1}$ ) und der Rückleitung ( $R_{K1.2}$ ). Bei der Dehnungsmessung mit DMS geht man zunächst davon aus, dass die Brückenverstimmung ein Maß für die Dehnung ist gemäß Gl. (5.2-16):

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{DMS} \quad (7.2-1)$$

Die relative Widerstandsänderung des DMS ist der verursachenden Dehnung proportional:

$$\frac{\Delta R_{DMS}}{R_{DMS}} = \varepsilon \cdot k. \quad (7.2-2).$$

Nun „sieht“ im vorgegebenen Fall (Bild 7.2-1) die Brückenschaltung die Widerstandsänderung  $4R$  des DMS relativ zum Gesamtwiderstand des Brückenarms 1 und damit eine kleinere relative Widerstandsänderung:

$$\frac{\Delta R_{DMS}}{R_{K1.1} + R_{DMS} + R_{K1.2}} < \varepsilon \cdot k. \quad (7.2-3)$$

Deshalb wird das Messsignal zu klein.

Ein Beispiel soll eine Vorstellung von der Größenordnung des Einflusses des Kabelwiderstandes auf das Messergebnis vermitteln.

#### Beispiel:

Ein Kabel von 100 m Länge (2 Adern je 100 m) mit einem Aderquerschnitt von  $0,5 \text{ mm}^2$  Kupfer verursacht bei der Viertelbrückenschaltung (Kabelwiderstände in Serie mit dem DMS-Widerstand) einen Messfehler von

- 5,8 % bei einem DMS-Widerstand von 120  $\Omega$ ,
- 1,8 % bei einem DMS-Widerstand von 350  $\Omega$ ,
- 1,2 % bei einem DMS-Widerstand von 600  $\Omega$ .

Bei einem Aderquerschnitt von  $0,14 \text{ mm}^2$  erreichen die Messfehler gar

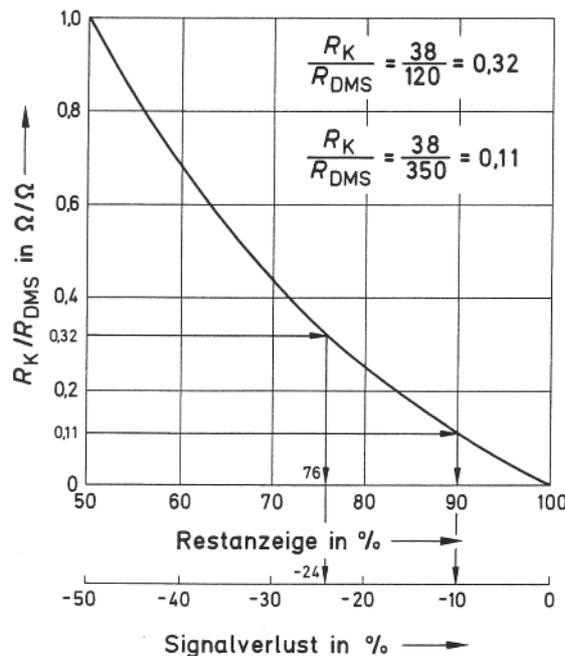
- 17,5 % bei einem  $120 \Omega$ ,
- 6,8 % bei einem  $350 \Omega$ ,
- 3,7 % bei einem  $600 \Omega$ .

Das falsche Ergebnis lässt sich leicht mit Hilfe des Diagramms Bild 7.2.-2 korrigieren nach der Beziehung

$$\varepsilon = \varepsilon_a \frac{100 \%}{\text{Restanzeige \%}} \quad (7.2-4)$$

Darin ist  $\varepsilon$  der richtige Messwert und  $\varepsilon_a$  der angezeigte (falsche) Messwert. Der Prozentsatz der Restanzeige bzw. des Signalverlustes (Fehlers) ist dem Diagramm zu entnehmen.

Im Bild 7.2-2 sind zwei Beispiele zur Erläuterung der Handhabung des Diagramms eingetragen.



**Bild 7.2-2: Diagramm zur Ermittlung der Restanzeige bzw. des Signalverlustes infolge von Leitungswiderständen. Erläuterungen im Text.**

Zunächst bilde man das Verhältnis  $R_K/R_{DMS}$  und suche den Zahlenwert an der Ordinatenskala auf. Von diesem Punkt gehe man waagrecht nach links bis zur Kurve und von dort senkrecht nach unten bis zur Abszissenachse. Dort lese man den Prozentsatz der Restanzeige ab und setze ihn im Nenner der Gl. (7.2-4) ein.

Als  $\varepsilon_a$  gilt immer der angezeigte, unkorrigierte Messwert, als  $R_K$  der gesamte, innerhalb des Brückenarms mit dem DMS in Serie liegende Leitungswiderstand. Die Genauigkeit der Korrektur hängt wesentlich von der Genauigkeit ab, mit der die Kabelwiderstände gemessen wurden.

Bei großer Länge der Anschlusskabel ist es möglich, dass der Gesamtwiderstand  $R_{DMS} + R_{K1.1} + R_{K1.2}$  des Brückenarms 1 so groß wird, dass die Justiermöglichkeiten des Messverstärkers zum Nullpunktgleich nicht mehr ausreichen. Dann muss der Ergänzungswiderstand  $R_2$  angepasst werden. Die Erhöhung von  $R_2$  auf den Gesamtwiderstand  $R_1$  hat keinen nachteiligen Einfluss auf das Messergebnis. Es ist auch möglich, den Messwert  $\varepsilon_a$  rechnerisch zu korrigieren. Für die einfache Viertelbrückenschaltung gilt die Gleichung

$$\varepsilon = \varepsilon_a \frac{R_{K1.1} + R_{DMS} + R_{K1.2}}{R_{DMS}}. \quad (7.2-5)$$

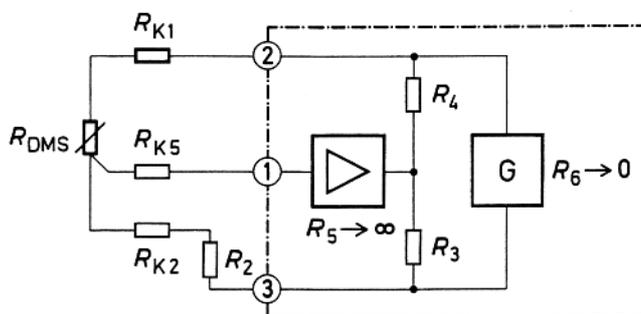
Im Bild 7.2-1 sind die zur Korrektur heranzuziehenden Widerstände fett gezeichnet. Für beide Korrekturverfahren müssen die Widerstandswerte der in Betracht kommenden Leitungen und des DMS bekannt sein, erstere durch Messung, letzterer ist dem Datenblatt der DMS-Packung zu entnehmen.

### 7.2.2 Viertelbrücke in Dreileiterschaltung

Bei der Viertelbrücke in Dreileiterschaltung (Bild 7.2-3) liegt nur die Hinleitung in Serie mit dem DMS. Demzufolge hat hier nur der Widerstand  $R_{K1}$  Einfluss auf das Messsignal des DMS 1. Die Korrekturgleichung lautet:

$$\varepsilon = \varepsilon_a \frac{R_{DMS} + R_{K1}}{R_{DMS}}. \quad (7.2-6)$$

In die Korrekturgleichung sind die Zahlenwerte der im Bild 7.2.3 fett gezeichneten Widerstände einzusetzen.



Bezeichnungen wie im Bild 7.2-1.

**Bild 7.2.-3: Einfluss der Kabelwiderstände bei der Viertelbrückenschaltung mit Dreileiteranschluss des DMS.**

Die Rückleitung mit  $R_{K2}$  liegt im passiven Brückenweig  $R_2$  und hat deshalb keinen Einfluss auf das Messergebnis.

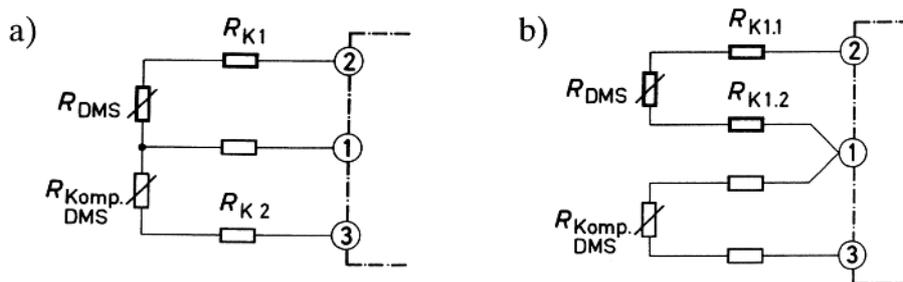
Der Widerstand  $R_{K5}$  der Signalleitung kann vernachlässigt werden, wenn der Eingangswiderstand des Verstärkers,  $R_5$ , wenigstens das Tausendfache des DMS-Widerstandes erreicht. Moderne Messverstärker erfüllen diese Forderung.

Die Fehlerkorrektur kann auch mit Hilfe des Diagramms Bild 7.2-2 durchgeführt werden.

### 7.2.3 Viertelbrücke mit Kompensations-DMS

Das Bild 7.2-4 zeigt zwei Varianten einer Viertelbrückenschaltung mit Kompensations-DMS:

- Messender DMS und Kompensations-DMS in räumlich benachbarter Anordnung. Dazu gehört die Korrekturgleichung (7.2-6).
- Messender DMS und Kompensations-DMS in räumlich getrennter Anordnung. Dazu gehört die Korrekturgleichung (7.2-5).



**Bild 7.2-4: Viertelbrückenschaltung mit Kompensations-DMS**

- Messender DMS und Kompensations-DMS in benachbarter Anordnung.
  - Messender DMS und Kompensations-DMS in getrennter Anordnung.
- Die für die Fehlerkorrektur zu berücksichtigenden Widerstände sind fett gezeichnet.

Die Schaltung **a)** wendet man an, wenn der Kompensations-DMS in nächster Nähe zum messenden DMS angeordnet wird. Die Schaltung **b)** wird angewandt, wenn zwischen dem messenden DMS und dem Kompensations-DMS ein größerer Abstand herrscht. Sie ist auch üblich bei Vielstellen-Messanlagen, wenn der gleiche Kompensations-DMS nacheinander mehreren messenden DMS zugeschaltet wird.

Für beide Schaltungen kann die Fehlerkorrektur auch mit dem Diagramm Bild 7.2-1 durchgeführt werden.

## 7.2.4 Zweiviertel- oder Diagonalbrücke

Im Bild 7.2-5 sind zwei Varianten der Zweiviertelbrückenschaltung gezeichnet:

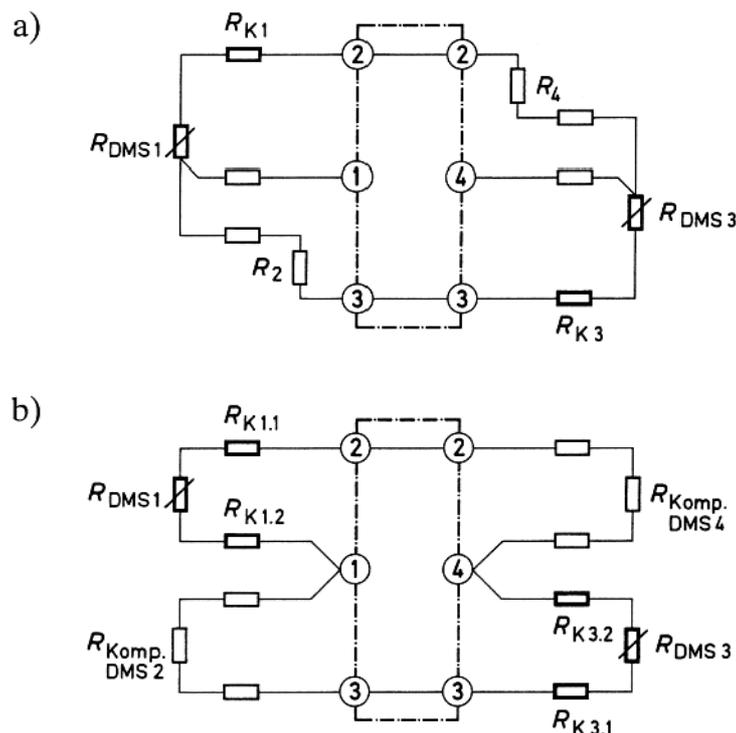
- a) Zweiviertelbrückenschaltung mit den messenden DMS 1 und DMS 3 jeweils in Dreileiterschaltung zusammen mit den Ergänzungswiderständen  $R_2$  und  $R_4$ . Die zugehörige Korrekturgleichung lautet:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_3 = \varepsilon_a \frac{R_{K1} + R_{DMS1} + R_{DMS3} + R_{K3}}{R_{DMS1} + R_{DMS3}}. \quad (7.2-7)$$

Werden anstelle der Festwiderstände Kompensations-DMS in benachbarter Anordnung verwendet (analog zu Bild 7.2-4a), dann gilt die gleiche Korrekturformel.

- b) Werden die Kompensations-DMS getrennt angeordnet (analog zu Bild 7.2-4b), dann lautet die Korrekturgleichung

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_3 = \varepsilon_a \frac{R_{K1.1} + R_{DMS1} + R_{K1.2} + R_{K3.1} + R_{DMS3} + R_{K3.2}}{R_{DMS1} + R_{DMS3}}. \quad (7.2-7)$$



**Bild 7.2-5: Zweiviertel- oder Diagonalbrückenschaltung**

a) Zweiviertelbrücke in Dreileiterschaltung

b) Zweiviertelbrücke mit getrennter Anordnung der Kompensations-DMS

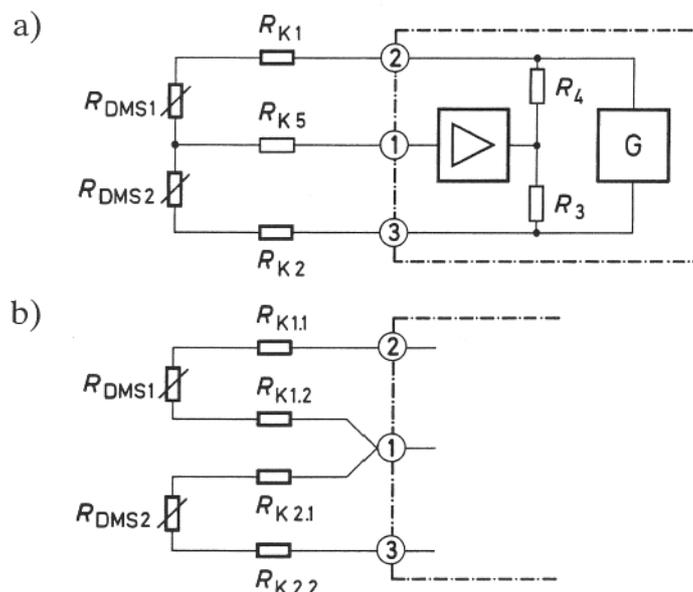
### 7.2.5 Halbbrückenschaltung

Die Halbbrückenschaltung nach Bild 7.2-6 enthält zwei messende DMS; sie unterscheidet sich dadurch von der Viertelbrückenschaltung nach Bild 7.2-4. Im Bild 7.2-6 sind wieder zwei Varianten dargestellt. Der Fall **a)** kennzeichnet die Situation bei eng benachbarter Anordnung der beiden DMS. Die zugehörige Korrekturformel lautet.

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_a \frac{R_{K1} + R_{DMS1} + R_{DMS2} + R_{K2}}{R_{DMS1} + R_{DMS2}}. \quad (7.2-9)$$

Der Fall **b)** gilt, wenn die beiden DMS in einigem Abstand voneinander angeordnet sind, was bei größeren Messobjekten vorkommen kann. Hier lautet die Korrekturformel

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_a \frac{R_{K1.1} + R_{DMS1} + R_{K1.2} + R_{K2.1} + R_{DMS2} + R_{K2.2}}{R_{DMS1} + R_{DMS2}}. \quad (7.2-10)$$



**Bild 7.2-6: Halbbrückenschaltung**

**a) eng benachbarte Anordnung der DMS**

**b) Anordnung der DMS in einigem Abstand voneinander.**

### 7.2.6 Vollbrückenschaltung

Die Vollbrückenschaltung wird wegen ihrer günstigen Eigenschaften - größeres Messsignal, automatische Kompensation von Störeffekten - vorzugsweise im Messgrößenaufnehmerbau angewandt. Ihre Vorteile kommen besonders zur

Geltung, wenn die brückeninternen Verschaltungen kurz und symmetrisch ausgeführt sind. Unter dieser Voraussetzung bleiben die Widerstände der brückeninternen Verbindungsleitungen vernachlässigbar klein und bedürfen keiner besonderen Berücksichtigung. Statt ihrer sind die Widerstände der Verbindungskabel zwischen dem Messverstärker und dem Aufnehmer zu beachten, und zwar die beiden Adern für die Brückenspeisung mit ihren Widerständen  $R_{K2}$  und  $R_{K3}$ , Bild 7.2-7. Die Widerstände der Signalleitungen 1 und 4 haben, wie auch in allen vorangegangenen Beispielen, keinen

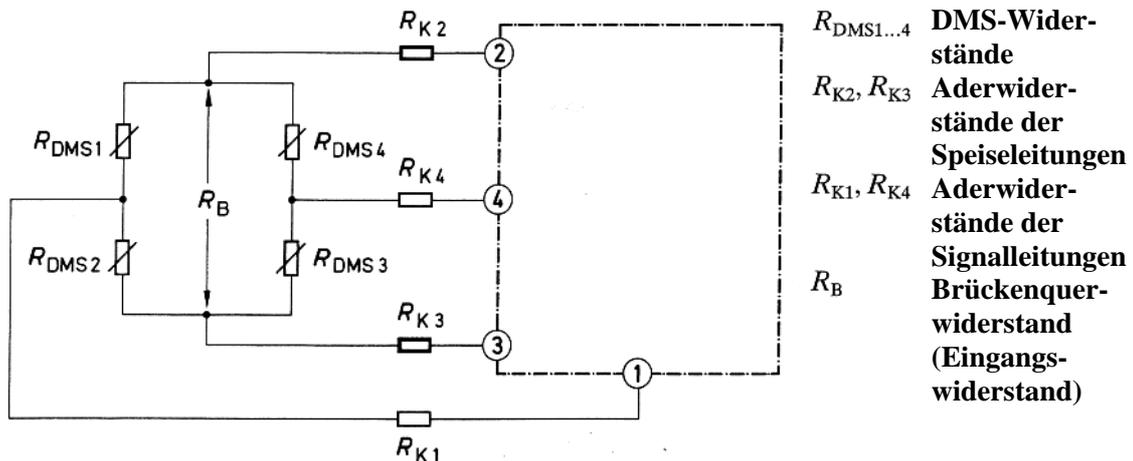


Bild 7.2-7: Vollbrückenschaltung

Die Korrekturgleichung lautet

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \varepsilon_a \frac{R_{K2} + R_B + R_{K3}}{R_B}. \quad (7.2-11)$$

$R_B$  bezeichnet den Brücken-Querwiderstand (Eingangswiderstand).

$$R_B = \frac{(R_{DMS1} + R_{DMS2}) \cdot (R_{DMS3} + R_{DMS4})}{R_{DMS1} + R_{DMS2} + R_{DMS3} + R_{DMS4}}. \quad (7.2-12)$$

Wenn alle DMS-Widerstände untereinander gleich sind, was vorauszusetzen ist, dann wird der Brückenquerwiderstand (Brückeneingangswiderstand) gleich dem DMS-Widerstand.

Bei Messungen mit Messgrößenaufnehmern in Vollbrückenschaltung sollte das im Abschnitt 6.4 beschriebene Kalibrierverfahren mit einem Kalibriergerät als einfachere und auch meist bessere Methode in Betracht gezogen werden.

### 7.2.7 Fehlerkorrektur mit dem k-Faktor-Wähler

Es gibt noch eine andere Möglichkeit, den Einfluss der Kabelwiderstände zu eliminieren, wenn der verwendete Messverstärker einen k-Faktor-Wähler besitzt (s. Abschnitt 6.1 und 6.5).

Der durch den Kabelwiderstand entstehende Signalverlust kann als scheinbar verminderter k-Faktor des DMS aufgefasst werden. Stellt man den k-Faktor-Wähler auf den Zahlenwert des verminderten k-Faktors  $k^*$  ein, dann erhöht sich der Verstärkungsgrad des Messverstärkers entsprechend, so dass der angezeigte Dehnungswert wieder stimmt. Für die verschiedenen Schaltungen gelten die nachstehenden Formeln zur Berechnung des scheinbaren k-Faktors  $k^*$ .

Einfache Viertelbrückenschaltung nach Bild 7.2-1:

$$k^* = k \cdot \frac{R_{\text{DMS}}}{R_{\text{K1.1}} + R_{\text{DMS}} + R_{\text{K1.2}}}. \quad (7.2-13)$$

Viertelbrücke in Dreileiterschaltung nach Bild 7.2-3:

$$k^* = k \cdot \frac{R_{\text{DMS}}}{R_{\text{DMS}} + R_{\text{K1}}}. \quad (7.2-14)$$

Viertelbrücke mit Kompensations-DMS nach Bild 7.2-4:

Für Fall a) gilt die Gleichung 7.2-14,

für Fall b) gilt die Gleichung 7.2-13.

Zweiviertel- oder Diagonalbrücke nach Bild 7.2-5:

Für Fall a) gilt die Gleichung 7.2-14,

für Fall b) gilt die Gleichung 7.2-13.

Es wird vorausgesetzt, dass die beiden Brückenarme 1 und 3 identisch besetzt sind.

Halbbrückenschaltung nach Bild 7.2-6:

Für Fall a) gilt die Gleichung 7.2-14,

für Fall b) gilt die Gleichung 7.2-13.

Auch hier ist vorausgesetzt, dass die beiden Brückenarme 1 und 2 identisch besetzt sind.

Vollbrückenschaltung nach Bild 7.2-7:

$$k^* = k \cdot \frac{R_{\text{B}}}{R_{\text{K2}} + R_{\text{B}} + R_{\text{K3}}}. \quad (7.2-15)$$

Der Brückenquerwiderstand  $R_{\text{B}}$  ist zu messen oder nach Gl. (7.2-12) zu berechnen.

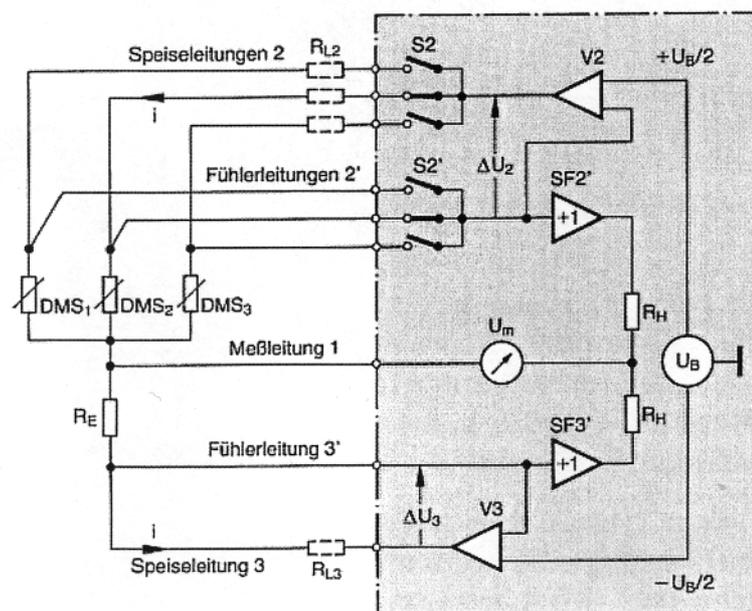
### 7.3 Eliminierung der Kabeinflüsse durch spezielle Messgeräte-Schaltungen

Während die in den Abschnitten 7.1 und 7.2 beschriebenen Maßnahmen in erster Linie die Kompensation von Störeinflüssen anstreben, soll hierunter eine Gerätekonzeption beschrieben werden, welche Fehler durch die Kabelverbindungen zum DMS von vornherein nicht entstehen lässt. In [5-2] ist die Wirkungsweise eines solchen Gerätes anhand der Schaltung erläutert. Im folgenden Abschnitt wird ein Auszug aus der genannten Veröffentlichung mit Einverständnis des Autors wiedergegeben.

#### 7.3.1 Die HBM-Brücke (Zitat aus [5-2])\*

Vom Verfasser wurde bereits 1976 eine Schaltung angegeben [7-1], die ebenfalls auf dem Grundprinzip der Wheatstone'schen Brücke aufbaut, deren Fehleinflüsse aber fast vollständig vermeidet.

In Bild 7.3-1 ist das Arbeitsprinzip dieser Schaltung dargestellt. Die Brückenspeisespannung  $U_B$  wird nicht mehr direkt den Dehnungsmessstreifen zugeführt, sondern dient den Verstärkern V2 und V3 nur noch als Referenzspannung. Die



**Bild 7.3-1: Viertelbrückenschaltung zur praktisch fehlerfreien Anschaltung von Einzel-Dehnungsmessstreifen mit nahe am Messort angeordnetem Ergänzungswiderstand  $R_E$  oder Kompensations-DMS.**

\*) Die patentierten Schaltungen werden inzwischen unter der Bezeichnung „Kreuzerschaltung“ und „erweiterte Kreuzerschaltung“ in handelsüblichen Geräten angewandt.

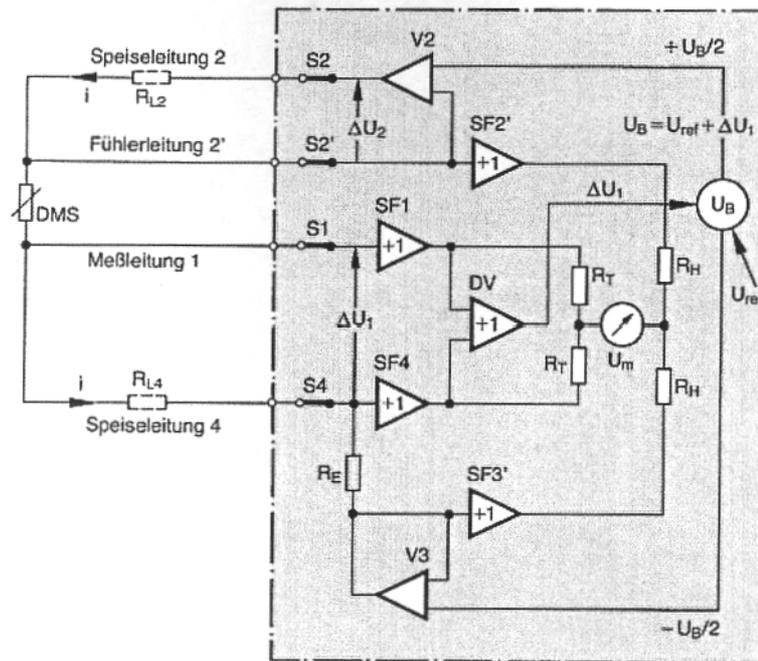
Verstärker V2 und V3 regeln ihre Ausgangsspannung so lange nach, bis die über die Fühlerleitungen an den Messstellen abgegriffenen und über die Spannungsfolger SF2' und SF3' zugeführten Spannungen gleich den Spannungen  $+U_{B/2}$  bzw.  $-U_{B/2}$  sind. Die Spannungsabfälle  $\Delta U_2$  und  $\Delta U_3$  in den Speisespannungsschaltern S2 werden somit ausgeregelt; die Ausgangsspannungen der Verstärker V2 und V3 sind um die Spannungsabfälle  $\Delta U_2$  und  $\Delta U_3$  höher als die Spannungen  $+U_{B/2}$  bzw.  $-U_{B/2}$ . Somit liegt an den Messstellen die genaue Brückenspeisespannung an.

Wegen der extrem hohen Eingangsimpedanz der Verstärker und Spannungsfolger (SF2', SF3') sind die Fühlerleitungen praktisch stromlos, so dass ihre Leitungswiderstände und die Widerstände der Schalter S2' keine Spannungsabfälle und somit auch keine Messfehler verursachen können. Da die Innenhalbbrücke (Widerstände  $R_H$ ), die die äußere Messhalbbrücke zur Vollbrücke ergänzt, über die Spannungsfolger SF2' und SF3' an die von den Messstellen rückgeführten Spannungen angeschlossen sind, liegen die externe und die interne Halbbrücke an den genau gleichen Spannungen, selbst wenn die Spannungsregelung der Verstärker V2 und V3 noch kleine Restfehler übrig ließe. Die Spannungsfolger können mit den modernen Operationsverstärkerschaltungen so präzise ausgeführt werden, dass ihre Fehlerspannungen vernachlässigbar klein sind.

Nullpunkts- und Empfindlichkeitsfehler werden daher fast 100%-ig eliminiert. Die Schaltung ist für Gleichspannungs- und Trägerfrequenzbetrieb geeignet. Bei Trägerfrequenzbetrieb wird sogar noch eine höhere Präzision erzielt, da dann die wenn auch kleinen Offsetspannungen und Temperaturdriften der Verstärker und Spannungsfolger ohne Einfluss sind. Ein Vorzug der Schaltung in Bild 7.3-1 ist weiterhin, dass für jeden zusätzlich anzuschließenden Dehnungsmessstreifen nur zwei Leitungen und zwei Schalter benötigt werden.

Die Schaltung fordert jedoch andererseits, dass der Ergänzungswiderstand  $R_E$  nahe den Dehnungsmessstreifen angeordnet wird, da die Spannungsabfälle, die in den Verbindungsleitungen zwischen den Dehnungsmessstreifen und dem Ergänzungswiderstand  $R_E$  auftreten, nicht ausgeregelt werden. Weiterhin bewirkt die direkte galvanische Verbindung der Dehnungsmessstreifen, dass bei Massechluss eines Streifens die Messwerte der ganzen Gruppe falsch werden können. In Bild 7.3-2 ist eine gegenüber Bild 7.3-1 erweiterte Schaltung gezeigt, die es erlaubt, Einzel-Dehnungsmessstreifen über große Entfernungen von bis zu 1000 m anzuschließen, wobei der Ergänzungswiderstand sogar im Messgerät angeordnet werden kann [7-2]. Die Schaltung in Bild 7.3-2 besitzt gegenüber der Schaltung in Bild 7.3-1 die beiden zusätzlichen Spannungsfolger SF1 und SF4, sowie den Differenzverstärker DV. Der Spannungsabfall  $\Delta U_1$ , der durch den Speisestrom in der Speiseleitung 4 und dem Schalter S4, d. h. der Verbindung zwischen dem Dehnungsmessstreifen und dem Ergänzungswiderstand  $R_E$  erzeugt wird, wird von den Spannungsfolgern SF1 und SF4 abgegriffen, mit Hilfe der Widerstände  $R_T$  exakt halbiert und somit zu gleichen Teilen den bei-

den Brückenzweigen der äußeren Halbbrücke zugewiesen. Dadurch wird der Einfluss auf den Nullpunkt durch den Spannungsabfall  $\Delta U_1$  ausgeschlossen. Da der Spannungsabfall  $\Delta U_1$  über den Differenzverstärker DV zum Brückenspannungsgenerator geführt und dort die Brückenspeisespannung  $U_B$  um den Betrag  $\Delta U_1$  erhöht wird, ist die Summe der Spannungen, die direkt am Dehnungsmessstreifen und am Ergänzungswiderstand anliegen immer konstant gleich  $U_{ref}$ . Die Spannungsabfälle  $\Delta U_1$  und  $\Delta U_2$  haben somit auch keinen Einfluss auf die Messempfindlichkeit. Da die Schaltung nach Bild 7.3-2 den Dehnungsmessstreifen vollständig an- bzw. abschaltet, werden bei Masseschluss eines Dehnungsmessstreifens die anderen nicht beeinflusst.

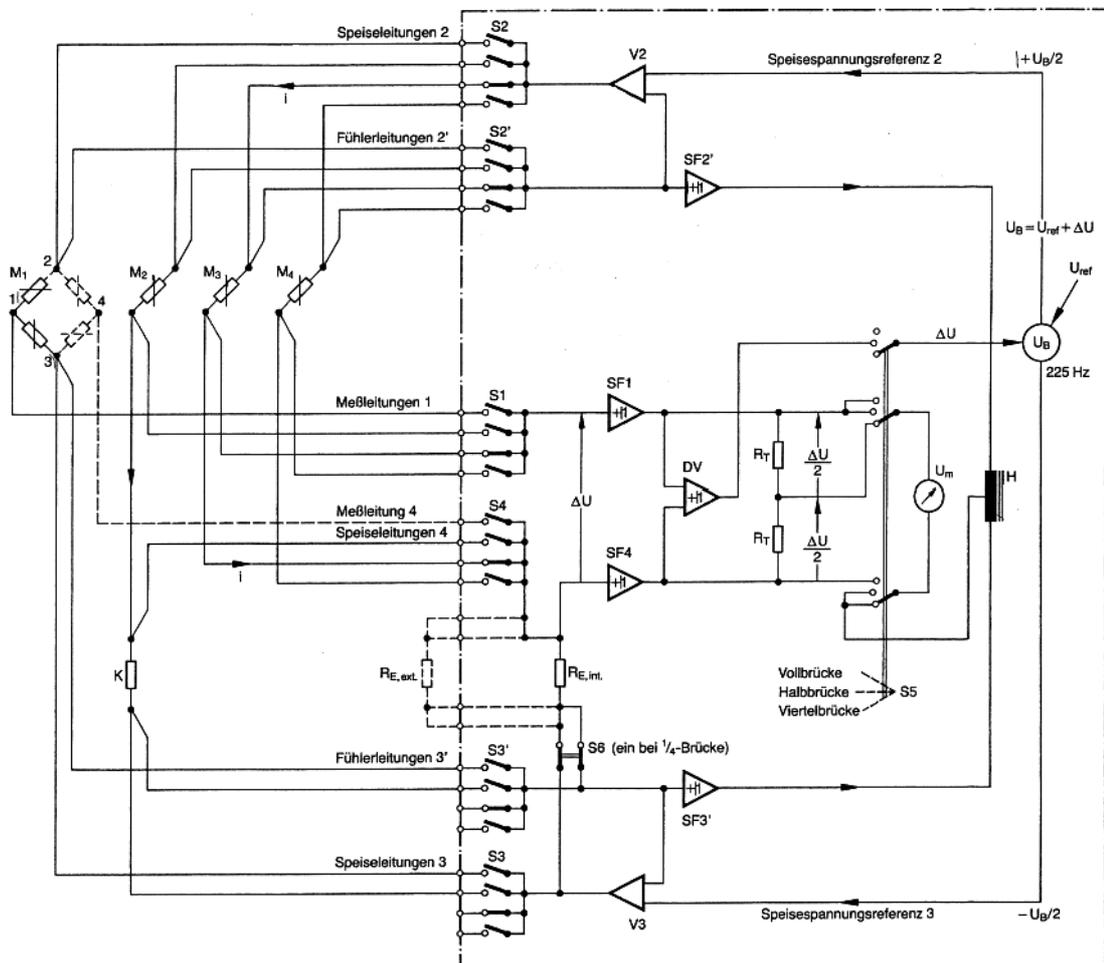


**Bild 7.3-2: Viertelbrückenschaltung zur praktisch fehlerfreien Anschaltung von Einzel-Dehnungsmessstreifen mit entfernt vom Messort angeordnetem Ergänzungswiderstand  $R_E$ .**

In Bild 7.3-3 ist in einer detaillierten Ausgestaltung der Schaltung von Bild 7.3-2 die von HBM angewendete Anschalttechnik für Voll-, Halb- und Viertelbrücken dargestellt. Dabei ist es möglich, Dehnungsmessstreifen einzeln mit räumlich entfernt angeordneten Kompensations-DMS zu ergänzen, wie z. B. Messstelle M2 in Bild 7.3-3, oder Einzel-Dehnungsmessstreifen mittels des geräteinternen Ergänzungswiderstandes  $R_{Eint}$  oder eines gemeinsamen äußeren Ergänzungswiderstandes  $R_{Eext}$  zur Halbbrücke zu ergänzen. Wird mit Trägerfrequenz gearbeitet, d. h. wenn als Brückenspeisespannung eine sinusförmige Wechselspannung verwendet wird, so kann die geräteinterne Halbbrücke  $R_H$  und im Bedarfsfalle auch der Widerstandsteiler  $R_T$  als induktiver Teiler ausgeführt werden, was eine erhebliche Verringerung der Messfehler bei Halb- und

Viertelbrückenschaltung zur Folge hat, weil induktive Teiler mit erheblich größeren Temperatur- und insbesondere Langzeitstabilitäten ausgeführt werden können als Widerstandsteiler.

Ende des Zitats.



**Bild 7.3-3: HBM-Brückenschaltung zum fehlerfreien Anschluss von Viertel-, Halb- und Vollbrückenschaltungen**

### 7.3.2 Die Sechseleitschaltung

Von ähnlicher Wirkung wie die Kreuzer-Schaltung ist die Sechseleitschaltung. Sie ist jedoch auf den Anschluss von DMS-Vollbrückenschaltungen beschränkt. Das Bild 7.3-4 zeigt das Prinzip.

Ein regelbarer Spannungsgenerator  $G$  liefert die Spannung  $U_G$  zur Speisung des mit einer DMS-Vollbrückenschaltung ausgestatteten Messgrößenaufnehmers. Infolge des durch den Speisestrom  $I_B$  an den Leitungswiderständen  $R_{K2}$  und  $R_{K3}$  der Speiseleitung entstehenden Spannungsabfalls erhält der Aufnehmer die

niedrigere Speisespannung  $U_B$ . Die beiden Fühlerleitungen 6 und 7 melden die Spannung  $U_B$  zurück an einen Komparator, der sie mit der Referenzspannung  $U_{Ref}$  vergleicht. Die Referenzspannung  $U_{Ref}$  ist gleich der Soll-Brückenspeisespannung. Die Leitungswiderstände  $R_{K6}$  und  $R_{K7}$  der Fühlerleitungen stören nicht, weil kein Strom über sie fließt. Weicht  $U_B$  von  $U_{Ref}$  ab, dann erhöht der Generator, gesteuert vom Komparator, seine Spannung  $U_G$  bis die Fühlerleitungen Übereinstimmung von  $U_B$  mit  $U_{Ref}$  melden. Dann liegt am Aufnehmer die Soll-Speisespannung an.

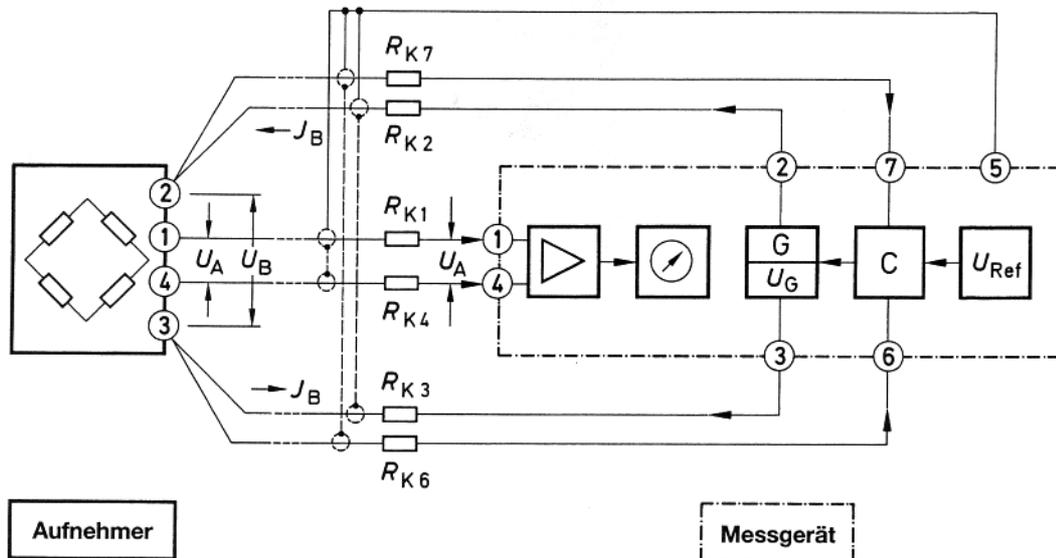


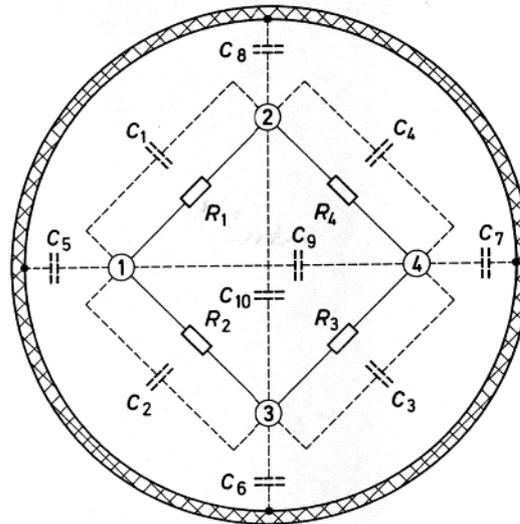
Bild 7.3-4: Prinzip der Sechseleiterschaltung; Erläuterung im Text

Die Nachregelung der Generatorspannung kann im Prinzip sowohl manuell als auch automatisch erfolgen. Die automatische Regelung hat den großen Vorteil, dass Veränderungen der Speiseleitungs-Widerstände während einer Messung, z. B. bei Temperaturänderungen durch den Temperaturkoeffizienten des Kupfers, immer sofort ausgeregelt werden. Das Messsignal  $U_A$  entspricht somit zu jedem Zeitpunkt dem Messwert. Die Widerstände der Signalleitungen  $R_{K1}$  und  $R_{K4}$  sind auch hier wieder ohne Einfluss, weil der Messverstärker ebenfalls keinen Strom aufnimmt.

## 7.4 Der Einfluss der Kabelkapazitäten

Die Adern eines Kabels bilden untereinander Kondensatoren. Deren Kapazität hängt ab von der Länge der Adern, ihrem Abstand zueinander, dem Querschnitt, dem Dielektrikum (Isolation) und der Temperatur. Für frei gezogene Leitungen gilt das gleiche.

Das Bild 7.4-1 zeigt die Schaltung einer DMS-Vollbrücke, an die ein abgeschirmtes Kabel angeschlossen ist. Die Wheatstone'sche Brückenschaltung wird durch die Widerstände  $R_1$  bis  $R_4$  gebildet. Zwischen den Adern 1 bis 4 des Anschlusskabels bilden sich die Kapazitäten  $C_1$  bis  $C_4$ ,  $C_9$  und  $C_{10}$  aus. Bei abgeschirmtem Kabel entstehen noch die Kapazitäten  $C_5$  bis  $C_8$ .



**Bild 7.4-1: Im abgeschirmten Anschlusskabel einer Wheatstone'schen Brückenschaltung zwischen den Kabeladern und zwischen Adern und Schirm auftretende Kapazitäten.**

Die Kabelkapazitäten können auf zweierlei Weise als Fehlerquelle auftreten:

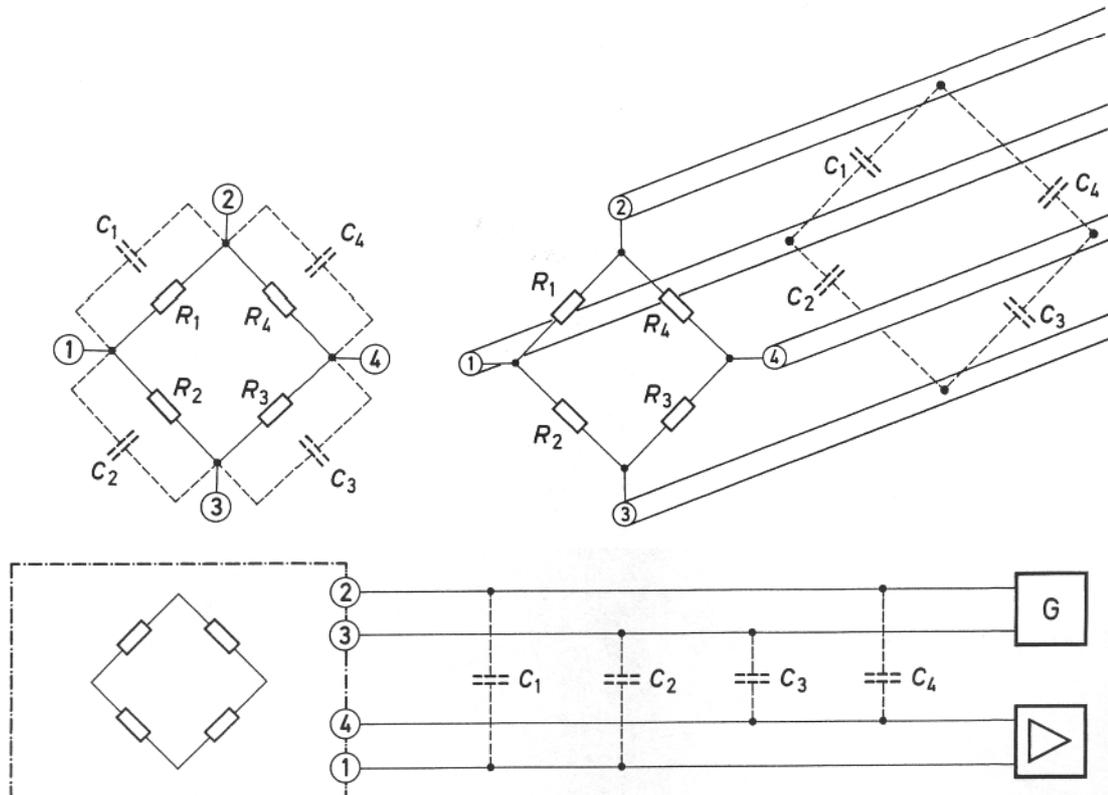
a) Kapazitive Unsymmetrie der Brückenschaltung kann zur Übersteuerung des Messverstärkers und damit zu einer Verfälschung des Messwertes beitragen. Die kapazitive Übersteuerung ist nur beim Trägerfrequenzsystem möglich. Wie ihr zu begegnen ist, beschreibt der Abschnitt 7.4.1

b) Die ohmschen Widerstände bilden zusammen mit den Kabelkapazitäten sogenannte R-C-Glieder, die bei dynamischen Signalen eine Phasendrehung erzeugen. Bei Gleichspannungssystemen und bei niederfrequenten Trägerfrequenzsystemen hat das außer der verlängerten Signal-Laufzeit keinen nennenswerten Störeffekt. Bei hochfrequenten Trägerfrequenzsystemen können Amplitudenfehler auftreten, wenn die Demodulationssteuerung nicht synchron zu der am Verstärker ankommenden, phasenverschobenen Trägerfrequenz arbeitet. Gegenmaßnahmen sind im Abschnitt 7.4.2 beschrieben.

Die beiden Einflüsse treten vor allem bei langen Kabelstrecken in Erscheinung, sie können sich in ungünstigen Fällen und bei fehlerhaften Geräteeinstellungen auch schon bei kurzen Leitungen auswirken. In jedem Falle ist es ratsam, kapazitätsarme Kabel hoher Qualität zu verwenden und unnötig lange Kabel zu vermeiden.

## 7.4.1 Kapazitive Unsymmetrie

Das Bild 7.4-2 zeigt nur einen Teil der im Bild 7.4-1 enthaltenen Kabelkapazitäten. Es sind dies die Kapazitäten  $C_1$  bis  $C_4$ . Sie liegen jeweils parallel zu den Brücken-Widerständen  $R_1$  bis  $R_4$  und bilden so eine der ohmschen Brücke parallel geschaltete kapazitive Brücke.



**Bild 7.4-2:** Die ohmsche Brücke und die infolge von Kabelkapazitäten dazu parallel entstehende kapazitive Brücke in drei verschiedenen Darstellungen.

Bei Wechselspannungsspeisung (Trägerfrequenzbetrieb) wirkt jede Kapazität als frequenzabhängiger Widerstand. Der kapazitive Widerstand  $X_c$  (Blindwiderstand) eines Kondensators hängt ab von seiner Kapazität  $C$  und der Frequenz  $f$  der Wechselspannung:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \pi \cdot f \cdot C}. \quad (7.4-1)$$

Solange die 4 Kapazitäten gleich groß sind, ist die kapazitive Brücke abgeglichen. Treten jedoch Kapazitätsunterschiede auf (kapazitive Unsymmetrie), dann entsteht eine kapazitive Brückenverstimmung und dadurch eine Brückenausgangsspannung, die nicht von der Messgröße bestimmt wird. Die kapazitive Ausgangsspannung ist gegenüber der ohmschen Ausgangsspannung um  $90^\circ$  phasenverschoben. Der nachgeschaltete Verstärker verstärkt beides, die ohmsche

und die kapazitive Brückenausgangsspannung. Die phasenkritische Gleichrichtung (Demodulation) der Trägerfrequenz-Messverstärker sorgt dafür, dass nur die aus der ohmschen Brückenverstimmung herrührende, verstärkte Signalspannung von den Anzeigegegeräten angezeigt wird, nicht aber die aus der kapazitiven Verstimmung. Insofern scheint alles in Ordnung. Nun kann aber bei starker kapazitiver Brückenverstimmung der Verstärker schon zu einem beträchtlichen Teil oder gar voll ausgesteuert sein. Kommt dann eine ohmsche Brückenverstimmung hinzu, dann wird der Verstärker übersteuert, d. h. die Verstärker-Ausgangsspannung ist nicht mehr der ohmschen Brückenverstimmung proportional, die Anzeige wird falsch. Damit man den Aussteuerungszustand des Verstärkers erkennen kann, werden Messverstärker mit einer zusätzlichen Aussteuerungs-Anzeige ausgestattet. Diese gibt nur Auskunft über den gesamten Aussteuerungsgrad des Verstärkers ohne Hinweis auf die Ursache. Mit Hilfe des bei Trägerfrequenz-Verstärkern vorhandenen Kapazitätsabgleichs („C-Abgleich“) bringe man den Ausschlag der Aussteuerungsanzeige auf Minimum. Damit ist die Brückenschaltung kapazitiv abgeglichen. Sollte eine Restanzeige zurückbleiben, dann wird sie wahrscheinlich einer ohmschen Brückenverstimmung entstammen. Einzelheiten entnehme man der für den Messverstärker gültigen Bedienungsanweisung.

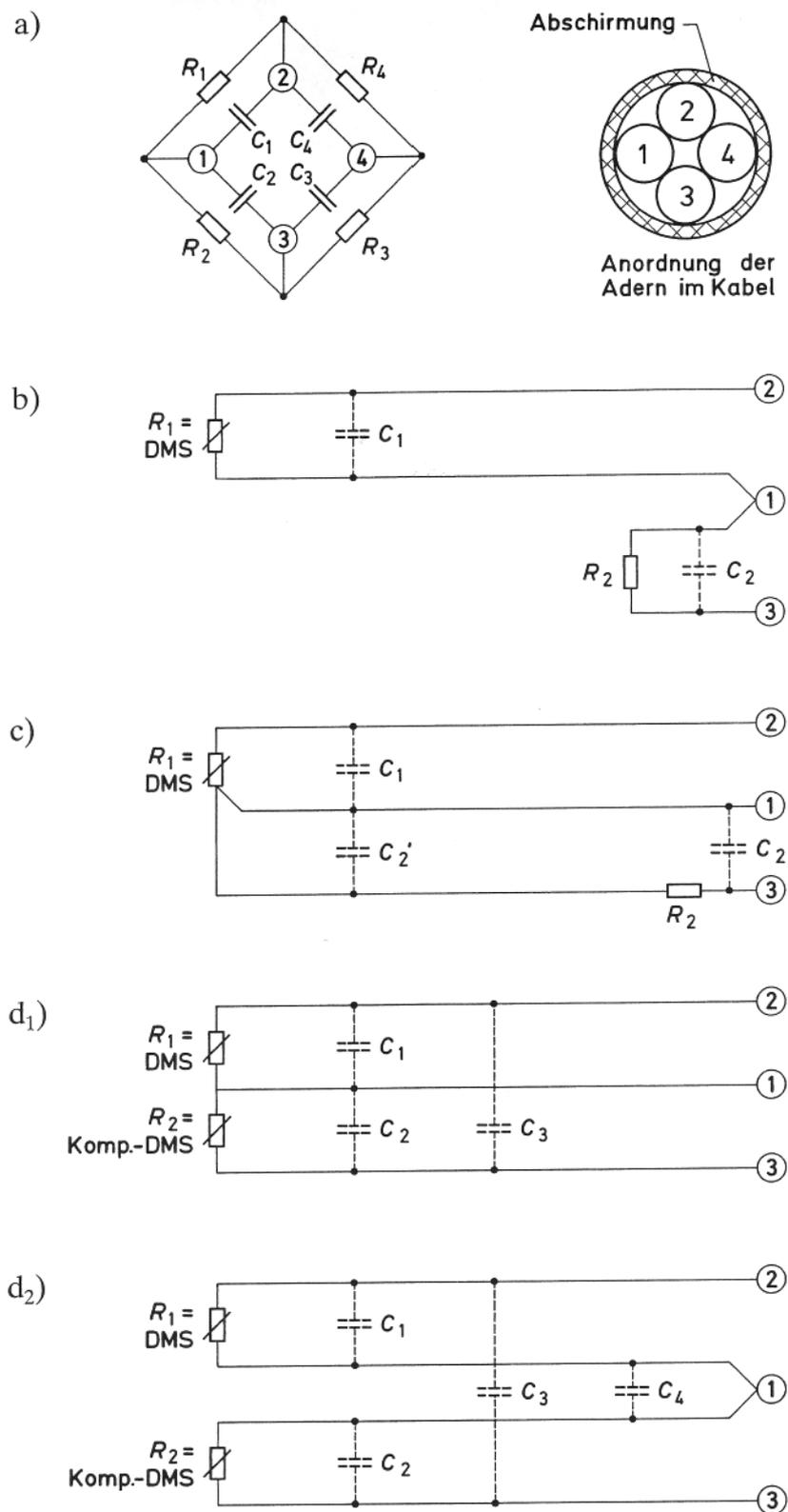
Hier bleibt noch anzumerken, dass es auch Trägerfrequenz-Verstärker gibt, die keinen C-Abgleich besitzen und diesen auch, aufgrund ihrer besonderen Konzeption, nicht benötigen. Man setzt sie in Systeme mit niedriger Signallauf- lösung ein.

Wodurch entstehen kapazitive Unsymmetrien?

Im Bild 7.4-3 sind die in der DMS-Technik gebräuchlichen Schaltungen zusammen mit den wirksamen Kapazitäten dargestellt.

Bei der Vollbrückenschaltung, Bild 7.4-3a, muss die geometrische Anordnung der Kabeladern mit den Eckpunkten der Brückenschaltung übereinstimmen. Werden zwei benachbarte Adern vertauscht, dann entsteht kapazitive Unsymmetrie mit den vorstehend geschilderten Folgen.

Die Kapazität Ader gegen Ader beträgt bei Messkabeln, je nach ihrem Aufbau, etwa zwischen 70 und 150 pF/m. Die HBM-Messkabel zeichnen sich durch hohe kapazitive Symmetrie aus; auch bei großen Kabellängen treten in der Regel keine systematischen Tendenzen auf. (Praktisch unbedeutend ist die Widerstandsunsymmetrie, d. h. der Widerstandsunterschied der einzelnen Kabeladern untereinander.) Eine Prüfung auf kapazitive Symmetrie kann der Abgleichschwierigkeiten im Zuge der Fehlereingrenzung auf Schaltungsfehler in Steckern oder Anschlüssen hinweisen. Die Prüfung erfolgt mit einem Kapazitätsmessgerät, dessen Frequenz möglichst 1000 bis 10000 Hz beträgt.



**Bild 7.4-3:** Darstellung der Kabelkapazitäten bei den verschiedenen Anschlussarten für DMS. Weitere Erläuterungen im Text.

- a) Die Kapazitäten der Adern 1 gegen 2 ( $C_1$ ) und 1 gegen 3 ( $C_2$ ) müssen gleich groß sein. Ein Unterschied von 100 bis 200 pF, unabhängig von der Kabellänge, kann toleriert werden.
- b) Die Kapazitäten der Adern 4 gegen 2 ( $C_4$ ) und 4 gegen 3 ( $C_3$ ) müssen ebenfalls auf 100 bis 200 pF übereinstimmen.

Unterschiedliche Kapazitätswerte für a) und b) sind ohne Bedeutung. Wichtig ist die Symmetrie innerhalb jeder der beiden Brückenhälften 2-1-3 und 2-4-3. Sollte eine Unsymmetrie bestehen, welche die als Richtwert genannte Toleranz überschreitet, dann kann diese mit Zusatzkondensatoren ausgeglichen werden. Zuvor überzeuge man sich, dass kein Schaltfehler vorliegt. Die Kondensatoren können sowohl am Kabelanfang als auch am Kabelende angeschlossen werden.

Eine drastische kapazitive Unsymmetrie entsteht bei der einfachen Viertelbrückenschaltung, Bild 7.4-3b, wenn der DMS ( $R_1$ ) mit langen Leitungen angeschlossen ist und der Ergänzungswiderstand ( $R_2$ ) mit kurzen Leitungen nahe dem Messverstärker.  $C_1$  ist dann wesentlich größer als  $C_2$ . Wenn der Kapazitätsabgleich des Messverstärkers nicht ausreicht, die Unsymmetrie auszugleichen, kann man einen Kondensator passender Größe über die Anschlüsse 1 und 3 schalten.

Grundsätzlich sind die unsymmetrischen Schaltungsarten (Viertelbrücke und Zweiviertelbrücke) hinsichtlich ihrer Fehleranfälligkeit am ungünstigsten, und zwar in jeder Hinsicht. Die Viertelbrücke in Dreileiterschaltung, Bild 7.4-1c, gleicht zwar den leitungsbedingten Temperaturgang der Messstelle aus, aber nicht die kapazitiven Unsymmetrien. Die Leitungen 1 und 3 sind am DMS zusammengeschaltet und damit auf gleichem Potential. Infolge dieses Kurzschlusses wird die Kapazität  $C_2$  unwirksam. Sofern eine Symmetrierung mittels Kondensator erforderlich sein sollte, muss er am Verstärker von Anschluss 1 zu Anschluss 3 geschaltet werden.

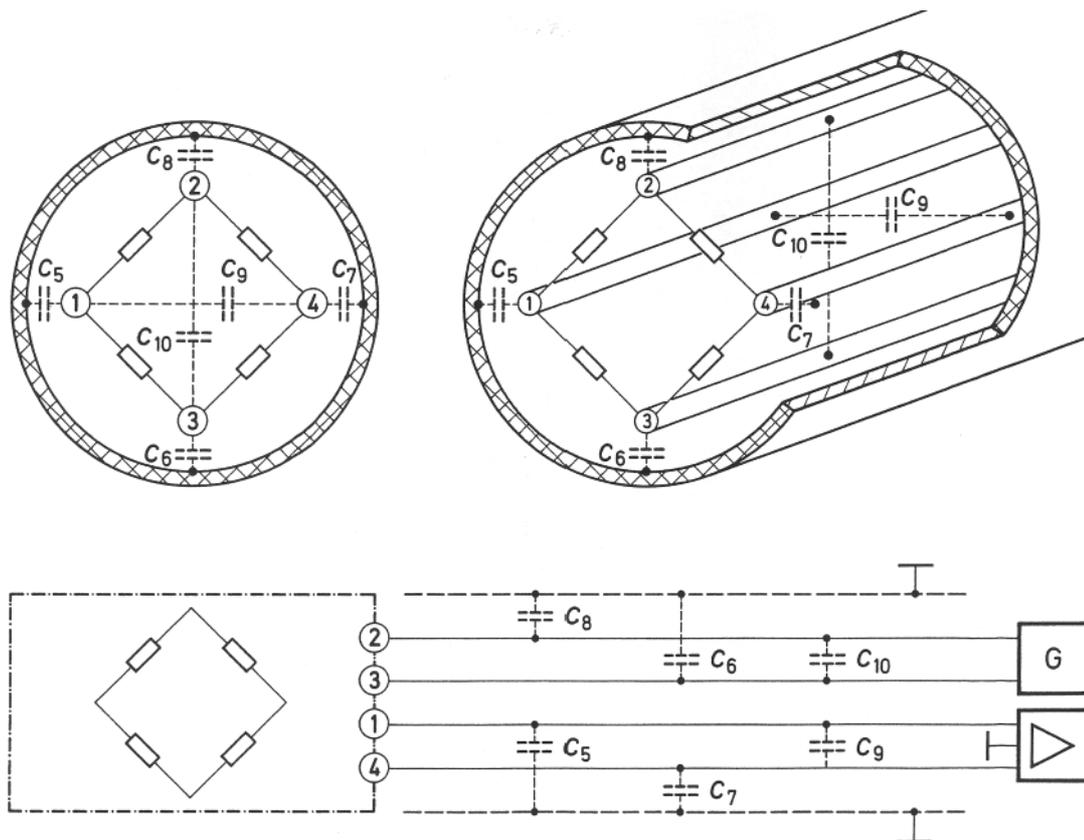
Die Viertelbrücke mit Kompensations-DMS, Bild 7.4-3d<sub>1</sub>, zeigt sich hier wesentlich überlegen, auch dann, wenn anstatt des Kompensations-DMS ein Ergänzungswiderstand verwendet werden sollte. Die gleichlangen Leitungen 1, 2 und 3 sorgen für Symmetrie der beiden Kapazitäten  $C_1$  und  $C_2$ .  $C_3$  ist ohne Einfluss; die beiden Leitungen 2 und 3 werden durch den extrem niedrigen Innenwiderstand des Speisegenerators praktisch kurzgeschlossen.

Die Variante 7.4-3d<sub>2</sub> unterscheidet sich im kapazitiven Verhalten nicht von der Variante d<sub>1</sub>. Das gleiche gilt, wenn anstatt der Kompensations-DMS messende DMS verwendet werden. Man erhält dann Halbbrückenschaltungen.

Bei der Zweiviertelbrücke verdoppelt sich die kapazitive Unsymmetrie gegenüber der einfachen Viertelbrücke bzw. gegenüber der Viertelbrücke in Dreileiterschaltung.

## 7.4.2 Die Phasendrehung

Im Abschnitt 4.2.3.2 wird bereits auf die Zweckmäßigkeit verwiesen, abgeschirmte Kabel zur Verbindung der DMS oder Messgrößenaufnehmer mit dem Messverstärker zu benutzen. Die sorgfältig geerdete Abschirmung aus Kupfergeflecht schützt gegen das Einstreuen elektrischer Felder, darunter den unangenehmen „Netzbrumm“, die 50 Hz Einstreuung aus dem Stromversorgungsnetz. Dadurch entstehen, zusätzlich zu den im Abschnitt 7.4.1 besprochenen, die Kapazitäten  $C_5$  bis  $C_8$  zwischen den Kabeladern und dem Schirm, sowie im vieradrigen Kabel die diagonal wirkenden Kapazitäten  $C_9$  und  $C_{10}$ . Im Bild 7.4-4 wird dies dargestellt.



**Bild 7.4-4:** Kabelkapazitäten, die zur Phasendrehung des Messsignals beitragen.

Die zwischen den Brückenspeiseadern 2,3 und dem Schirm sowie untereinander wirkenden Kapazitäten  $C_6$ ,  $C_8$  und  $C_{10}$  wirken bei Wechselspannungsspeisung nur als zusätzliche Belastung des Generators, haben aber keinen nachteiligen Einfluss auf die Messung.

Die Kapazitäten  $C_5$ ,  $C_7$  und  $C_9$ , hingegen bilden über die Messleitungen 1 und 4 zusammen mit dem Brückeninnenwiderstand des Aufnehmers ein R-C-Glied. Aus dessen Zeitkonstante  $\tau$  und der Frequenz  $f$  der Speisespannung oder (bei

Gleichspannungsspeisung) der Frequenz des Messsignals ergibt sich eine Phasenverschiebung zwischen dem Messsignal am Ausgang des Aufnehmers und dem Eingang des Messverstärkers.

$$\tau = R \cdot C \quad (7.4-2)$$

$$\varphi = \frac{R \cdot C}{f} \cdot 2 \pi \quad (7.4-3)$$

Bei Gleichspannungsspeisung ist dies nur dann von Interesse, wenn mehrere Signale parallel und synchron erfasst werden müssen.

Bei Trägerfrequenzverstärkern muss der Demodulator das amplitudenmodulierte Aufnehmersignal in ein gleichgerichtetes Ausgangssignal umwandeln. Dazu muss die dem Generator (Oszillator) entnommene Schaltspannung für den Demodulator die gleiche Phasenlage haben, wie das Aufnehmersignal am Demodulator-Eingang. Die Anpassung erfolgt rein empirisch mit Hilfe eines zweiten R-C-Gliedes im Messverstärker, dessen Zeitkonstante regelbar ist; damit kann die Phasenlage der Schaltspannung mit derjenigen des Aufnehmersignals in Übereinstimmung gebracht werden. Der einfach durchzuführende Abgleich ist in den Bedienungsanleitungen unter dem Stichwort „Referenzphasen-Abgleich“ beschrieben.

Der Referenzphasen-Abgleich zur Verhinderung von Messfehlern wird in der gleichen Weise, und mit gleichem Erfolg, auch bei allen anderen im Abschnitt 7 beschriebenen Schaltungsarten angewandt.

## 7.5 Korrektur der Querempfindlichkeit der DMS

Der Begriff „Querempfindlichkeit“ sagt aus, dass ein DMS nicht allein auf Dehnungen in der Längsachse seines Messgitters, sondern auch auf Dehnungen quer dazu mit einer Widerstandsänderung reagiert. Die Definition der Querempfindlichkeit und ihre Ursachen sind im Abschnitt 3.3.3 beschrieben. Glücklicherweise ist die Querempfindlichkeit moderner Folien-DMS sehr klein. In den Diagrammen Bild 3.3-7a) und b) ist für eine Anzahl der gebräuchlichen Linear-DMS und DMS-Rosetten die Querempfindlichkeit angegeben. Bei den meistverwendeten Typen liegt sie bei  $\pm 0,005$  ( $\pm 0,5 \%$ ) ein Spezialtyp erreicht den Idealwert 0, bei den übrigen Typen bewegt sich die Querempfindlichkeit um 0,01 (1 %). Man wird deshalb in den meisten Fällen auf eine Korrektur der Messwerte verzichten können [7-3], ohne dass dadurch gravierende Fehler entstünden, es sei denn, dass extrem große Querdehnungen auf den DMS einwirkten oder außergewöhnlich große Messgenauigkeit gefordert wäre. Nur in solchen Fällen lohnt sich der Aufwand einer Korrektur. Beim Messgrößenaufnehmerbau

ist die Querempfindlichkeit von untergeordneter Bedeutung, weil die Aufnehmer im Endzustand kalibriert werden. Lediglich bei Mehrkomponenten-Aufnehmern kann die Querempfindlichkeit des DMS zum „Übersprechen“ beitragen (wofür der DMS nur teilweise verantwortlich ist).

Anmerkung:

Unter Mehrkomponenten-Aufnehmern versteht man solche, die, als Beispiel, Kräfte in verschiedenen Achsrichtungen unabhängig voneinander messen können. Wenn nun z. B. eine in der X-Achse wirkende Kraft das Messsystem für die Y-Achse in unerwünschter Weise beeinflusst, bezeichnet man das mit einem Begriff aus der Elektro-Akustik sinngemäß als „Übersprechen“.

In den folgenden Abschnitten werden Formeln zur Korrektur der Messwerte angegeben. Theoretische Abhandlungen mit den Herleitungen der Formeln findet man in [7-4,7-5].

Bevor auf die Korrekturen selbst eingegangen wird, muss noch einmal auf die Methode zur Bestimmung des k-Faktors (s. Abschnitt 3.3.1) eingegangen werden. Nach einer weltweit angewandten Methode werden DMS im einachsigen Spannungsfeld eines Stahlbalkens kalibriert (s. [2-1]). Ein einachsiger Spannungszustand erzeugt ein zweiachsiges Dehnungsfeld. Die beiden Hauptdehnungsrichtungen verlaufen in Längsrichtung,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_l$ , und in Querrichtung,  $\varepsilon_2 = \varepsilon_q$ . Das Verhältnis der beiden Dehnungen zueinander wird durch die Querszahl  $\nu$  ausgedrückt (s. Abschnitt 2.2.4 und 2.3.3). Die Querszahl des Kalibrierbalkens wird mit  $\nu_0$  bezeichnet; sie beträgt für stählerne Kalibrierbalken

$$\nu_0 = \frac{|\varepsilon_q|}{\varepsilon_l} = 0,285.$$

Zur Kalibrierung wird der DMS mit seiner Längsachse in Richtung der Längsdehnung am Kalibrierbalken appliziert. Als Ergebnis der Kalibrierung erhält man per Definition den k-Faktor des DMS:

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_l}. \quad (7.5-1)$$

Die auf den DMS einwirkende Querdehnung  $\varepsilon_q$  bleibt unbeachtet. Das hat historische Gründe. Tatsächlich aber erfährt das Gitter während der Kalibrierung neben der vorgegebenen Dehnung in Gitterrichtung eine Dehnung senkrecht zur Messgitterrichtung, die Querdehnung  $\varepsilon_q$ . Deshalb gilt bei der Kalibrierung für die relative Widerstandsänderung folgender Zusammenhang:

$$\frac{\Delta R}{R} = k_l \cdot \varepsilon_l + k_q \cdot \varepsilon_q \quad (7.5-2)$$

Die Querempfindlichkeit ( $q$ ) ist definiert als der Quotient zwischen dem  $k$ -Faktor in Messgitterrichtung ( $k_l$ ) und dem  $k$ -Faktor quer ( $k_q$ ).

$$q = \frac{k_q}{k_l} \quad (7.5-3)$$

Dieser Wert ist auf jeder DMS-Packung abgedruckt und dient als Grundlage der folgenden Korrekturrechnungen. Die  $k$ -Faktoren  $k_l$  und  $k_q$  entsprechen nicht dem auf der Packung angegebenen  $k$ -Faktor.

Mit (7.5-3) und

$$\varepsilon_q = -\nu_0 \cdot \varepsilon_l \quad (7.5-4)$$

ergibt sich

$$\frac{\Delta R}{R} = k_l \cdot \varepsilon_l - k_l \cdot q \cdot \nu_0 \cdot \varepsilon_l \quad (7.5-5)$$

Dabei ist  $\nu_0$  die Poissonzahl des Kalibrierbalkens; für HBM-DMS gilt hier  $\nu_0 = 0,285$ .

### 7.5.1 Korrektur für einzelne Messgitter

Der DMS, der auf beliebigem Material appliziert ist, trägt mit folgender Widerstandsänderung zum Ausgangssignal bei:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{mess} = k_l \cdot \varepsilon_l + k_q \cdot \varepsilon_q \quad (7.5-6)$$

Die Dehnung in Messgitterrichtung sei für das Experiment und die Kalibrierung gleich. Der relative Fehler ist gegeben durch

$$f = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{mess} - \left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)} \quad (7.5-7)$$

Dabei sind die Längsdehnungen gleich und die relative Widerstandsänderung mit dem Index **mess** ist jene, die im Experiment ermittelt wird. Die relative Widerstandsänderung unter den Bedingungen des Kalibrierbalkens ist in der Formel ohne Indizes verwendet worden. Dies führt zum exakten Messergebnis.

Durch Einsetzen ergibt sich:

$$f = \frac{(k_l \cdot \varepsilon_l + k_l \cdot \varepsilon_q \cdot q) - (k_l \cdot \varepsilon_l - k_l \cdot q \cdot \nu_0 \cdot \varepsilon_l)}{(k_l \cdot \varepsilon_l - k_l \cdot q \cdot \nu_0 \cdot \varepsilon_l)} \quad (7.5-8)$$

Dieser Ausdruck lässt sich leicht vereinfachen:

$$f = \frac{(\varepsilon_l + \varepsilon_q \cdot q) - (\varepsilon_l - q \cdot \nu_0 \cdot \varepsilon_l)}{(\varepsilon_l - q \cdot \nu_0 \cdot \varepsilon_l)} \quad (7.5-9)$$

$$f = \frac{\varepsilon_q \cdot q + q \cdot \nu_0 \cdot \varepsilon_l}{\varepsilon_l - q \cdot \nu_0 \cdot \varepsilon_l} \quad (7.5-10)$$

$$f = \frac{\varepsilon_q \cdot q}{\varepsilon_l (1 - q \cdot \nu_0)} + \frac{q \cdot \nu_0 \cdot \varepsilon_l}{\varepsilon_l (1 - q \cdot \nu_0)} \quad (7.5-11)$$

$$f = \frac{\varepsilon_q \cdot q}{\varepsilon_l (1 - q \cdot \nu_0)} + \frac{q \cdot \nu_0}{(1 - q \cdot \nu_0)} \quad (7.5-12)$$

$$f = \frac{q}{1 - q \cdot \nu_0} \left( \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} + \nu_0 \right) \quad (7.5-13)$$

Erkennbar ist, dass der Fehler durch die Querdehnung immer dann kritisch wird, wenn der Quotient aus Quer- und Längsdehnung besonders groß ist, oder die Querempfindlichkeit des DMS sehr groß wird. Bei einem einachsigen Spannungszustand tritt kein Fehler auf, sofern die Poissonzahl den Kalibrierbedingungen entspricht.

Diese Berechnung erlaubt eine Fehlerkorrektur, die zur tatsächlichen Dehnung  $\varepsilon$  führt.

$$f = \frac{\varepsilon_{mess} - \varepsilon}{\varepsilon} \rightarrow \varepsilon = \frac{\varepsilon_{mess}}{1 + f} \quad (7.5-14)$$

$\varepsilon_{mess}$  = am Messverstärker angezeigter Wert, also die tatsächlich gemessene Dehnung.

Beispiel 1:

T -Rosette XY13-3/350 mit der Querempfindlichkeit  $q = 0,2 \% = 0,002$

geklebt auf Aluminium; Poissonzahl  $\nu_{Al} = 0,33$

Die Poissonzahl des Kalibrierbalkens ist  $\nu_0 = 0,285$

Belastung: einachsiger Spannungszustand

Gemessene Dehnung in Spannungsrichtung sei:  $\varepsilon_{mess} = 1000 \mu\text{m/m}$

Daraus ergibt sich die Querdehnung (nicht zu verwechseln mit der Querempfindlichkeit von DMS)

$$\varepsilon_q = -\nu_{Al} \cdot \varepsilon_l = -330 \mu\text{m/m}$$

Für den DMS, dessen Messgitter in Spannungsrichtung liegt ergibt sich durch Einsetzen der Parameter in Gleichung (7.5-13) ein Fehler von -0,009 %. Dieser Fehler ist sehr klein und mit Sicherheit zu vernachlässigen.

Für den DMS, der um 90 Grad versetzt zur Spannungsrichtung liegt, ergibt sich ein anderes Bild: Hier berechnet sich ein Fehler von -0,5 % da hier  $\varepsilon_l$  und  $\varepsilon_q$  vertauscht werden müssen.

Lösung:

Die korrekten Dehnungen ergeben sich durch Einsetzen der Fehler in Gleichung (7.5-14):

in Spannungsrichtung:

$$\varepsilon_l = \frac{\varepsilon_{mess}}{1+f} = \frac{1000 \mu\text{m/m}}{1-0,00009} = 1000,09 \mu\text{m/m}$$

90° zur Spannungsrichtung:

$$\varepsilon_q = \frac{\nu \cdot \varepsilon_{mess}}{1+f} = \frac{330 \mu\text{m/m}}{1-0,005} = 331,66 \mu\text{m/m}$$

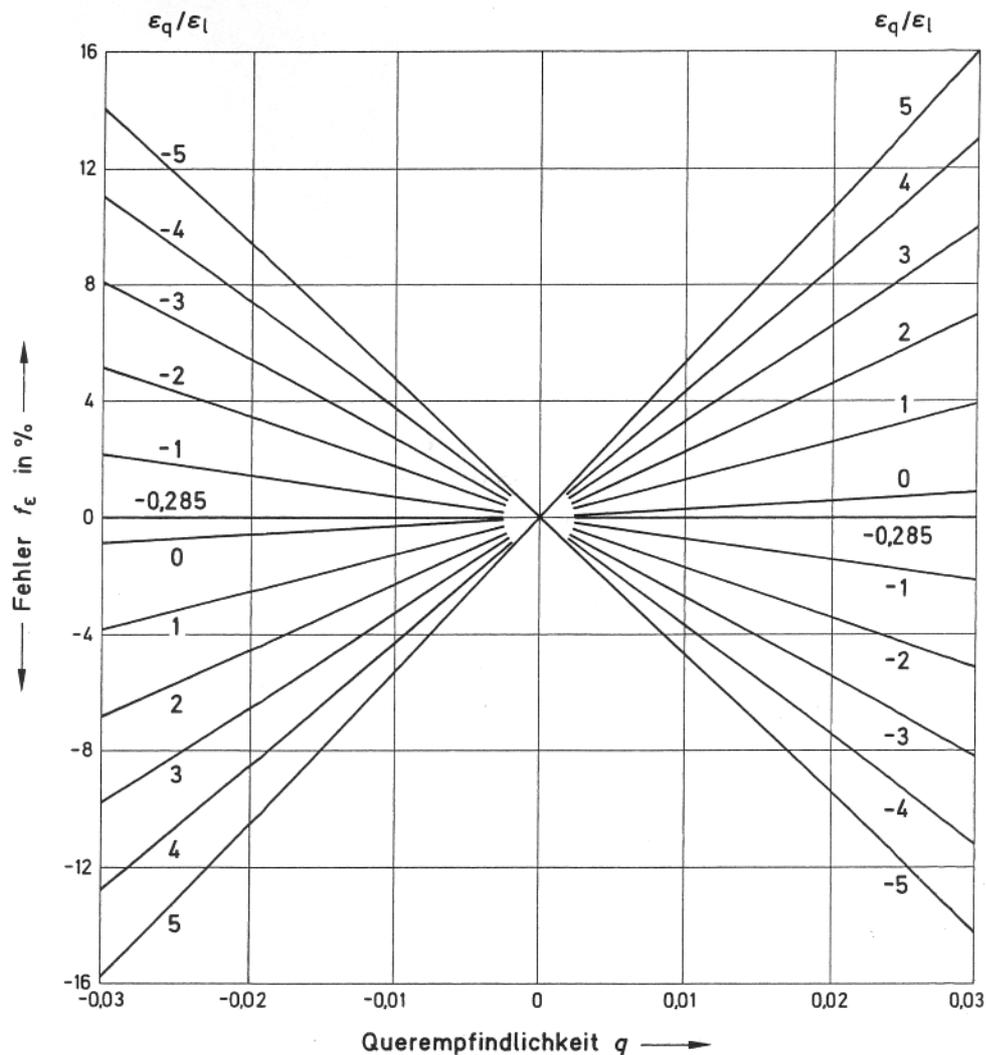
Einen raschen Überblick vermittelt das Diagramm Bild 7.5-1. Es enthält als Parameter 11 verschiedene  $\varepsilon_q/\varepsilon_l$  Verhältnisse und ist für die Querempfindlichkeit  $q = +0,03$  bis  $-0,03$  ausgelegt. Zwischenwerte können durch Interpolieren gefunden werden.

Die Anwendung des Diagramms setzt die Kenntnis des Dehnungsverhältnisses  $\varepsilon_q/\varepsilon_l$  voraus. Im einachsigen Spannungsfeld ist  $\varepsilon_q/\varepsilon_l$  in den Hauptrichtungen

$$\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} = -1 \cdot \nu \quad (7.5-15)$$

Querzahlen für eine Anzahl verschiedener Werkstoffe sind in der Tafel 2.3-2 zu finden.

Die Handhabung des Diagramms sei an drei Beispielen erklärt.



**Bild 7.5-1:** Diagramm zur Ermittlung des Messfehlers infolge der Querempfindlichkeit eines DMS.

Beispiel 2:

$$q = -0,01;$$

einachsiges Spannungsfeld = zweiachsiges Dehnungsfeld;

Bauteilwerkstoff: Aluminium,  $\nu = 0,33$ ;

gemessen wurde die 1. Hauptdehnung,  $\epsilon_1 = \epsilon_1$ .

Gesucht wird der Messfehler infolge der Querempfindlichkeit  $q$  des DMS.

Anmerkung:

Die Dehnungen sind in unterschiedlicher Weise indiziert. Die Indizes 1 und 2 ( $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ) bezeichnen die Hauptrichtungen, das sind die rechtwinklig (orthogonal) zueinander stehenden Richtungen, in welchen die Extremwerte am Messobjekt auftreten.

Die Indizes  $l$  und  $q$  ( $\varepsilon_l$ ,  $\varepsilon_q$ ) bezeichnen die ebenfalls rechtwinklig zueinander stehenden Dehnungen entsprechend ihrer Wirkungsrichtung zum DMS. An anderer Stelle erscheinen noch die Indizes  $x$  und  $y$  ( $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ). Sie bezeichnen die Richtungen  $x$  und  $y$  eines willkürlich gerichteten orthogonalen Achsenkreuzes. Die Richtungen  $x$  und  $y$  können verschieden sein von den Hauptrichtungen 1 und 2 sowie von den DMS-Richtungen 1 und  $q$ .

Lösung:

Zunächst bilde man das Verhältnis  $\varepsilon_q/\varepsilon_l$ :

$$\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} = -1 \cdot \nu = -0,33.$$

Für den Wert -0,33 ist im Diagramm keine Parameterkurve eingetragen. Man findet den Wert durch Interpolieren. Der Punkt liegt so dicht bei der Null-Fehler-Achse (das ist die waagrechte Mittellinie des Diagramms), dass eine grafische Auswertung kaum möglich ist. Der Fehler ist ca. +0,07 % und ist damit vernachlässigbar.

Beispiel 3:

Daten wie im Beispiel 1, gesucht wird aber jetzt der Fehler, der entstand, wenn mit dem DMS die Querdehnung  $\varepsilon_2$  des Objekts gemessen wurde. In diesem Fall ist  $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$ :

Lösung:

$$\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = -\frac{1}{\nu} = -\frac{1}{0,33} = -3.$$

Im Diagramm folge man der Parameterkurve -3 bis zum Schnittpunkt mit der senkrechten Abszissenkoordinate  $q = -0,01$ . Von dort gehe man waagrecht nach links und lese auf der Fehlerskala das Ergebnis ab. Zwischenwerte erhält man auch hierbei durch Interpolieren.

Ergebnis:

$$f_{\varepsilon_1} = f_{\varepsilon_2} = +2,8 \%$$

Beispiel 4:

$$q = +0,015;$$

zweiachsiges Dehnungsfeld  $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = \varepsilon_1/\varepsilon_q = 5,1$ ;

Messung in Richtung  $\varepsilon_1 = \varepsilon_l$ ;

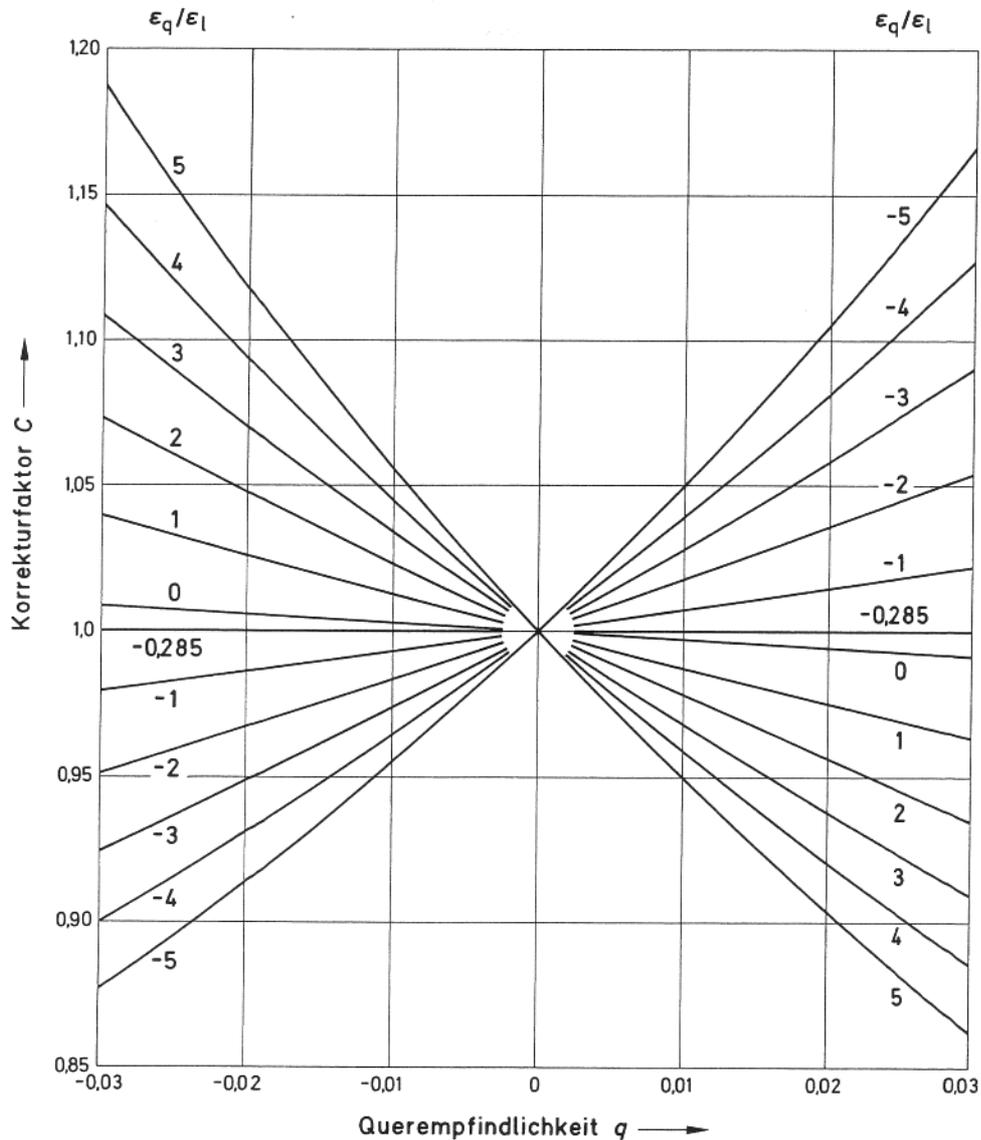
$$\varepsilon_q/\varepsilon_1 = 1:5 = +0,2.$$

$$\text{Fehler: } f_{\varepsilon_1} = f_{\varepsilon_2} = +1,2 \%$$

Eine ebenso einfache Art der Fehlerkorrektur bietet das Diagramm Bild 7.5-2. Seine Anwendung ist sinngemäß der des Fehlerdiagramms. Den richtigen Dehnungswert  $\varepsilon$  erhält man durch Multiplikation des angezeigten Dehnungswertes  $\varepsilon_a$  mit dem aus dem Diagramm ermittelten Korrekturfaktor C:

$$\varepsilon = \varepsilon_a \cdot C \quad (7.5-16)$$

Für das 1. Beispiel ist keine Korrektur erforderlich.



**Bild 7.5-2:** Diagramm zur Ermittlung des Korrekturfaktors C zur Korrektur der mit querdehnungsempfindlichen DMS erhaltenen Messwerte.

Das Beispiel 3 ergibt  $C = 0,974$ .

$$\varepsilon_a = \varepsilon + f = 100 \% + 2,8 \% = 102,8 \%,$$

$$\varepsilon = \varepsilon_a \cdot C = 102,8 \% \cdot 0,974 = 100,1 \%,$$

Unsicherheit: + 0,1 %.

Das Beispiel 4 ergibt  $C = 0,991$ .

$$\varepsilon_a = 100 \% + 1,2 \% = 101,2 \%,$$

$$\varepsilon = \varepsilon_a \cdot C = 101,2 \% \cdot 0,991 = 100,2 \%,$$

Unsicherheit: + 0,2 %.

Für die vorstehend beschriebene Fehlerrechnung und -korrektur muss das Verhältnis  $\varepsilon_q/\varepsilon$  bekannt sein. Das trifft zu z. B. beim einachsigen Spannungszustand und bekannter Querszahl  $\nu$  und bei reiner Torsionsbeanspruchung einer Welle ( $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ ). In allen anderen Fällen müssen die Dehnungen in der Richtung des Messgitters und quer dazu gemessen werden, z. B. mit den sogenannten X-Rosetten (s. Abschnitt 3.2.2.2).

## 7.5.2 Korrekturen für DMS-Rosetten

Die Querempfindlichkeit geometrisch identischer Messgitter ist bei Folien-DMS in geringem Maße von der Richtung abhängig, welche die Messgitterachse zur Walzrichtung der Folie einnimmt. Bei X-Rosetten mit der Messgitteranordnung  $0^\circ/90^\circ$  sind die Messgitterachsen bei der Herstellung in Bezug zur Walzrichtung unter  $\pm 45^\circ$  angeordnet und haben deshalb gleiche Querempfindlichkeit. Bei dreiteiligen Rosetten des  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ - und des  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ -Typs ist diese Übereinstimmung nur angenähert erreichbar. Die Unterschiede sind jedoch so gering, dass für praktische Bedürfnisse mit gleichen Werten gerechnet werden kann. Im Diagramm Bild 3.3.7b) ist deshalb auch jeweils nur 1 Wert angegeben.

### 7.5.2.1 X-Rosetten $0^\circ/90^\circ$

X-Rosetten mit zwei um  $90^\circ$  zueinander angeordneten Messgitterachsen (s. Abschnitt 3.2.2.2) werden üblicherweise zu Dehnungsmessungen in zweiachsigen Dehnungsfeldern mit bekannten Hauptrichtungen verwendet. Dabei werden die Messgitterachsen 1 und 2 übereinstimmend mit den Hauptachsen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  angebracht. Aus den Messwerten  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  lassen sich die Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  berechnen (s. Abschnitt 8.2.1).

Die nachstehend gegebene Korrekturrechnung gilt jedoch nicht nur für DMS-Anordnungen in den Hauptrichtungen, sie gilt auch für jede beliebige Richtung des Achsenkreuzes innerhalb eines Dehnungsfeldes. Die Indizierung der Dehnung erfolgt deshalb nunmehr mit  $x$  und  $y$  anstatt 1 und 2 ( $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  anstatt  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ). Man kann für jede beliebige Lage des unter  $90^\circ$  zueinander stehenden Kreuzes

der Messgitterachsen aus den angezeigten (gemessenen) Dehnungswerten  $\varepsilon_{xa}$  und  $\varepsilon_{ya}$  die richtigen Dehnungen  $\varepsilon_x$  und  $\varepsilon_y$  berechnen.

$$\varepsilon_x = \frac{1 - \nu_0 \cdot q}{1 - q^2} (\varepsilon_{xa} - q \cdot \varepsilon_{ya}) \approx (1 - \nu_0 \cdot q) (\varepsilon_{xa} - q \cdot \varepsilon_{ya}) \quad (7.5-17)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1 - \nu_0 \cdot q}{1 - q^2} (\varepsilon_{ya} - q \cdot \varepsilon_{xa}) \approx (1 - \nu_0 \cdot q) (\varepsilon_{ya} - q \cdot \varepsilon_{xa}) \quad (7.5-18)$$

Die Näherungsformen der Gln. (7.5-17) und (7.5-18) sind für praktische Anforderungen ausreichend genau, denn  $1 - q^2$  ist bei  $q = 0,03$  schon größer als 0,999.

Man kann auch hierbei alternativ zur Korrekturrechnung das Diagramm Bild 7.5-2 anwenden. Zunächst muss man für jeden der beiden DMS das Verhältnis von Quer- zu Längsdehnung bestimmen; das ist

$$\frac{\varepsilon_{ya}}{\varepsilon_{xa}} \text{ für den DMS in x-Richtung.}$$

$$\frac{\varepsilon_{xa}}{\varepsilon_{ya}} \text{ für den DMS in y-Richtung.}$$

Danach suche man im Diagramm den zutreffenden Wert für  $q$  auf, fahre senkrecht hoch bis zu dem für das jeweilige Rosetten-Messgitter zutreffenden Parameter des Dehnungsverhältnisses  $\varepsilon_q/\varepsilon_1$  (bzw. bis zu dem Zwischenwert) und von da nach links bis zur Ordinatenkala, an welcher die Korrekturfaktoren  $C_x$  bzw.  $C_y$  abzulesen sind.

$$\varepsilon_x = C_x \cdot \varepsilon_{xa}, \quad (7.5-19)$$

$$\varepsilon_y = C_y \cdot \varepsilon_{ya}. \quad (7.5-20)$$

An einem Beispiel sollen die beiden Methoden erläutert und deren Ergebnisse gegenübergestellt werden.

Beispiel:

X-Rosette  $0^\circ/90^\circ$ ,

$q = 0,03$

$\nu_0 = 0,285$ .

Messwerte:  $\varepsilon_{xa} = + 1280 \mu\text{m/m}$   
 $\varepsilon_{ya} = + 750 \mu\text{m/m}$ .

Eingesetzt in die Gln. (7.4-7) und (7.4-8) ergibt das:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= (1 - 0,285 \cdot 0,03) \cdot (1280 - 0,03 \cdot 750) = 1247 \mu\text{m/m}, \\ \varepsilon_y &= (1 - 0,285 \cdot 0,03) \cdot (750 - 0,03 \cdot 1280) = 706 \mu\text{m/m},\end{aligned}$$

Bei Verwendung des Korrekturdiagramms Bild 7.5-2 ergibt sich

$$\begin{aligned}\frac{\varepsilon_{ya}}{\varepsilon_{xa}} &= \frac{750}{1280} = 0,59 \approx 0,6 \quad \text{für das X-Messgitter,} \\ \frac{\varepsilon_{xa}}{\varepsilon_{ya}} &= \frac{1280}{750} = 1,71 \approx 1,7 \quad \text{für das Y-Messgitter,} \\ C_x &= 0,977; C_y = 0,945.\end{aligned}$$

Damit wird

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= C_x \cdot \varepsilon_{xa} = 0,977 \cdot 1280 = 1250 \mu\text{m/m.} \\ \varepsilon_y &= C_y \cdot \varepsilon_{ya} = 0,945 \cdot 750 = 708 \mu\text{m/m.}\end{aligned}$$

### 7.5.2.2 R-Rosetten

Wenn die Richtungen der Hauptachsen unbekannt sind, benötigt man drei voneinander unabhängige Messungen für eine vollständige Bestimmung des Dehnungs- bzw. Spannungszustandes. Die dazu gebräuchlichen Rosettenformen sind im Abschnitt 3.2.2.2 beschrieben. Die Rosetten mit  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ - bzw.  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ -Winkelabstand ihrer Messgitter kommen hierfür in Frage. Sie sind gleichwertig, bedürfen aber unterschiedlicher Formeln für die Korrektur der Querempfindlichkeit. (Die Methoden zur Berechnung der Hauptdehnungen bzw. Hauptspannungen und deren Richtungen sind im Abschnitt 8.2.2 beschrieben).

#### R-Rosetten $0^\circ/45^\circ/90^\circ$

Die Messwerte der  $0^\circ$ - und  $90^\circ$ -Messgitter sind in der gleichen Weise zu korrigieren, wie die der  $0^\circ/90^\circ$ -X-Rosette. Es gelten die Gln. (7.5-17) und (7.5-18) in der Form (7.5-21) und (7.5-23).

Ebenso kann das Diagramm Bild 7.5-2 zur Ermittlung der Korrekturfaktoren benutzt werden.

Das mittlere  $45^\circ$ -Messgitter bedarf einer abweichenden Korrekturgleichung. Der Einfachheit halber werden nachstehend alle 3 Gleichungen aufgeführt.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{0^\circ} &= \frac{(1 - \nu_0 \cdot q)}{1 - q^2} (\varepsilon_{0^\circ a} - q \cdot \varepsilon_{90^\circ a}) \\ \varepsilon_{0^\circ} &\approx (1 - \nu_0 \cdot q) (\varepsilon_{0^\circ a} - q \cdot \varepsilon_{90^\circ a})\end{aligned}\tag{7.5-21}$$

$$\varepsilon_{45^\circ} = \frac{(1 - \nu_0 \cdot q)}{1 - q^2} [\varepsilon_{45^\circ a} - q (\varepsilon_{0^\circ a} + \varepsilon_{90^\circ a} - \varepsilon_{45^\circ a})] \quad (7.5-22)$$

$$\varepsilon_{45^\circ} \approx (1 - \nu_0 \cdot q) [\varepsilon_{45^\circ a} - q (\varepsilon_{0^\circ a} + \varepsilon_{90^\circ a} - \varepsilon_{45^\circ a})]$$

$$\varepsilon_{90^\circ} = \frac{(1 - \nu_0 \cdot q)}{1 - q^2} (\varepsilon_{90^\circ a} - q \cdot \varepsilon_{0^\circ a}) \quad (7.5-23)$$

$$\varepsilon_{90^\circ} \approx (1 - \nu_0 \cdot q) (\varepsilon_{90^\circ a} - q \cdot \varepsilon_{0^\circ a})$$

Der Index a steht immer für „angezeigter“ Dehnungswert;  $\varepsilon_{0^\circ a}$  ist der angezeigte (gemessene) Dehnungswert des Messgitters in der  $0^\circ$ -Richtung usw.

$\varepsilon_{0^\circ}$ ,  $\varepsilon_{45^\circ}$ ,  $\varepsilon_{90^\circ}$  sind die korrigierten Dehnungswerte in den  $0^\circ$ -,  $45^\circ$ - und  $90^\circ$ -Richtungen.

#### R-Rosetten $0^\circ/60^\circ/120^\circ$

Die Korrektur der Messwerte der  $0^\circ$ -,  $60^\circ$ - und  $120^\circ$ -Messgitter erfolgt in ähnlicher Weise wie vorstehend, jedoch nach den untenstehenden Gleichungen.

$$\varepsilon_{0^\circ} = \frac{(1 - \nu_0 \cdot q)}{1 - q^2} \left[ \left(1 + \frac{q}{3}\right) \cdot \varepsilon_{0^\circ a} - \frac{2}{3} q \left( \varepsilon_{60^\circ a} + \varepsilon_{120^\circ a} \right) \right] \quad (7.5-24)$$

$$\varepsilon_{0^\circ} \approx (1 - \nu_0 \cdot q) \left[ \left(1 + \frac{q}{3}\right) \cdot \varepsilon_{0^\circ a} - \frac{2}{3} q \left( \varepsilon_{60^\circ a} + \varepsilon_{120^\circ a} \right) \right]$$

$$\varepsilon_{60^\circ} = \frac{(1 - \nu_0 \cdot q)}{1 - q^2} \left[ \left(1 + \frac{q}{3}\right) \cdot \varepsilon_{60^\circ a} - \frac{2}{3} q \left( \varepsilon_{120^\circ a} + \varepsilon_{0^\circ a} \right) \right] \quad (7.5-25)$$

$$\varepsilon_{60^\circ} \approx (1 - \nu_0 \cdot q) \left[ \left(1 + \frac{q}{3}\right) \cdot \varepsilon_{60^\circ a} - \frac{2}{3} q \left( \varepsilon_{120^\circ a} + \varepsilon_{0^\circ a} \right) \right]$$

$$\varepsilon_{120^\circ} = \frac{(1 - \nu_0 \cdot q)}{1 - q^2} \left[ \left(1 + \frac{q}{3}\right) \cdot \varepsilon_{120^\circ a} - \frac{2}{3} q \left( \varepsilon_{0^\circ a} + \varepsilon_{60^\circ a} \right) \right] \quad (7.5-26)$$

$$\varepsilon_{120^\circ} \approx (1 - \nu_0 \cdot q) \left[ \left(1 + \frac{q}{3}\right) \cdot \varepsilon_{120^\circ a} - \frac{2}{3} q \left( \varepsilon_{0^\circ a} + \varepsilon_{60^\circ a} \right) \right]$$

## 8 Das Hooke'sche Gesetz zur Ermittlung von Werkstoffspannungen aus Dehnungsmessungen

Die Methode zur Berechnung der Werkstoffspannungen aus gemessenen Dehnungen basieren auf dem Hooke'schen Gesetz. Seine Gültigkeit erstreckt sich auf den elastischen Verformungsbereich linearelastischer Werkstoffe. In seiner einfachsten Form lautet das Hooke'sche Gesetz.

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (8.0-1)$$

$\sigma$  = Werkstoff-Spannung (s. Abschnitt 2.2.1)

$\varepsilon$  = Dehnung (s. Abschnitt 2.1)

E = Elastizitätsmodul des Werkstoffs (s. Abschnitt 2.3.1)

Diese Fassung des Hooke'schen Gesetzes ist nur für den einachsigen Spannungszustand gültig; andere Spannungszustände verlangen erweiterte Fassungen (hierzu s. Abschnitt 2.2.4 und nachfolgende Abschnitte).

In diesem Zusammenhang sei auf einen wichtigen Umstand verwiesen:

Mit Dehnungsmessungen kann immer nur der Unterschied zwischen einem bestehenden Ausgangszustand und einem später eingetretenen veränderten Zustand bestimmt werden. Der Ausgangszustand kann ein lastfreier Zustand sein, er kann aber auch ein Zustand erheblicher Vorbelastung sein, beispielsweise durch das Eigengewicht des Objektes (Beispiel: Brücke).

Vorbelastungen oder auch Eigenspannungszustände (s. Abschn. 2.2.3) lassen sich nur dann messen, wenn ein Eingriff in das Objekt erlaubt ist, z. B. das Anbringen einer kleinen Bohrung (s. Abschn. 8.3).

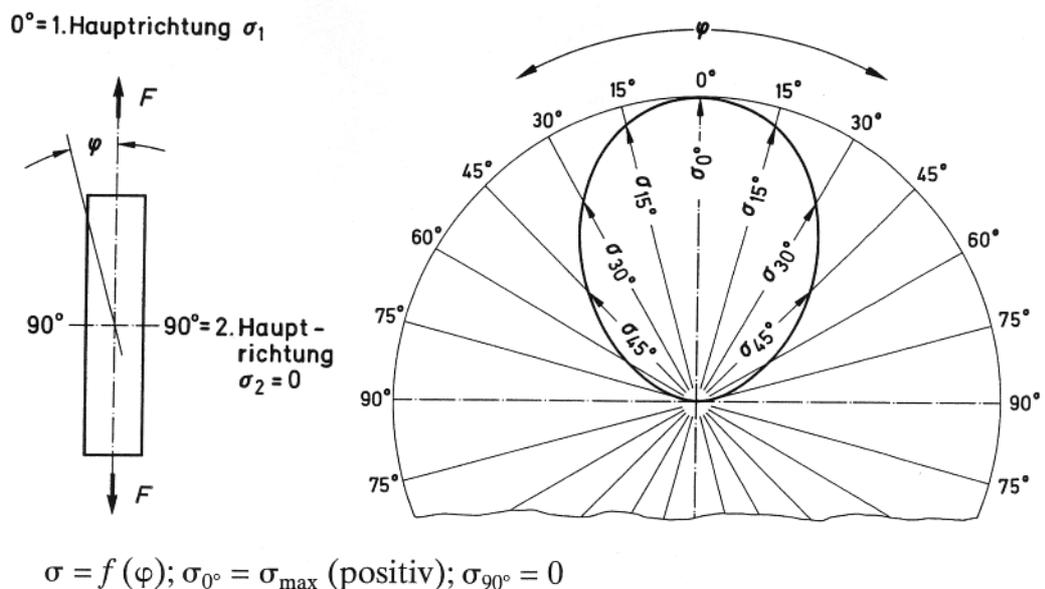
## 8.1 Der einachsige Spannungszustand

Der einfachste Fall des einachsigen Spannungszustandes tritt bei Zug- und Druckstäben auf. Das Maximum der Zug- (bzw. Druck-) Spannungen entsteht in der Kraftwirkungsrichtung. In allen anderen Richtungen sind die Spannungen kleiner und folgen der Beziehung

$$\sigma = f(\varphi) = \frac{1}{2} \sigma_{\max} (1 + \cos 2\varphi). \quad (8.1-1)$$

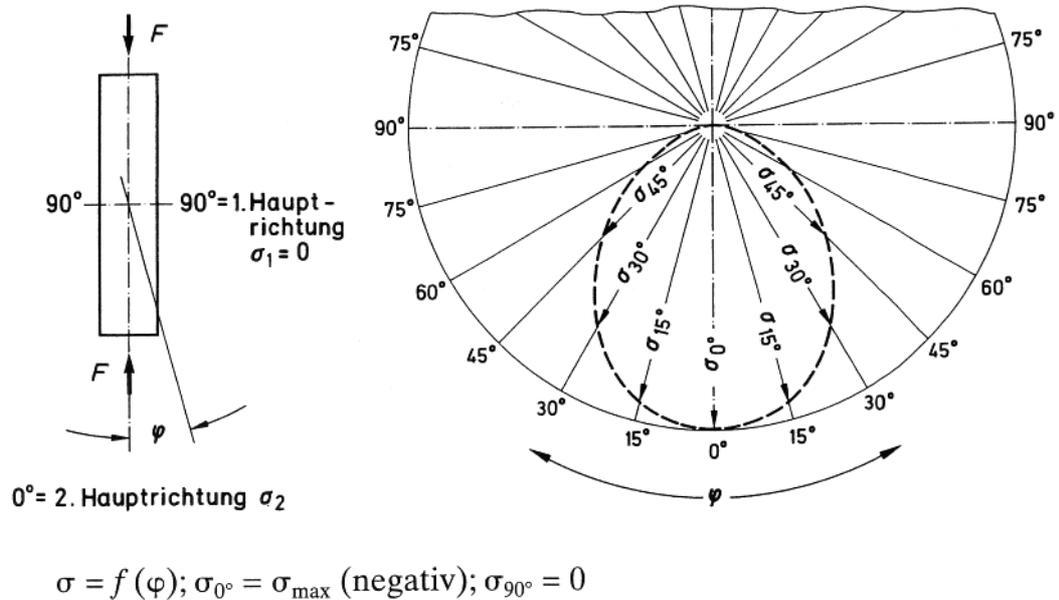
$\varphi$  = Winkel zwischen der Kraftwirkungsrichtung (Haupttrichtung) und der in Betracht gezogenen Richtung.

Im Bild 8.1-1 ist diese Beziehung für den Zugstab in einem Polardiagramm dargestellt.



**Bild 8.1-1: Spannungsverteilung am Zugstab**

Das Bild 8.1-2 zeigt die Beziehung (8.1-1) für den Druckstab.



**Bild 8.1-2: Spannungsverteilung am Druckstab**

Anmerkung:

Die 1. und die 2. Hauptrichtung stehen immer senkrecht zueinander. Die 1. Hauptrichtung ist immer die mit dem algebraisch größeren Zahlenwert; deshalb der Wechsel der Induzierung vom Zug- und Druckstab.

Betrachtet man die Dehnungsverteilung in gleicher Weise, wie dies zuvor mit der Spannungsverteilung geschehen ist, so findet man trotz des einachsigen Spannungszustandes einen zweiachsigen Dehnungszustand.

Betrachtet man die Dehnungsverteilung in gleicher Weise, wie dies zuvor mit der Spannungsverteilung geschehen ist, so findet man trotz des einachsigen Spannungszustandes einen zweiachsigen Dehnungszustand.

Es gibt zwei ausgezeichnete Richtungen, eine in der Kraftwirkungsrichtung ( $0^\circ$ ) und die andere quer dazu ( $90^\circ$ ).

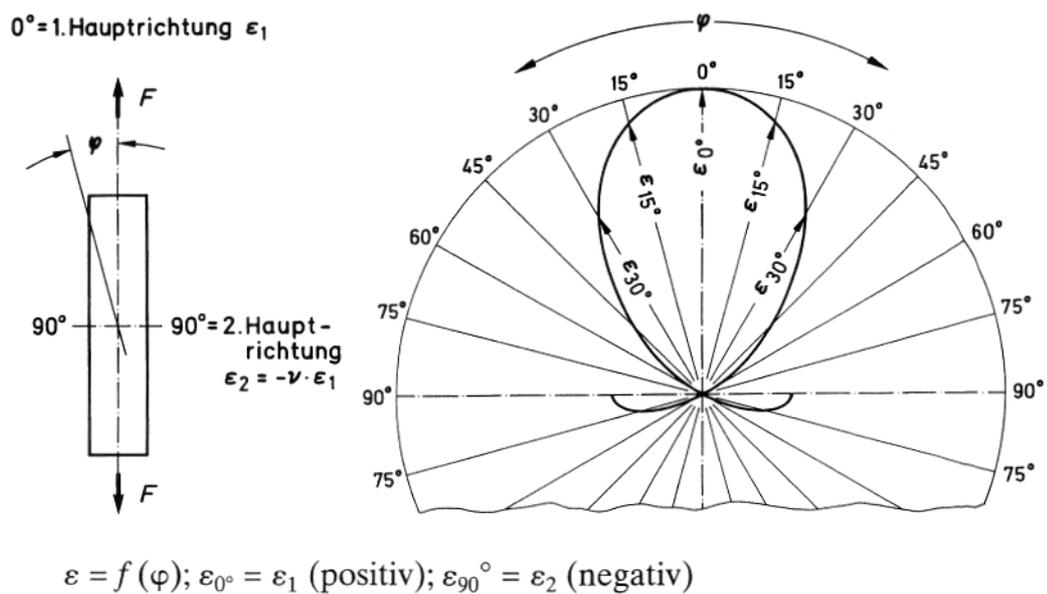
Ausgehend von der Hauptdehnung  $\varepsilon_{0^\circ} = \varepsilon_1$  lassen sich die Dehnungen  $\varepsilon_\varphi$ , die im Winkel  $\varphi > 0^\circ \dots 90^\circ$  zur x-Richtung auftreten, nach der Beziehung berechnen:

$$\varepsilon = f(\varphi) = \frac{1}{2} \varepsilon_1 [1 - \nu + \cos 2 \varphi (1 + \nu)]. \quad (8.1-2)$$

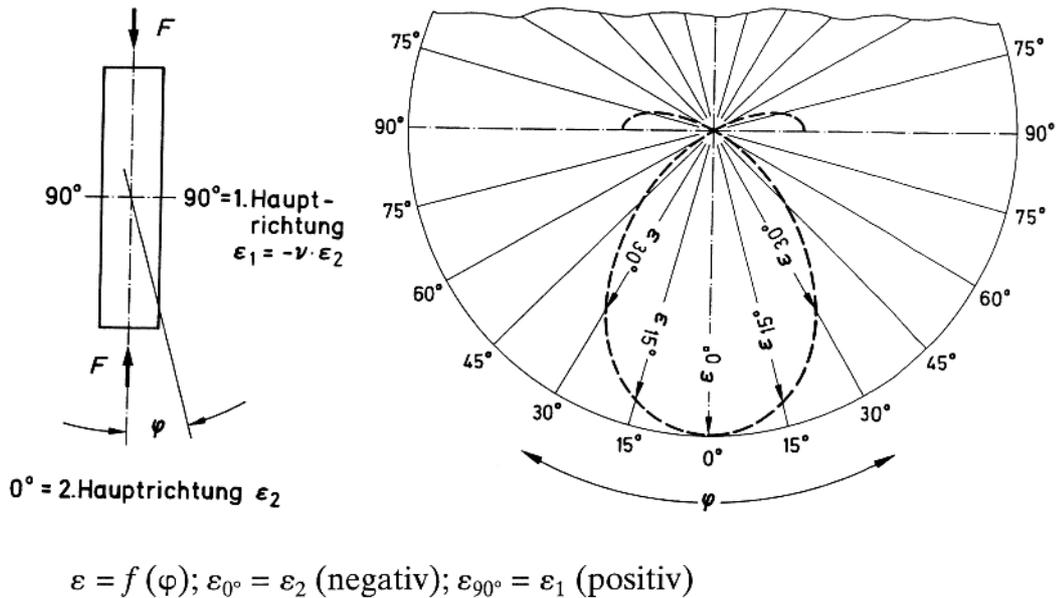
Das Verhältnis der beiden Hauptdehnungen zueinander wird durch die Poissonzahl  $\mu$  oder deren Kehrwert, die Querszahl  $\nu$ , ausgedrückt (s. Abschn. 2.3.3):

$$\varepsilon_2 = -\nu \cdot \varepsilon_1$$

In den Bildern 8.1-3 und 8.1-4 ist die Beziehung (8.1-2) für einen Zugstab bzw. Druckstab dargestellt.



**Bild 8.1-3: Dehnungsverteilung am Zugstab**



**Bild 8.1-4: Dehnungsverteilung am Druckstab**

Anmerkung:

Die Diagramme Bild 8.1.-3 und Bild 8.1.-4 sind für einen Werkstoff mit der Querszahl  $\nu = 0,3$  gezeichnet. In diesem Fall wird beim Winkel  $\varphi = 61^\circ 20'$  die Dehnung  $\varepsilon_\varphi = 0$ ; d. h. in dieser Richtung ist der Nulldurchgang zwischen dem positiven und dem negativen Dehnungsbereich:

Der in den Diagrammen dargestellte Unterschied zwischen der Spannungsverteilung und der Dehnungsverteilung in Abhängigkeit von der Kraftwirkungsrichtung führt zu einer äußerst wichtigen Folgerung:

Die Werkstoffspannung  $\sigma$  darf nur dann nach dem Hooke'schen Gesetz für den einachsigen Spannungszustand nach Gleichung (8.0-1) aus der gemessenen Dehnung  $\varepsilon$  berechnet werden, wenn die Dehnung in der Kraftwirkungsrichtung (in den Bildern 8.1-3 und 8.1-4 die  $0^\circ$ -Richtung) gemessen wurde! In der Querrichtung ( $90^\circ$ -Richtung) ist trotz der messbaren Dehnung (Querkontraktion, Querdilatation) **keine Werkstoffspannung vorhanden!**

Man muss also, will man zu verlässlichen Ergebnissen kommen, die Kraftwirkungsrichtung kennen und in dieser Richtung die Dehnung messen. Ist diese Richtung nicht oder nur näherungsweise bekannt, dann sind Messungen und deren Auswertung wie beim zweiachsigen Spannungszustand mit unbekanntem Hauptrichtungen gemäß Abschnitt 8.2.2 auszuführen.

## 8.2 Der zweiachsige Spannungszustand

Im Aufgabengebiet der experimentellen Spannungsanalyse dürfte der einachsige Spannungszustand eher einen Ausnahmefall darstellen. Weitaus häufiger wird man den zweiachsigen Spannungszustand antreffen, dessen Ermittlung nicht mehr in der für den einachsigen Spannungszustand zutreffenden, einfachen Weise vorgenommen werden darf; dies würde zu beträchtlichen Fehlern führen (s. Abschn. 8.1).

Beim ebenen Spannungszustand treten die extremen Normalspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  in den rechtwinklig aufeinander stehenden Richtungen 1 und 2 auf. Man nennt die Spannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  die Hauptspannungen und analog die Richtungen 1 und 2 die Hauptrichtungen des ebenen Spannungsfeldes. Sind die Hauptnormalspannungen und ihre Wirkungsrichtungen bekannt, dann ist der zweiachsige Spannungszustand eindeutig definiert.

Bekannte Hauptspannungsrichtungen findet man z. B. an der Oberfläche eines kreiszylindrischen Behälters unter Innendruck, an einer mit reiner Torsion beanspruchten Welle, im randzonenfreien Bereich einer gebogenen Platte.

Bei anderen Objekten und bei gleichzeitiger Einwirkung verschiedener Einflussgrößen, wie z. B. Normalkraft und Biegung oder Torsion und Biegung o. dgl. müssen die Hauptrichtungen als nicht bekannt vorausgesetzt werden.

### 8.2.1 Der zweiachsige Spannungszustand mit bekannten Hauptrichtungen

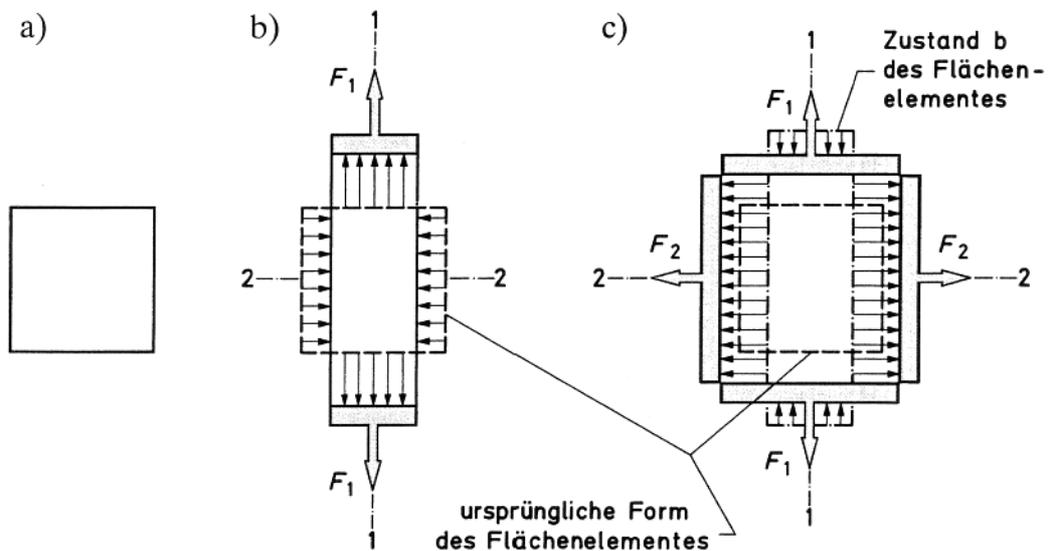
Der Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen im zweiachsigen Spannungsfeld und das Ineinandergreifen von Längs- und Querdehnung soll anhand eines Beispiels schrittweise erklärt werden. Ausgangszustand des als Beispiel herangezogenen Objekts sei ein unbelastetes quadratisches Flächenelement, Bild 8.2-1a.

Dieses Flächenelement sei nun mit einer gleichmäßig über die ganze Fläche des Elementes in der Richtung 1-1 wirkenden Zugkraft  $F_1$  beansprucht, Bild 8.2-1b. In der Kraftwirkungsrichtung entsteht die Werkstoffspannung  $\sigma_1$  sowie die Längsdehnung  $\varepsilon_1$ , in der Querrichtung ist die Werkstoffspannung  $\sigma_2 = 0$  (einachsiger Spannungszustand), die Querdehnung  $\varepsilon_2$  ist negativ (Querkontraktion).

Wenn nunmehr zusätzlich auf dieses einachsiger belastete Flächenelement und rechtwinklig zur 1-1 Richtung eine zweite Zugkraft  $F_2$  in der Richtung 2-2 einwirkt, ergibt sich eine Überlagerung der beiden Spannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  mit Rückwirkung auf den bestehenden Dehnungszustand, Bild 8.2-1c. In der Richtung

2-2 entsteht eine Dehnung  $\varepsilon_2$ , die sich der Querkontraktion aus dem Belastungszustand b überlagert (und sie in diesem Beispiel sogar überschreitet). In

der 1-1-Richtung entsteht infolge der Belastung in der 2-2-Richtung eine Querkontraktion, die sich der bestehenden Dehnung aus dem Belastungszustand b ebenfalls überlagert und so diese vermindert. Aufgrund dieser Überlagerung der Dehnung und Querkontraktion aus den beiden Belastungen in den Hauptrichtungen 1 und 2 geht der einfache lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung, den das Hooke'sche Gesetz für den einachsigen Spannungszustand formuliert, verloren. Die Gleichung (8.0-1) ist nicht mehr anwendbar, weil sie den Einfluss der Querdehnung nicht berücksichtigt. (Hierzu siehe Anmerkung auf Seite 221). Deshalb ist auch die Bestimmung des zweiachsigen Spannungszustandes aus einer einzigen Dehnungsmessung nicht möglich. Es müssen die beiden in den Hauptrichtungen 1 und 2 auftretenden Hauptdehnungen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  getrennt gemessen werden.



**Bild 8.2-1: Aufbau eines zweiachsigen Spannungszustandes mit Darstellung des resultierenden Dehnungszustandes**

a) unbelastetes Flächenelement

b) in Richtung 1 belastetes Flächenelement

c) in den Richtungen 1 und 2 belastetes Flächenelement

Die Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  des zweiachsigen ebenen Spannungszustandes errechnen sich nach dem erweiterten Hooke'schen Gesetz aus den gemessenen Hauptdehnungen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$ , dem Elastizitätsmodul  $E$  des Werkstoffs und der Querszahl  $\nu$  des Werkstoffs zu

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2) \quad (8.2-1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \cdot \varepsilon_1) \quad (8.2-2)$$

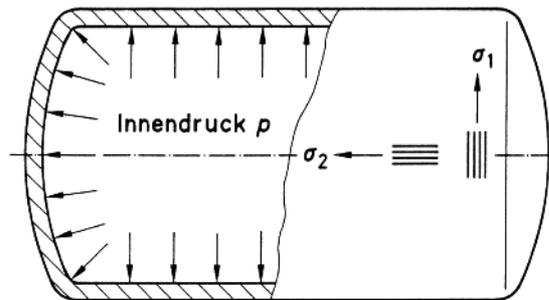
Es wird vorausgesetzt, dass die Spannung  $\sigma_3$  in der 3. Hauptrichtung (senkrecht zur Oberfläche) gleich null ist.

Zur Auswertung von Messungen ist immer von den Gleichungen (8.2-1) und (8.2-2) auszugehen, auch dann, wenn  $\varepsilon_2 = 0$  ist!

Anmerkung:

In dem angegebenen Beispiel sind die beiden Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  positiv und von ähnlicher Größe. Es ist durchaus möglich, dass sich die beiden Spannungen in ihrer Größe sehr unterscheiden oder sogar unterschiedliche Vorzeichen haben, wodurch sich die Dehnungsverhältnisse wesentlich unübersichtlicher gestalten können. So kann es vorkommen, dass in einer Richtung trotz positiver Dehnung eine negative Spannung herrscht und umgekehrt.

Ein Beispiel für ein Objekt, dessen Oberfläche einem zweiachsigen Spannungszustand mit bekannten Hauptrichtungen unterliegt, gibt Bild 8.2-2.



**Bild 8.2-2: Ein mit Innendruck beanspruchter Kessel mit kreiszylindrischem Querschnitt.**

Auf der Außenfläche des zylindrischen Kesselmantels entsteht ein zweiachsiger Spannungszustand. Dessen 1. Hauptrichtung  $\sigma_1$  verläuft tangential (in Umfangsrichtung), die 2. Hauptrichtung  $\sigma_2$  verläuft axial. Die beiden Hauptspannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  errechnet man aus den gemessenen Hauptdehnungen  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  nach den Formeln (8.2-1) und (8.2-2).

Ein anderes Beispiel, eine auf Torsion beanspruchte Welle, ist im Abschnitt 8.4.4 beschrieben.

Selbst bei derart klar erscheinenden Belastungszuständen sollte der Messtechniker immer ein gesundes Maß an Skepsis mitbringen, denn äußerlich nicht erkennbare zusätzliche Normal- und/oder Biegebeanspruchungen können leicht den vermuteten Zustand bekannter Hauptrichtungen in einen solchen mit unbekanntenen Hauptrichtungen verwandeln. Dann sind die im Abschnitt 8.2.2 angegebenen Formeln anzuwenden.

Zur Verminderung des Applikationsaufwandes eignen sich für Messungen im zweiachsigen Spannungsfeld mit bekannten Hauptrichtungen die im Abschnitt 3.2.2.2 beschriebenen und im Bild 3.2-9a dargestellten X-Rosetten. Die Achsen der beiden Messgitter müssen übereinstimmend mit den Achsen der Hauptnormalspannungen (= Hauptdehnungsrichtungen) appliziert sein!

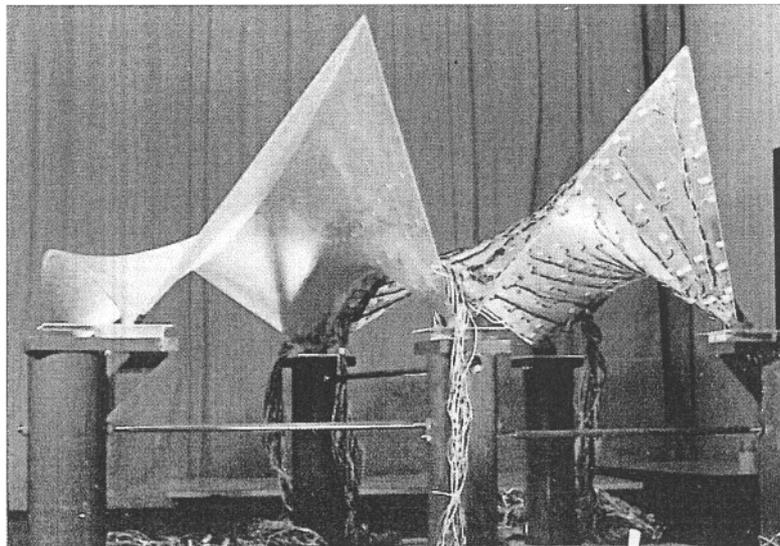
### 8.2.2 Der zweiachsige Spannungszustand mit unbekanntem Hauptrichtungen

Bei kompliziert gestalteten Objekten, bei Überlagerung verschiedener Beanspruchungsarten (Normal-, Biege- und/oder Torsionsbeanspruchung) oder an Störstellen (z. B. Querschnittsänderungen) ist eine Voraussage der Hauptspannungsrichtungen in aller Regel nicht möglich. Eine Analyse nach der im Abschnitt 8.2.1 beschriebenen Methode scheidet deshalb aus.

In jedem Fall, in dem die Hauptspannungsrichtungen nicht eindeutig feststehen, muss die Spannungsanalyse nach der hierunter beschriebenen Methode durchgeführt werden [8-1].

Die Bilder 8.2-3 und 8.2-4 zeigen als Beispiel eines kompliziert gestalteten Objekts ein Schalentragwerk. Die spannungsanalytische Untersuchung wurde an dem im Bild 8.2-3 gezeigten Modell vorgenommen [8-2]. Das Bild 8.2-4 zeigt die Hauptausführung.

Das Ziel ist auch hier die Ermittlung der Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  und der Hauptspannungsrichtungen.



**Bild 8.2-3:** Beispiel für ein Objekt mit unbekanntem Hauptrichtungen (nach [8-2]). Kunststoffmodell eines Betonschalendachs zur spannungsanalytischen Untersuchung

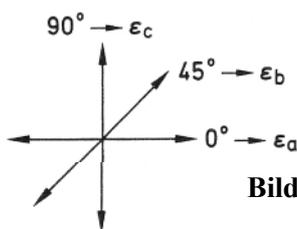


**Bild 8.2-4: Hauptausführung zu Bild 8.2-3 (nach [8-2])**

Hierbei ist es notwendig, an jeder interessierenden Stelle die Dehnung in drei verschiedenen Richtungen zu messen. Diese Richtungen, die nicht mit den Hauptrichtungen übereinstimmen, werden üblicherweise mit den Buchstaben a, b, c bezeichnet und die in diesen Richtungen gemessenen Dehnungen  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$  und  $\varepsilon_c$  indiziert. Wichtig ist die Reihenfolge der Messgitterachsen a, b, c im mathematisch positiven Drehsinn (linksdrehend bei der Draufsicht auf das Messobjekt), wichtig deshalb, weil den Formeln (8.2-3) bis (8.2-7) zur Berechnung der Hauptnormalspannungen und deren Richtungen dieser Drehsinn zugrundeliegt. Um Verwechslungen zu vermeiden, sind bei den HBM-Rosetten die entsprechenden Messgitteranschlüsse mit den Buchstaben a, b und c gekennzeichnet. Prinzipiell könnten diese drei Dehnungen in beliebiger Richtung gemessen werden. In der Praxis haben sich jedoch zwei Systeme herausgebildet, bei welchen die Auswertung nach den jeweils zugehörigen Formeln erfolgt. Die dafür angebotenen Spezial-DMS, sogenannte R-Rosetten, haben jeweils 3 Messgitter auf einem gemeinsamen Träger. Sie sind im Abschnitt 3.2.2.2 beschrieben.

### 8.2.2.1 Messung mit der $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ -Rosette

Das Bild 3.2-9b zeigt einige Beispiele möglicher Messgitter-Anordnungen innerhalb der Gruppe der  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ -Rosetten.



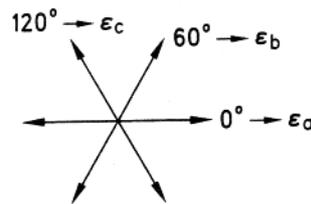
**Bild 8.2-5: Zuordnung der Dehnungen  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$ ,  $\varepsilon_c$  zu den Winkelrichtungen  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ .**

Die Berechnung der Hauptnormalspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  erfolgt nach der Beziehung

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad (8.2-3)$$

### 8.2.2.2 Messung mit der 0°/60°/120°-Rosette

Das Bild 3.2-9c zeigt einige Beispiele möglicher Messgitter-Anordnungen innerhalb der Gruppe der 0°/60°/120°-Rosetten.



**Bild 8.2-6:** Zuordnung der Dehnungen  $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$  zu den Winkelrichtungen 0°, 60°, 120°.

Entsprechend der andersartigen Messgitteranordnung der Rosette erfolgt die Berechnung der Hauptnormalspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  nach der Gleichung

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \quad (8.2-4)$$

### 8.2.2.3 Die Bestimmung der Hauptrichtungen

Die Hauptrichtungen sind die Richtungen, in welchen die nach den Gleichungen (8.2-3) und (8.2-4) errechneten Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  auftreten. (Sie sind identisch mit den Hauptdehnungsrichtungen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$ .) Sie lassen sich nach geometrischen Beziehungen aus den mit der R-Rosette gemessenen Dehnungen  $\varepsilon_a, \varepsilon_b$  und  $\varepsilon_c$  bestimmen.

Die folgenden Ausführungen zielen darauf ab, dem Praktiker ein bequem und sicher zu handhabendes Schema zu liefern. Die theoretischen Aspekte des Mohr'schen Spannungskreises, der die Grundlage bildet, sind in der Fachliteratur und in [8-1] beschrieben; sie werden hier nicht behandelt.

Zunächst errechnet man den Tangens eines Hilfwinkels  $\varphi$  (psi): für die  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ -Rosette nach der Formel

$$\tan \varphi = \frac{2 \varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad \left| \quad \frac{Z}{N} \right. \quad (8.2-5)$$

für die  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ -Rosette nach der Formel

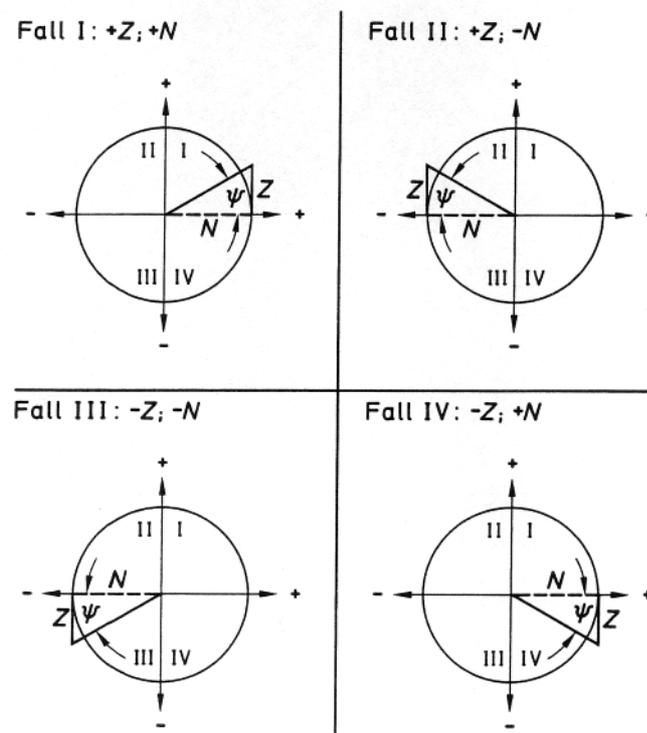
$$\tan \varphi = \frac{\sqrt{3} (\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2 \varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c} \quad \left| \quad \frac{Z}{N} \right. \quad (8.2-6)$$

Anmerkung:

Der Tangens eines Winkels im rechtwinkligen Dreieck ist das Verhältnis von Gegenkathete (= Zähler Z) zu Ankathete (= Nenner N):

$$\tan \varphi = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}} = \frac{Z}{N} \quad (8.2-7)$$

Das Bild 8.2-7 zeigt, dass der Winkel  $\varphi$  je nach den Vorzeichen von Gegenkathete und Ankathete an 4 verschiedenen Stellen des Kreises liegen kann.



**Bild 8.2-7: Schema zum Auffinden des dem Winkel  $\varphi$  zuzuordnenden Quadranten**

Diese Mehrdeutigkeit des Tangens macht es notwendig, vor der endgültigen Ausrechnung der beiden Quotienten (8.2-5) und (8.2-6) die Vorzeichen von Zähler (Z) und Nenner (N) zu bestimmen. Sie sind wichtig, weil nur aus ihnen zu erkennen ist, in welchem Quadranten des Kreises der Winkel  $\varphi$  zu finden ist. Diese eindeutige Zuordnung ist für die Bestimmung der Hauptrichtungen 1 und 2 unerlässlich.

Aus dem Zahlenwert des Tangens ist zunächst der Betrag des Winkels zu bestimmen.

$$|\varphi| = \arctan [^\circ] \quad (8.2-8)$$

Danach ist der Winkel  $\varphi$  (phi) zu bestimmen. Dies geschieht nach dem im Bild 8.2-8 vorgegebenen Schema.

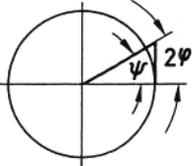
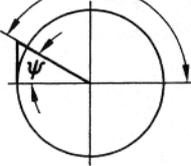
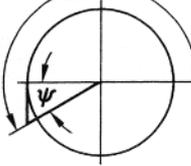
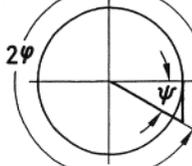
Z	$\geq 0 (+)$	$> 0 (+)$	$\leq 0 (-)$	$< 0 (-)$
N	$> 0 (+)$	$\leq 0 (-)$	$< 0 (-)$	$\geq 0 (+)$
zugehöriger Quadrant	I	II	III	IV
				
$\varphi =$	$\frac{1}{2} \cdot (0^\circ + \psi)$	$\frac{1}{2} \cdot (180^\circ - \psi)$	$\frac{1}{2} \cdot (180^\circ + \psi)$	$\frac{1}{2} \cdot (360^\circ - \psi)$

Bild 8.2-8: Schema zur Ermittlung des Winkels  $\varphi$

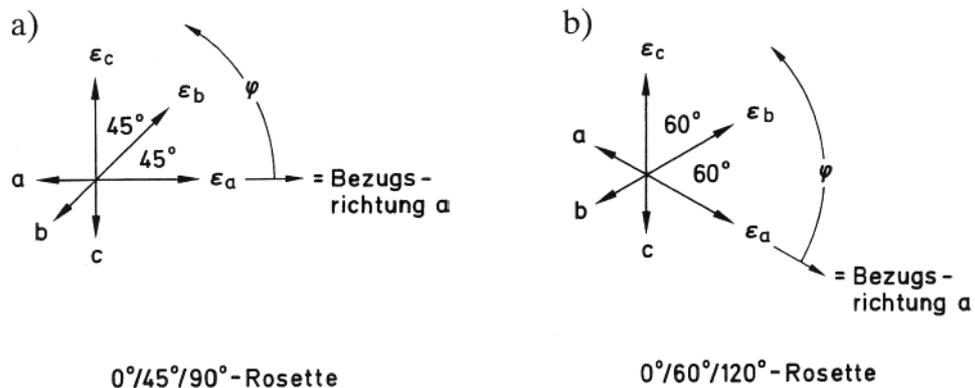


Bild 8.2-9: Antragen der Hauptspannungsrichtungen

a) bei der  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ -Rosette

b) bei der  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ -Rosette

Der so gefundene Winkel  $\varphi$  ist von der Achse des Bezugsmessgitters  $a$  ausgehend im mathematisch positiven Sinn (linksdrehend) anzutragen (s. Bild 8.2-9). Die Achse  $a$  bildet den einen Schenkel des Winkels  $\varphi$ , der zweite Schenkel gibt die 1. Hauptrichtung an (Richtung der 1. Hauptnormalspannung  $\sigma_1$ , identisch mit der 1. Hauptdehnungsrichtung  $\varepsilon_1$ ). Der Scheitelpunkt liegt im Schnittpunkt der Messgitterachsen.

Die 2. Hauptrichtung ( $\sigma_2, \varepsilon_2$ ) hat den Winkel  $(\varphi + 90^\circ)$ .

#### 8.2.2.4 Andere Möglichkeiten zur Ermittlung der Hauptnormalspannungen und deren Richtungen

- A) Eine einfache Methode war die grafische Lösung mittels spezieller Nomogramme. Sie wurden von HBM für die beiden Rosettentypen  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  und  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$  angeboten. In die Nomogramme wurden die elastischen Werkstoffkennwerte Elastizitätsmodul ( $E$ ) und Querkontraktionszahl nach Poisson ( $\nu$ ) eingearbeitet, und zwar für die Werkstoffe Stahl und Aluminium. Jede(r) Zeichner(in) konnte die Auswertung vornehmen, Kenntnisse der Festigkeitslehre waren nicht erforderlich.
- B) Entsprechende Software, z.B. catman® erlaubt einfache Auswertungen und sogar dynamische Messungen mit online-Anzeige.
- C) Bei umfangreichen Versuchsprogrammen wird man die Signale der einzelnen Messgitter von Messstellenumschaltanlagen manuell oder automatisch abfragen, sequentiell oder auch parallel verstärken und über Interfaces vorhandenen Computeranlagen zuführen, welche die Auswertung und evtl. Weiterverarbeitung übernehmen.

#### 8.2.3 Der Mohr'sche Spannungskreis

Die Hauptrichtungen 1 und 2 eines ebenen Spannungszustandes zeichnen sich dadurch aus, dass in diesen Richtungen die Hauptnormalspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  ihren größten und kleinsten Wert annehmen, während die Schubspannungen  $\tau$  zu Null werden. In jeder anderen Richtung liegen die Normalspannungen zwischen diesen Extremwerten und die Schubspannungen nehmen endliche Werte an.

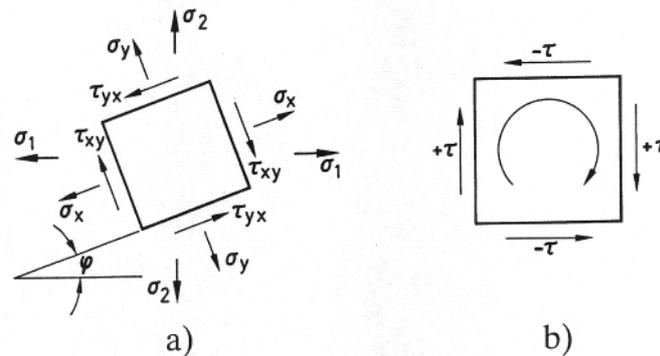
Im Bild 8.2-10a ist ein Ausschnitt aus einer zweiachsig beanspruchten Fläche mit den Hauptspannungsrichtungen  $\sigma_1, \sigma_2$  wiedergegeben. Innerhalb dieser Fläche ist ein Element eingezeichnet, dessen Koordinaten  $x, y$  und den Winkel  $\varphi$  gegenüber den Hauptachsen gedreht sind. Die an dem Element auftretenden Spannungen lassen sich berechnen nach den Beziehungen

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos 2 \varphi, \quad (8.2-9)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos 2 \varphi, \quad (8.2-10)$$

$$\tau_{xy}, \tau_{yx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin 2 \varphi. \quad (8.2-11)$$

$\tau_{xy}$  und  $\tau_{yx}$  sind immer betragsgleich; ihre Vorzeichenregel zeigt das Bild 2.8-10b. Die Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und ihre Richtungen sind nach den in den Abschnitten 8.2.1 und 8.2.2 beschriebenen Methoden zu berechnen.



**Bild 8.2-10: Zweiachsiger ebener Spannungszustand**

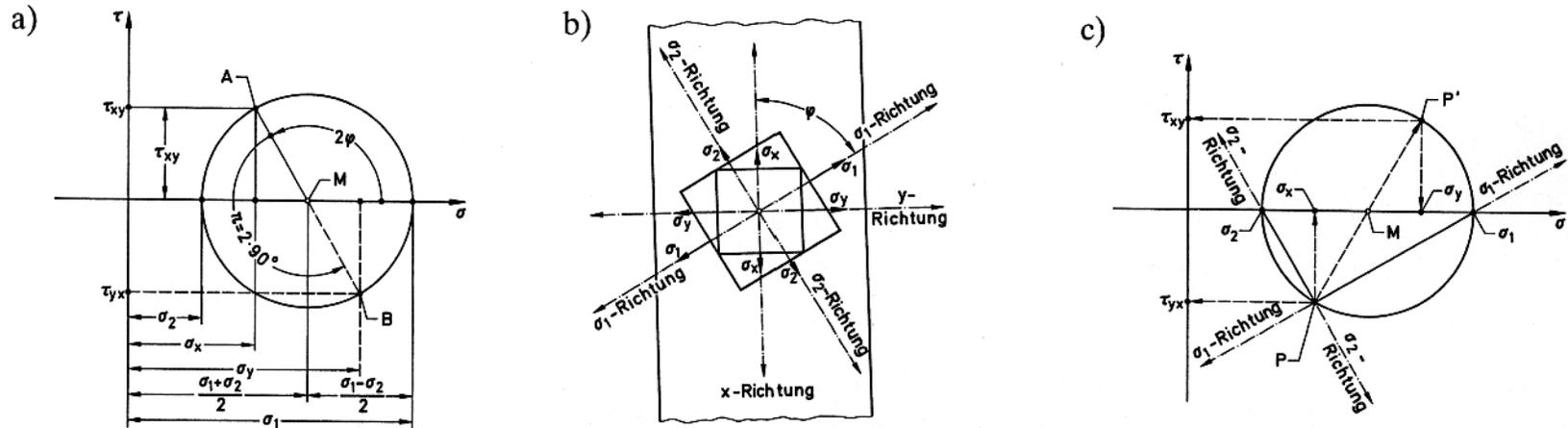
- a) Spannungen an einem Flächenelement, dessen Koordinaten  $x$ ,  $y$  um den Winkel  $\varphi$  gegenüber den Hauptrichtungen 1,2 gedreht sind.  
 b) Vorzeichenregel für die Schubspannungen  $\tau$  (durch Vereinbarung festgelegt).

Der zweiachsige ebene Spannungszustand kann auf zweierlei Art eindeutig beschrieben werden:

- durch Angabe der Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und deren Hauptrichtungen,
- durch Angabe der Normalspannungen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und der Schubspannungen  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yx}$ .

Die erste Lösung ergibt sich aus den in den Abschnitten 8.2.1 und 8.2.2 beschriebenen Methoden, die zweite ergibt sich aus dem Mohrschen Spannungskreis. Die zweite wählt man, wenn die Spannungen auf ein am Bauteil vorgegebenes Koordinatensystem zu beziehen sind.

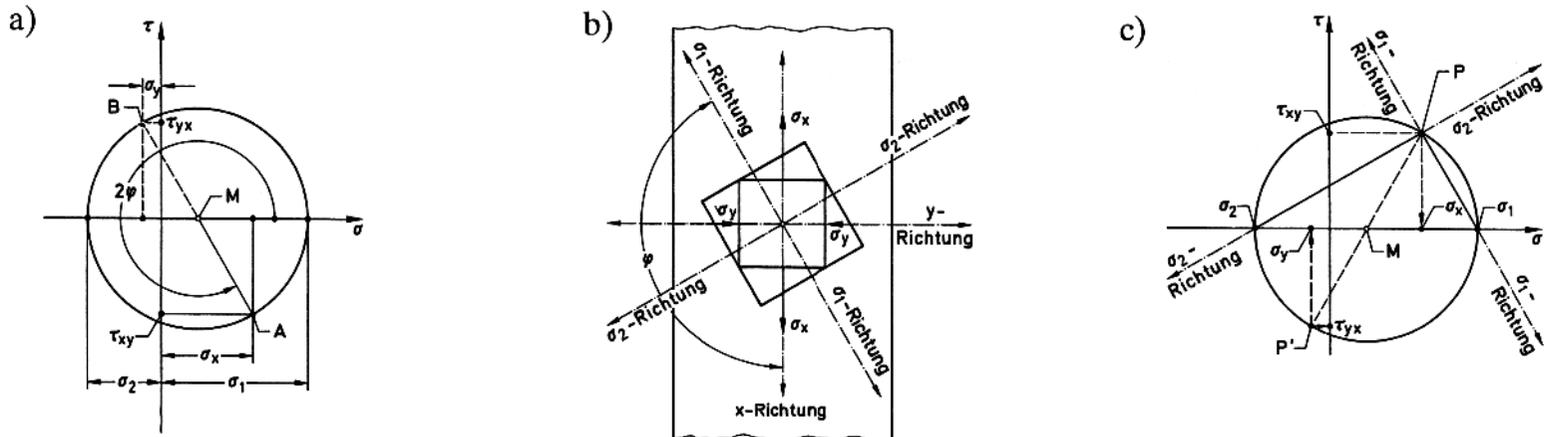
Der Mohr'sche Spannungskreis wird in einem orthogonalen  $\sigma$ - $\tau$ -Koordinatensystem dargestellt, Bild 8.2-11a.



**Bild 8.2-11: Der Mohr'sche Spannungskreis, 1. Beispiel**

a) Konstruktion    b) Spannungssituation am Bauteil  
 Weitere Erläuterungen im Text

c) Polkonstruktion



**Bild 8.2-12: Der Mohr'sche Spannungskreis, 2. Beispiel**  
 Erläuterungen wie im Bild 8.2.-11.

Die beiden Achsen sind im gleichen Maßstab in  $\text{N/mm}^2$  oder  $\text{N/cm}^2$  zu skalieren. Alsdann sind die aus den Dehnungsmessungen nach den Gleichungen der Abschnitt 8.2.1 oder 8.2.2 errechneten Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  vorzeichengerecht auf der  $\sigma$ -Achse aufzutragen. Um den Mittelpunkt M schlage man einen Kreis; M liegt auf der  $\sigma$ -Achse beim Punkt  $1/2 (\sigma_1 + \sigma_2)$ , sein Radius ist  $1/2 (\sigma_1 - \sigma_2)$ . Der Kreis schneidet die Punkte  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$ .

Im Mohr'schen Kreis erscheinen alle Winkel mit ihrem doppelten Betrag. Der von der Hauptrichtung 1 und der  $x$ -Achse eingeschlossenen Winkel  $\varphi$  (siehe Bild 8.2-11b) ist deshalb mit dem Betrag  $2\varphi$  von der  $\sigma$ -Achse ausgehend im mathematisch positiven Sinn (linksdrehend) anzutragen; seinen ersten Schenkel bildet die  $\sigma$ -Achse, sein zweiter Schenkel schneidet den Kreis im Punkt A. Der zweite Schenkel des Winkels  $2\varphi + 2 \cdot 90^\circ$  (gestrichelt gezeichnet) entspricht der  $\sigma_y$ -Richtung; er schneidet den Kreis im Punkt B. Man projiziere die Punkte A und B auf die  $\sigma$ -Achse und lese dort die Werte für  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  ab. Die Punkte A und B auf die  $\tau$ -Achse projiziert ergeben die Werte der Schubspannungen  $\tau_{xy}$  und  $\tau_{yx}$ .

Im Bild 8.2-11b sind die ineinandergezeichneten Flächenelemente nach den Hauptrichtungen 1 und 2 bzw. nach den Objektkoordinaten  $x$  und  $y$  ausgerichtet.

Eine alternative Methode ist die Polkonstruktion des Mohr'schen Kreises. Sie ist im Bild 8.2-11c dargestellt.

Die Polkonstruktion ist eine alternative Methode zur Ermittlung der Spannungen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yx}$ . Der Polkonstruktion Bild 8.2-11c ist ebenfalls die Objektsituation des Bildes 8.2-11b zugrundegelegt.

Der Mohr'sche Kreis ist wie vorstehend im orthogonalen  $\sigma$ - $\tau$ -Koordinatensystem aus den errechneten Hauptspannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  zu zeichnen, Bild 8.2-11c. Das weitere Vorgehen unterscheidet sich von der zuvor beschriebenen Methode.

Man betrachte die Richtungen der  $\sigma$ - $\tau$ -Koordinaten als übereinstimmend mit dem Bezugs-Koordinatensystem des Bauteils, im Beispiel der  $\tau$ -Achse des Diagramms parallel zur  $x$ -Achse des Bauteils und die  $\sigma$ -Achse parallel zur  $y$ -Achse des Bauteils. Alsdann übertrage man die  $\sigma_1$ -Richtung als gerade Linie auf den Kreis so, dass sie den Punkt  $\sigma_1$  und den Kreis schneidet. In gleicher Weise übertrage man die  $\sigma_2$ -Richtung so, dass sie den Punkt  $\sigma_2$  und den Kreis schneidet. Der Schnittpunkt der beiden Geraden auf dem Kreis muss auf dem gemeinsamen Punkt P liegen, dem Pol des Mohr'schen Kreises. Durch Projektion des Pols auf die  $\sigma$ - und  $\tau$ -Achsen erhält man  $\sigma_x$  und  $\tau_{xy}$ . Dann ziehe man eine Gerade vom Pol P durch den Mittelpunkt M, die den Kreis auf der gegenüberliegenden Seite schneidet; dort erhält man Punkt P'. Durch Projektionen von P' auf die  $\sigma$ - und  $\tau$ -Achsen erhält man  $\sigma_y$  und  $\tau_{yx}$ .

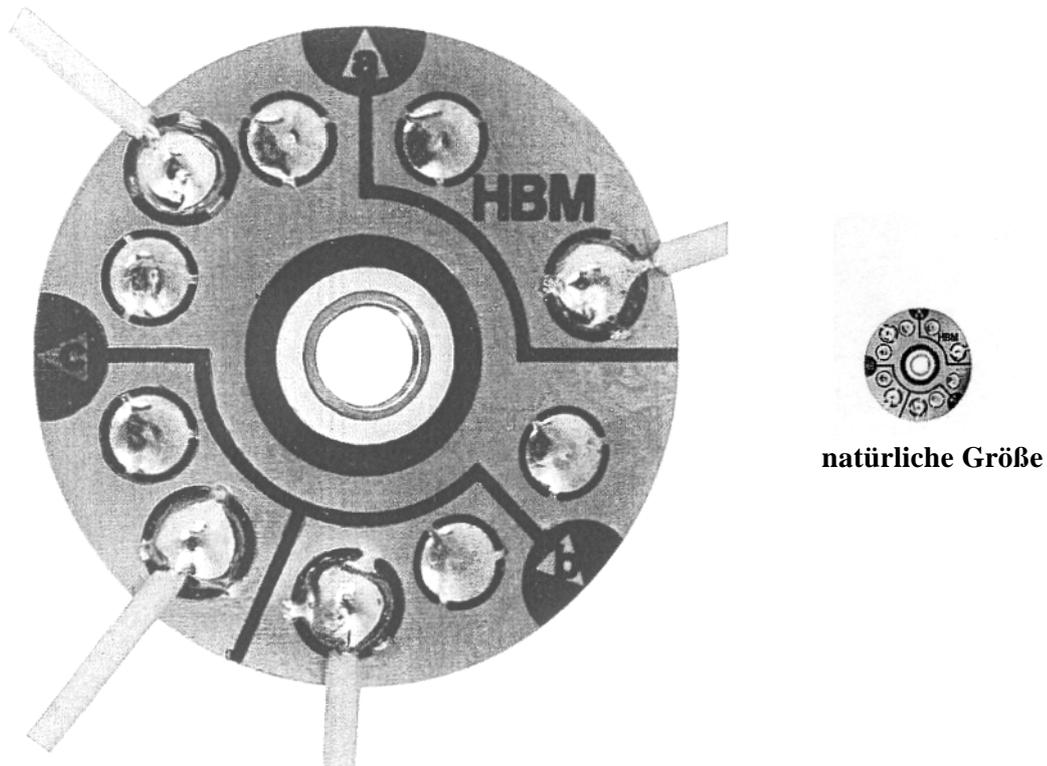
Im Bild 8.2-11 sind  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  beide positiv. In dem Beispiel Bild 8.2.-12 ist  $\sigma_1$  positiv und  $\sigma_2$  negativ.

### 8.3 Ermittlung von Eigenspannungen nach dem Bohrlochverfahren

Eigenspannungen in der Oberfläche von Bauteilen lassen sich mit DMS nur dann ermitteln, wenn der bestehende Spannungszustand durch einen mechanischen Eingriff gestört wird. Dem Wunsch, diesen Eingriff so klein wie möglich zu halten, kommt das Bohrlochverfahren sehr entgegen. Die im Abschn. 3.2.2.3, Bild 3.2-14 gezeigte Bohrlochrosette erfordert eine kleine Bohrung, deren Durchmesser und Bohrtiefe nur 1,5 mm betragen. Damit kann das Verfahren als nahezu zerstörungsfrei angesehen werden.

Beim Anbringen der Bohrung ist folgendes zu beachten: Ankörnen ist unzulässig, weil dadurch der Eigenspannungszustand im Bereich der Rosette verfälscht würde. Deshalb ist die im Bild 8.3-1 dargestellte Bohrlochrosette RY 61 mit einer Bohrbuchse ausgestattet, die, zusammen mit einer Hilfsvorrichtung, die zentrische Führung des Bohrers sichert. Der Bohrer muss einwandfrei scharf sein, andernfalls entstehen zusätzliche Eigenspannungen, die das Messergebnis verfälschen.

Die Bohrung verursacht eine Unterbrechung des Kräfteflusses in der Bauteiloberfläche, was eine Rückfederung des die Bohrung umgebenden Werkstoffs



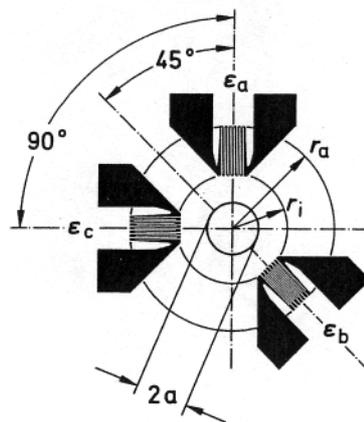
**Bild 8.3-1: Bohrlochrosette RY 61**

verursacht. Aus dieser mit DMS messbaren Rückfederung lässt sich der zuvor vorhanden gewesene Spannungszustand berechnen. Auszugehen ist dabei von einem zweiachsigen ebenen Spannungszustand mit unbekanntem Haupttrichtungen, weshalb die Rückfederung in drei verschiedenen Richtungen zu messen ist. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens ist in den Artikeln [3-6] und [3-7] gegeben. Dort sind auch die Herleitungen der Formeln zur Auswertung der Messungen zu finden. Die nachstehenden Gleichungen setzen die Dehnungsmessungen in den Richtungen  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  voraus; sie sind [3-7] bzw. [8-3] entnommen.

Vor dem Bohren messe man an den Messgittern a, b, c die Bezugswerte  $\varepsilon_v$ . Nach dem Bohren messe man die veränderten Werte  $\varepsilon_N$ . Die Differenz ist die gesuchte Rückfederungs-Dehnung  $\Delta\varepsilon$ :

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_N - \varepsilon_v \quad (8.3-1)$$

Zur Unterscheidung indiziere man die Messwerte mit der jeweiligen Messgitterbezeichnung, also  $\Delta\varepsilon_a$ ,  $\Delta\varepsilon_b$  und  $\Delta\varepsilon_c$ . Die Messgitterbezeichnungen sind bei HBM-Rosetten jeweils an den Messgitteranschlüssen zu finden, siehe Bild 8.3-1 und 8.3-2.



**Bild 8.3-2: Bemaßung der Bohrlochrosette RY 61**

Aus den drei Messwerten  $\Delta\varepsilon_a$ ,  $\Delta\varepsilon_b$  und  $\Delta\varepsilon_c$  lässt sich der zweiachsige Spannungszustand, der vor dem Anbohren der Oberfläche in dem Messobjekt herrschte, eindeutig bestimmen. Der Spannungszustand ist eindeutig bestimmt, wenn die Hauptnormalspannung  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  sowie deren Richtungen bekannt sind.

$$\sigma_{1,2} = - \frac{E}{4A} (\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c) \pm \frac{E}{4B} \sqrt{(\Delta\varepsilon_c - \Delta\varepsilon_a)^2 + (\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c - 2\Delta\varepsilon_b)^2} \quad (8.3-2)$$

$E$  = Elastizitätsmodul des Messobjekt-Werkstoffs.

$A$  und  $B$  sind Konstanten, die sich wie folgt bestimmen lassen:

$$A = \frac{a^2 (1 + \nu)}{2 r_a \cdot r_i}; \quad (8.3-3)$$

$$B = \frac{2 a^2}{r_a \cdot r_i} \cdot \left[ 1 - \frac{a^2 (1 + \nu) (r_a^2 + r_a \cdot r_i + r_i^2)}{4 r_a^2 \cdot r_i^2} \right] \quad (8.3-4)$$

$\nu$  = Querszahl des Messobjekt-Werkstoffs

$r_a$  = äußerer Messgitter-Radius

$r_i$  = innerer Messgitter-Radius      siehe Bild 8.3-2.

$\alpha$  = Bohrlochradius

$$\tan 2\varphi = \frac{\Delta \varepsilon_a + \Delta \varepsilon_c - 2 \Delta \varepsilon_b}{\Delta \varepsilon_c - \Delta \varepsilon_a} \quad \text{und} \quad \varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{\Delta \varepsilon_a + \Delta \varepsilon_c - 2 \Delta \varepsilon_b}{\Delta \varepsilon_c - \Delta \varepsilon_a}$$

Die folgenden Ausführungen gelten mit ihren Zahlenwerten für die Bohrlochrosette RY 61:

$$r_a = 3,3 \text{ mm,}$$

$$r_i = 1,8 \text{ mm,}$$

$$a = 0,75 \text{ mm.}$$

Mit diesen Werten ergeben sich

$$A = 0,04735 (1 + \nu),$$

$$B = 0,1894 - 0,01515 (1 + \nu).$$

Die Auswertung wird vereinfacht, wenn man Gl. (8.3-2) in die Form schreibt

$$\sigma_{1,2} = -A^* (\Delta \varepsilon_a + \Delta \varepsilon_c) \pm B^* \sqrt{(\Delta \varepsilon_a + \Delta \varepsilon_c - 2 \Delta \varepsilon_b)^2 + (\Delta \varepsilon_c - \Delta \varepsilon_a)^2} \quad (8.3-5)$$

Darin ist

$$A^* = \frac{E}{4A} = \frac{E}{0,1894 (1 + \nu)}; \quad (8.3-6)$$

$$B^* = \frac{E}{4B} = \frac{E}{0,7576 - 0,0606 (1 + \nu)}. \quad (8.3-7)$$

Anmerkung:

Für Stahl mit  $E = 206000 \text{ N/mm}^2$  und  $\nu = 0,28$  wird

$$A^* = 849720 \text{ N/mm}^2$$

$$B^* = 302930 \text{ N/mm}^2$$

Für Aluminiumlegierungen mit  $E = 70600 \text{ N/mm}^2$  und  $\nu = 0,33$  wird

$$A^* = 280270 \text{ N/mm}^2$$

$$B^* = 104280 \text{ N/mm}^2$$

## 8.4 Dehnungsmessungen und Spannungsanalysen für unterschiedliche Lastfälle

Die elementaren Lastfälle „Normal“ (Zug-, Druckbeanspruchung), „Biegung“ und „Torsion“ treten nur selten (wenn überhaupt) in reiner Form auf. Meistens überlagern sich die Lastfälle mehr oder weniger, gewollt oder ungewollt. In den folgenden Unterabschnitten werden die Möglichkeiten zur Bestimmung reiner oder kombinierter Beanspruchungen besprochen. Die Anordnung der DMS am Objekt und innerhalb der Wheatstone'schen Brückenschaltung spielt dabei eine wesentliche Rolle.

Auf die Beachtung der Vorzeichen der gemessenen Dehnungen sei noch einmal besonders hingewiesen.

Erläuterung der im Abschnitt 8.4 benutzten Formelzeichen, soweit sie im Text nicht erklärt sind, und Hinweise auf Abschnitte mit zusätzlichen

DMS 1 ... DMS 4 = selbstkompensierende DMS (3.3.4.1) zur Kompensation der Wärmedehnung (7.1)

$E$  = Elastizitätsmodul(2.3.1)

$F$  = Kraft

$G$  = Gleit- oder Schubmodul (2.3.2)

$R_1 \dots R_4$  = Position der Widerstände innerhalb der Brückenschaltung (5)

$R_E$  = Ergänzungswiderstände zur Komplettierung der Brückenschaltung (5.2)

WB = Wheatstone'sche Brückenschaltung und ihre Modifikationen (5.2)

$\varepsilon_a$  = angezeigter Dehnungswert

$\varepsilon_b$  = Biegedehnung

$\varepsilon_n$  = Normaldehnung (Zug- oder Druck)

- $\nu$  = Querdehnungszahl (2.3.3)
- $\sigma$  = Werkstoffspannung (2.2.1)
- $\sigma_b$  = Biegespannung
- $\sigma_l$  = Spannung in Längsrichtung des Messobjekts
- $\sigma_n$  = Normalspannung (2.2.1)
- $\sigma_o$  = Spannung an der Oberseite des Messobjekts
- $\sigma_u$  = Spannung an der Unterseite des Messobjekts
- $\omega$  = Kreisfrequenz, Winkelfrequenz

#### 8.4.1 Messung an einem Zug-/Druck-Stab

Beim Zugstab entsteht in der Kraftwirkungsrichtung (Längsrichtung) die positive Längsdehnung  $\varepsilon_l$ , in der Querrichtung die negative Querdehnung (Querkontraktion)  $\varepsilon_q$ . Beim Druckstab ist die Längsdehnung negativ und die Querdehnung ist positiv.

Für die Längsdehnung  $\varepsilon_l$  gilt die Beziehung

$$\varepsilon_l = \frac{F}{A \cdot E} \quad (8.4-1)$$

Bei reiner Normalkraft ist  $\varepsilon_l = \varepsilon_n$ .

Für die Querdehnung  $\varepsilon_q$  gilt

$$\varepsilon_q = -\nu \cdot \varepsilon_l = -\nu \frac{F}{A \cdot E} \quad (8.4-2)$$

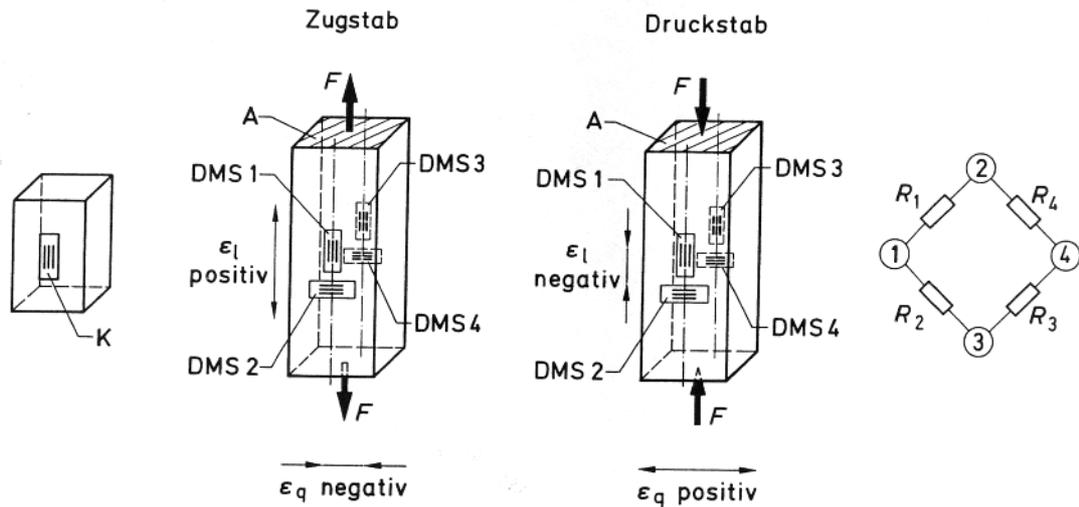
Die Normalspannung  $\sigma_n$  ergibt sich aus den Beziehungen

$$\sigma_n = \frac{F}{A} \quad (8.4-3)$$

beziehungsweise

$$\sigma_n = \varepsilon_n \cdot E. \quad (8.4-4)$$

Im Bild 8.4-1 ist die zweckmäßige Anordnung der DMS am Zug-/Druckstab und in der Brückenschaltung dargestellt. Je nach den Gegebenheiten müssen nicht alle 4 Brückenarme mit DMS besetzt sein. Die Eigenarten, Vor- und Nachteile der verschiedenen Schaltungsarten sind in der Tafel 8.4.-1 verzeichnet.



K = Kompensations-DMS an einem mechanisch unbelasteten Teil (s. Abschnitt 7.1-3)

Bild 8.4-1: Anordnung der DMS am Zug-/Druckstab und in der Brückenschaltung

Brückenarme	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	Ergebnis	Bemerk.
Brückengleichung	$\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 = \epsilon_a$					1
einfache Viertelbrücke	DMS1	$R_E$	$R_E$	$R_E$	$\epsilon_a = \epsilon_1$	2
Viertelbrücke mit Kompensat.-DMS	DMS1	K	$R_E$	$R_E$	$\epsilon_a = \epsilon_1$	3
Halbbrücke	DMS1	DMS2	$R_E$	$R_E$	$\epsilon_a = \epsilon_1 + \epsilon_q = (1 + \nu) \cdot \epsilon_1$	4
Zweiviertelbrücke	DMS1	$R_E$	DMS3	$R_E$	$\epsilon_a = 2 \cdot \epsilon_1$	5
Zweiviertelbrücke mit 2 Komp.-DMS	DMS1	K	DMS3	K	$\epsilon_a = 2 \cdot \epsilon_1$	6
Vollbrücke	DMS1	DMS2	DMS3	DMS4	$\epsilon_a = 2 (\epsilon_1 + \epsilon_q) = 2 (1 + \nu) \epsilon_1$	7

Tafel 8.4-1: Am Zug-/Druckstab anwendbare Schaltungen und deren Ergebnisse. Erläuterungen in der Symbole siehe Bild 8.4-1.

#### Bemerkungen zur Tafel 8.4-1:

1. Man beachte den Vorzeichenwechsel in der Gleichung und die Vorzeichen der Dehnungen!

In den Brückenarmen  $R_2$  und  $R_4$  gehen Dehnungen mit entgegengesetztem Vorzeichen in das Ergebnis  $\epsilon_a$  ein.

2. Überlagerte Biegedehnungen gehen in das Ergebnis ein. Wärmedehnungen müssen mit selbstkompensierenden DMS ausgeschieden werden, sie gehen sonst als Fehler in der Messergebnis ein.

$$\sigma_l = \sigma_n + \sigma_b = \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-5)$$

3. Die Kompensation der Wärmedehnung durch den Kompensations-DMS wird auch dann erreicht, wenn der Wärmedehnungskoeffizient des Bauteilwerkstoffs vom Standardwert des selbstkompensierenden DMS abweicht oder wenn der Kompensationsbereich des DMS überschritten wird. Sonst wie Bemerkung 2.
4. Überlagerte Biegedehnung gehen in das Ergebnis ein, Wärmedehnungen werden sehr gut kompensiert.

$$\sigma_l = \sigma_n + \sigma_b = \frac{\varepsilon_a \cdot E}{1 + \nu}. \quad (8.4-6)$$

5. Bei spiegelsymmetrischen Stabquerschnitten werden überlagerte Biegedehnungen kompensiert.

Wärmedehnungen müssen mit selbstkompensierenden DMS ausgeschieden werden, sie gehen sonst als Fehler in das Messergebnis ein.

$$\sigma_n = \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-7)$$

6. Bezüglich Kompensation der Wärmedehnung siehe Bemerkung 3. Übriges wie Bemerkung 5.
7. Bei spiegelsymmetrischen Stabquerschnitt werden überlagerte Biegedehnungen kompensiert. Wärmedehnungen werden sehr gut kompensiert. Störeinflüsse durch brückeninterne Verbindungen werden weitestgehend unterdrückt. Gute Eignung zur Messung der Normalkraft.

$$\sigma_n = \frac{\varepsilon_a \cdot E}{2(1 + \nu)}; \quad (8.4-8)$$

$$F = \frac{\varepsilon_a \cdot E}{2(1 + \nu)} \cdot A. \quad (8.4-9)$$

#### Anmerkung:

Die DMS müssen in die Richtungen der Hauptachsen gerichtet sein, um Fehler zu vermeiden (siehe auch Abschn. 8.1). Ein Richtungsfehler von  $5^\circ$  (der schon extrem groß ist) ergibt im einachsigen Spannungsfeld in der 1. Hauptrichtung einen Fehler von -1 %, in der 2. Hauptrichtung (quer) einen Fehler von -3,3 %, beides gerechnet für  $\nu = 0,3$ . Eine um  $5^\circ$  verdrehte X-Rosette ergäbe bei Halb- oder Vollbrückenschaltung einen Gesamtfehler von -1,54 %.

Außer der Normalbeanspruchung können verschiedene Störgrößen auf den Zugstab einwirken, wie Biegung, Torsion und Wärme. Je nach dem Ziel der Messung kann es wünschenswert sein, die überlagerten Biegedehnungen zu eliminieren (z. B. bei Kraftmessungen) oder mit zu erfassen (z. B. zur Ermittlung der Spannungsmaxima). Die verschiedenen Schaltungsarten der Wheatstone'schen-Brücke bieten dazu Möglichkeiten, allerdings nur bei spiegelsymmetrischem Querschnitt des Stabes. Messungen an asymmetrischen Querschnitten siehe Abschn. 8.4.3.

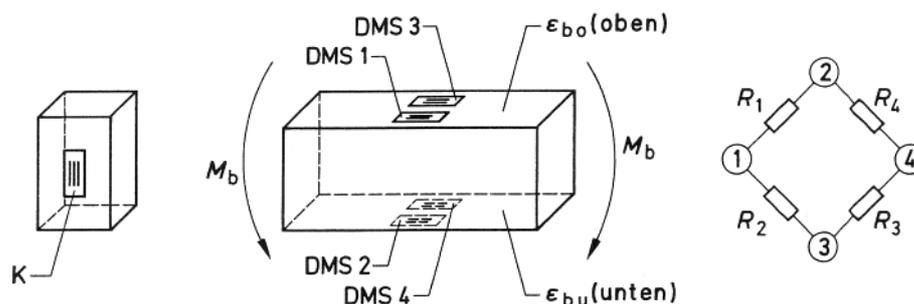
Der Einfluss der Torsion als Störgröße kann durch Anordnung der DMS dicht bei und symmetrisch zur Mittelachse weitgehend unterdrückt werden. Die Bestimmung der durch Überlagerung entstehenden Maximalbeanspruchung kann nur mit der Methode zur Bestimmung des zweiachsigen Spannungszustandes mit unbekanntem Haupttrichtungen erfolgen (s. Abschn. 8.2.2 und 8.4.5).

### 8.4.2 Messung an einem Biegestab

Biegung erzeugt auf einer Seite des gebogenen Stabes eine positive Dehnung, auf der gegenüberliegenden Seite eine negative Dehnung. Bei spiegelsymmetrischen Querschnitten haben die positive und die negative Dehnung den gleichen Betrag. Dadurch ist es möglich, die von der Wheatstone-Brücke gebotenen Möglichkeiten zur Addition von Dehnungssignalen oder zur Kompensation von Störgrößen zu nutzen.

Als Störgrößen können Normalbeanspruchung, Torsion und Wärmedehnung auftreten.

Das Bild 8.4-2 zeigt die zweckmäßige Anordnung der DMS am Biegestab. Wie beim Zugstab (Abschn. 8.4.1) müssen auch hierbei nicht alle 4 Brückenarme mit DMS belegt sein. Die Eigenarten der verschiedenen Schaltungsarten sind in der Tafel 8.4-2 verzeichnet.



**K = Kompensations-DMS an einem mechanisch unbelasteten Teil (s. Abschn. 7.1-3)**

**Bild 8.4-2: Anordnung der DMS am Biegestab und in der Brückenschaltung**

Die DMS müssen mit ihren Achsen in die Hauptspannungsrichtungen weisen. Sind die Haupttrichtungen unbekannt (z. B. bei überlagerter Torsion) und es sollen die Hauptspannungen ermittelt werden, dann verfähre man gemäß Abschnitt 8.2.2 oder 8.4.5.

Brückenarme	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	Ergebnis	Bemerk.
Brückengleichung	$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \varepsilon_a$					1
einfache Viertelbrücke	DMS1	$R_E$	$R_E$	$R_E$	$\varepsilon_a = \varepsilon_{bo}$	2
	DMS2	$R_E$	$R_E$	$R_E$	$\varepsilon_a = \varepsilon_{bu}$	
Viertelbrücke mit Kompensat.-DMS	DMS1	K	$R_E$	$R_E$	$\varepsilon_a = \varepsilon_{bo}$	3
	DMS2	K	$R_E$	$R_E$	$\varepsilon_a = \varepsilon_{bu}$	
Halbbrücke	DMS1	DMS2	$R_E$	$R_E$	$\varepsilon_a = 2 \varepsilon_b$	4
Zweiviertelbrücke	DMS1	$R_E$	DMS3	$R_E$	$\varepsilon_a = 2 \varepsilon_{bo}$	5
	DMS2	$R_E$	DMS4	$R_E$	$\varepsilon_a = 2 \varepsilon_{bu}$	
Zweiviertelbrücke mit 2 Komp.-DMS	DMS1	K	DMS3	K	$\varepsilon_a = 2 \varepsilon_{bo}$	6
	DMS2	K	DMS4	K	$\varepsilon_a = 2 \varepsilon_{bu}$	
Vollbrücke	DMS1	DMS2	DMS3	DMS4	$\varepsilon_a = 4 \varepsilon_b$	7

**Tafel 8.4-2: Am Biegestab mit spiegelsymmetrischem Querschnitt anwendbare Schaltungen und deren Ergebnisse.  
Erläuterung der Symbole siehe Bild 8.4-2.**

#### Bemerkungen zur Tafel 8.4-2:

- Man beachte den Vorzeichenwechsel in der Gleichung und die Vorzeichen der Dehnung:  
In den Brückenarmen  $R_2$  und  $R_4$  gehen die Dehnungen mit entgegengesetztem Vorzeichen in das Ergebnis  $\varepsilon_a$  ein.
- Überlagerte Normaldehnungen gehen in das Ergebnis ein.  
Wärmedehnungen müssen mit selbstkompensierenden DMS ausgeschieden werden, andernfalls gehen sie in das Messergebnis ein.

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_n = \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-10)$$

3. Die Kompensation der Wärmedehnung durch den Kompensations-DMS wird auch dann erreicht, wenn der Wärmedehnungskoeffizient des Bauteilwerkstoffs vom Standardwert des selbstkompensierenden DMS abweicht oder wenn der Kompensationsbereich des DMS überschritten wird. Sonst wie Bemerkung 2.
4. Überlagerte Normaldehnungen werden kompensiert. Wärmedehnungen werden sehr gut kompensiert.

$$\sigma_b = \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-11)$$

Das wirkende Biegemoment  $M_b$  lässt sich berechnen nach der Gleichung

$$M_b = \sigma_b \cdot W_b. \quad (8.4-12)$$

Der Zahlenwert des vom gebogenen Querschnitt abhängigen Biege-Widerstandsmoments  $W_b$  ist Tabellenbüchern zu entnehmen. Für einige häufig vorkommende Querschnittsformen sind die Formeln zur Berechnung von  $W_b$  in der Tafel 8.4-3 verzeichnet.

5. Überlagerte Normaldehnungen gehen in das Ergebnis ein. Wärmedehnungen müssen mit selbstkompensierenden DMS ausgeschieden werden, andernfalls gehen sie als Fehler in das Messergebnis ein.

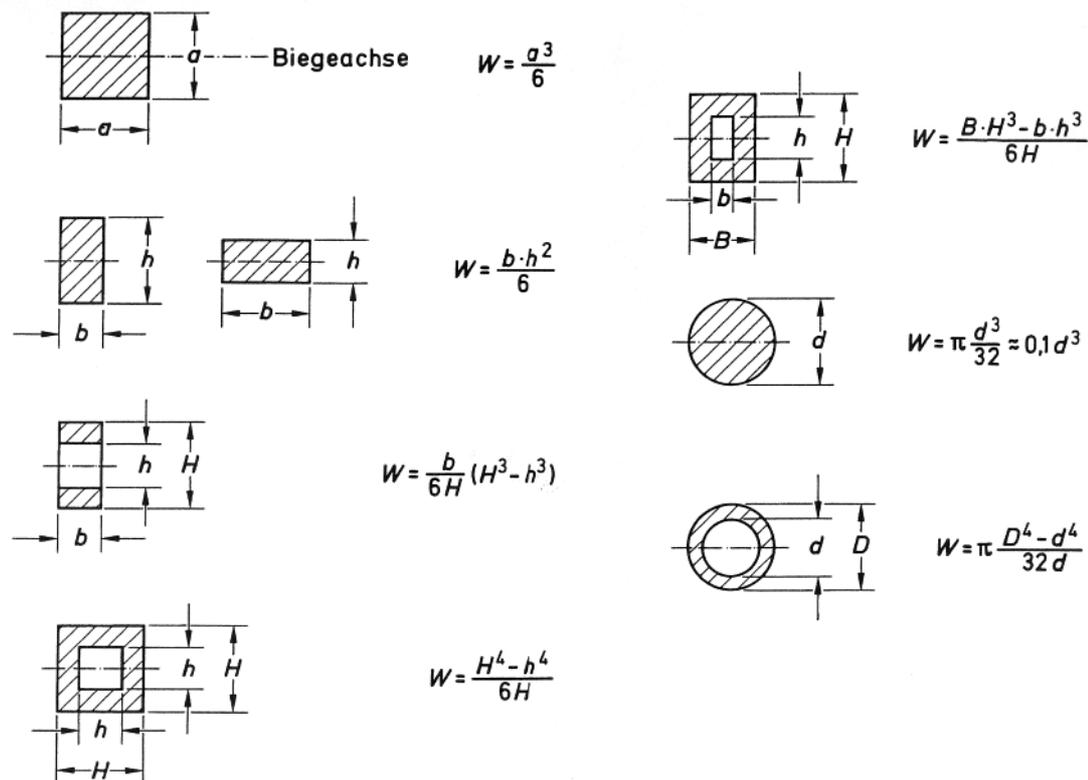
$$\sigma = \sigma_b + \sigma_n = \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-13)$$

6. Die Kompensation der Wärmedehnung durch den Kompensations-DMS wird auch dann erreicht, wenn ein passender selbstkompensierender DMS nicht verfügbar ist oder dessen Kompensationsbereich nicht ausreicht. Sonst wie Bemerkung 5.
7. Bei spiegelsymmetrischem Querschnitt werden Normaldehnungen kompensiert. Wärmedehnungen werden sehr gut kompensiert. Störeinflüsse durch brückeninterne Verbindungen werden weitestgehend unterdrückt. Gute Eignung zur Messung von Biegemomenten und Biegekräften (bei bekannter Hebellänge).

$$\sigma_b = \frac{1}{4} \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-14)$$

Das wirkende Biegemoment  $M_b$  lässt sich berechnen nach der Gleichung (8.4-12).

Zur Berechnung von  $W_b$  siehe Bemerkung 4 und Tafel 8.4-3.

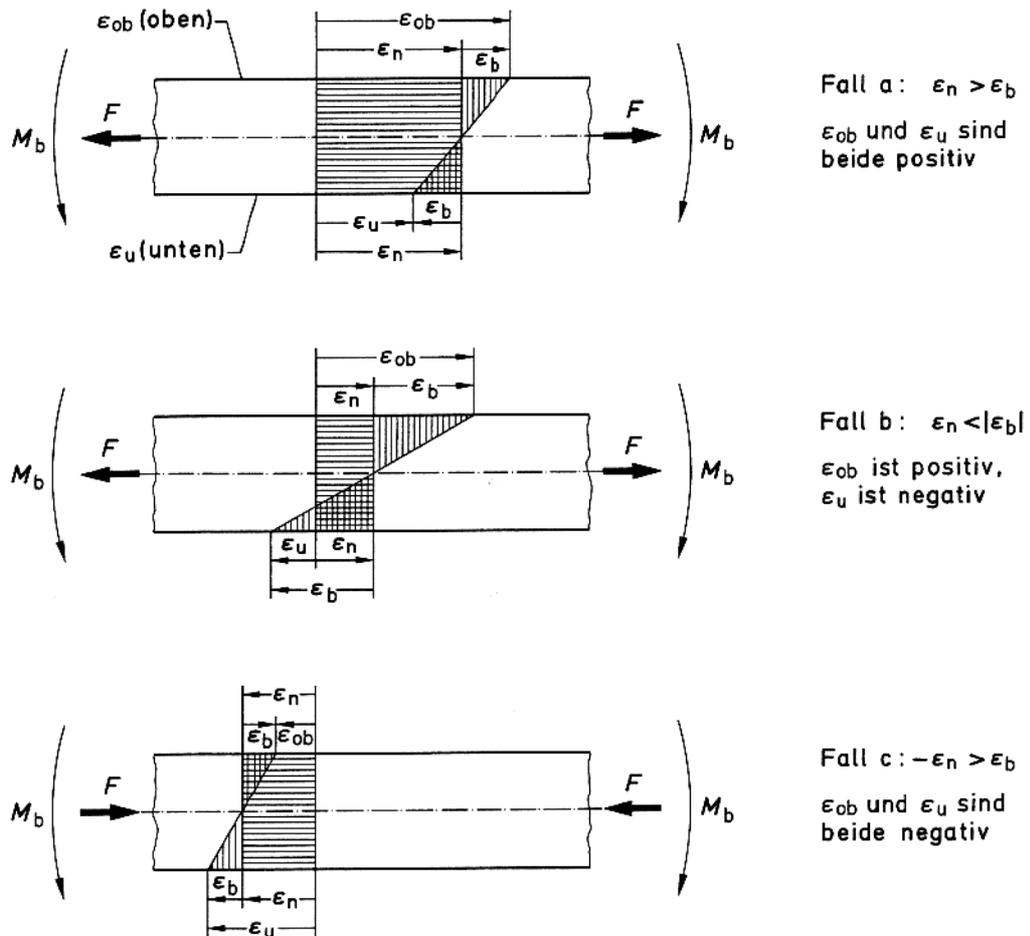


Tafel 8.4-3: Äquatoriale- (Biege-) Widerstandsmomente für einige häufig vorkommende Querschnittsformen.

### 8.4.3 Messungen an einem mit Normalkraft und Biegemoment beanspruchten Stab mit symmetrischem und asymmetrischem Querschnitt

In den Abschnitten 8.4.1 und 8.4.2 sind bereits die Möglichkeiten beschrieben, wie man die Normaldehnungen und die Biegedehnungen jeweils separat ermitteln kann und mit welcher Schaltung die Summen der Normal- und Biegedehnungen bei symmetrischen Querschnitten zu finden sind. Bei asymmetrischen Querschnitten haben die Biegedehnungen auf gegenüberliegenden Seiten verschiedene Beträge. Sie können deshalb nur durch getrennte Messungen bestimmt werden. Bei gleichzeitiger Überlagerung von Normaldehnungen und Biegedehnungen lassen sich Biege- und Normalanteile der Dehnungen durch schaltungstechnische Kniffe nicht mehr trennen. Hier sind nur noch rechnerische oder grafische Lösungen möglich. Beide Lösungswege werden an zwei Beispielen erläutert.

Biegedehnungen haben auf gegenüberliegenden Seiten immer entgegengesetzte Vorzeichen. Trotzdem kann es vorkommen, dass die gemessenen Dehnungen gleiches Vorzeichen besitzen. Das tritt ein, wenn die überlagerte Normaldehnung größer ist als die Biegedehnung (s. Bild 8.4-3).



**Bild 8.4-3: Beispiel für die Dehnungsverteilung in einem Objekt bei gemischter Normal- und Biegebeanspruchung.**

Den beiden nachstehend besprochenen Beispielen liegen Messungen an einem Modell zugrunde. Die Querschnittsflächen  $A$  der beiden Stäbe sind gleich groß, ihre Querschnittsformen sind im Beispiel 1 quadratisch, im Beispiel 2 T-förmig. Die Normallasten und die Biegemomente sind ebenfalls gleich groß.

#### Beispiel 1:

Stab mit quadratischem Querschnitt. Das Beispiel gilt für alle spiegelsymmetrischen Querschnittsformen.

Messungen:

Die Dehnungen  $\varepsilon_{ob}$  und  $\varepsilon_u$  sind getrennt zu messen.

Messergebnis:

$$\varepsilon_{ob} = 900 \mu\text{m/m},$$

$$\varepsilon_u = -1140 \mu\text{m/m}.$$

A: Rechnerische Lösung

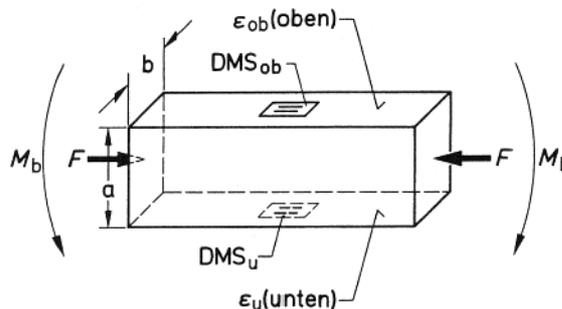
Probekörper aus Al-Cu-Mg 1,  $E = 72100 \text{ N/mm}^2$ .

Aus den beiden gemessenen Dehnungen  $\varepsilon_{ob}$  und  $\varepsilon_u$  errechnen sich die Randspannungen zu

$$\begin{aligned}\sigma_{ob} &= \varepsilon_{ob} \cdot E = 900 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 = 64,9 \text{ N/mm}^2, \\ \sigma_u &= \varepsilon_u \cdot E = -1140 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 = -82,2 \text{ N/mm}^2.\end{aligned}$$

Dehnungskomponenten erhält man:

$$\begin{aligned}\varepsilon_n &= 1/2 (\varepsilon_{ob} + \varepsilon_u) = \\ &= 1/2 (900 - 1140) = -120 \text{ } \mu\text{m/m}, \\ \varepsilon_b &= \pm 1/2 (\varepsilon_{ob} - \varepsilon_u) = \\ &= \pm 1/2 (900 + 1140) = \pm 1020 \text{ } \mu\text{m/m}.\end{aligned}$$



**Bild 8.4-4: Skizze zu Beispiel 1**

B: Graphische Lösung

Die Kontur des Prüflings im Bereich der Dehnungsmessung zeichne man in einem geeigneten Maßstab (vergrößert oder verkleinert) auf ein Blatt Millimeterpapier und daneben eine  $\varepsilon$ -Skala, Bild 8.4-5a.

Die Schwerachse verläuft durch die Schwerpunkte der Querschnittsfläche; sie ist bei spiegelsymmetrischen Querschnitten identisch mit der Mittelachse. Auf der Skala trage man die gemessenen Dehnungswerte  $\varepsilon_{ob}$  und  $\varepsilon_u$  an, projiziere sie auf die entsprechenden Kanten der Objektskizze und verbinde die beiden Punkte durch eine Gerade. Der Schnittpunkt N dieser Geraden mit der  $\varepsilon_0$ -Linie gibt den Abstand d der neutralen Faserschicht zur Unterkante des Prüflings an; er kann aus der Skizze herausgemessen werden, Bild 8.4-5a.

Die schraffierten Felder rechts und links von der  $\varepsilon_0$ -Linie zeigen die Dehnungsverteilung über den Querschnitt des Prüflings, rechts die positiven Dehnungen, links die negativen, Bild 8.4-5b.

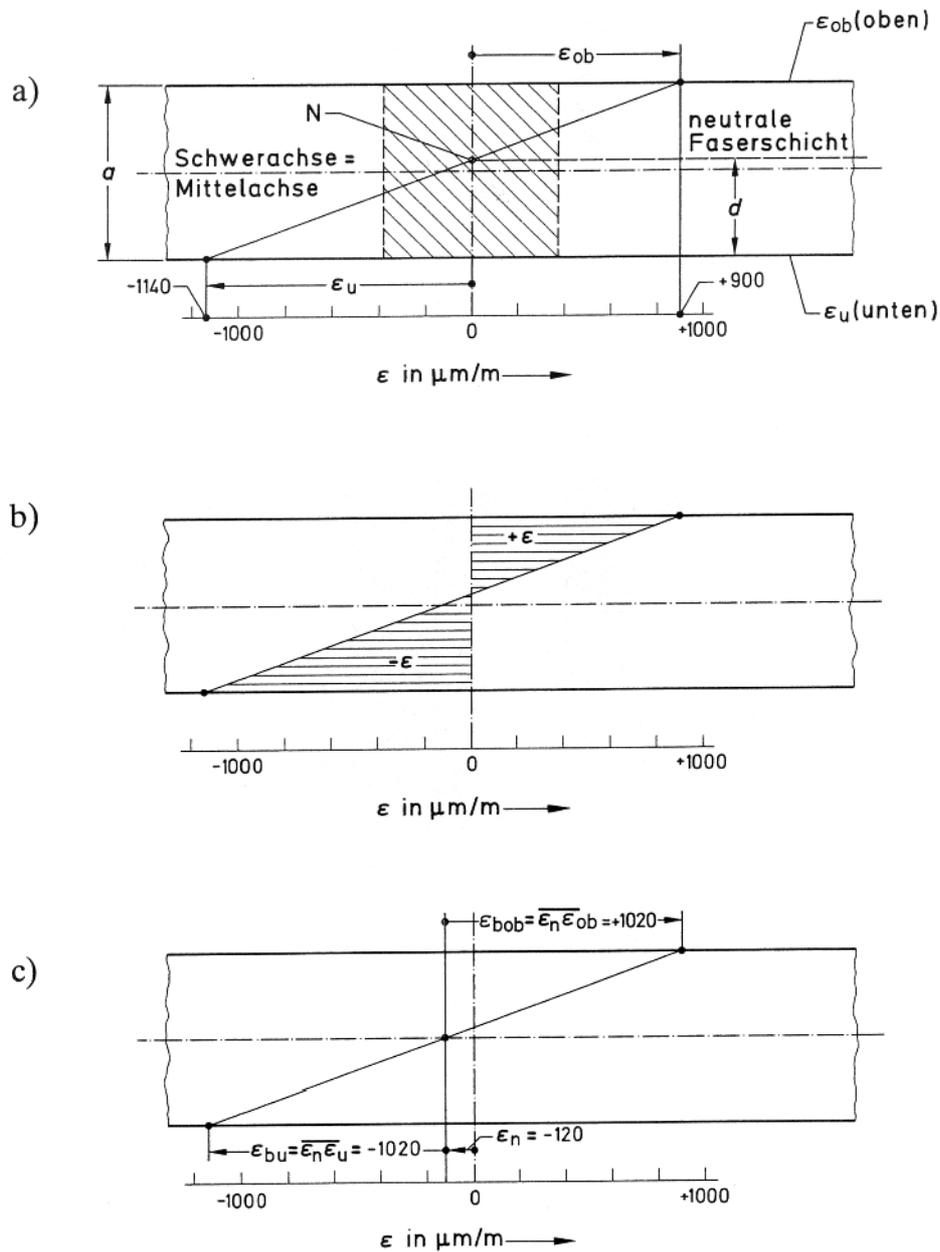
Auf der Schwerachse markiere man den Schnittpunkt mit der Verbindungsgeraden  $\varepsilon_{ob} - \varepsilon_u$  und projiziere diesen Punkt auf die  $\varepsilon$ -Skala. Dort kann man den Betrag der Normaldehnung ablesen, im Beispiel  $-120 \text{ } \mu\text{m/m}$ , Bild 8.4-5c.

Die betragsgleichen Biegedehnungen entsprechen den Strecken

$$\overline{\varepsilon_o \varepsilon_n} = \varepsilon_{bo} = 900 - (-120) = 1020 \mu\text{m/m} \text{ und}$$

$$\overline{\varepsilon_u \varepsilon_n} = \varepsilon_{bu} = -1140 - (-120) = -1020 \mu\text{m/m}.$$

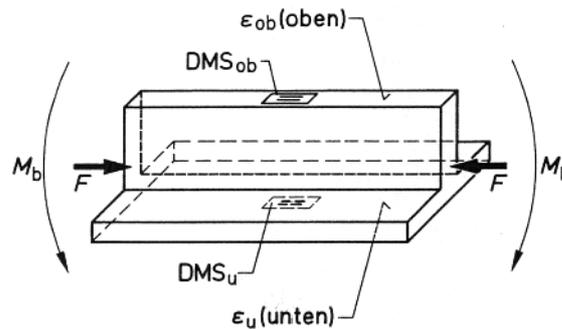
Die Genauigkeit der graphischen Lösung ist an die Zeichengenauigkeit gebunden.



**Bild 8.4-5: Graphische Lösung zum Beispiel 1.  
Erläuterungen im Text.**

2. Beispiel:

Stab mit T-förmigem Querschnitt: (Das zur Lösung dieser Aufgabe angewandte Prinzip ist auch auf andere Querschnittsformen anwendbar.)



**Bild 8.4-6: Skizze zu Beispiel 2.**

Werkstoff des Messobjektes: Al-Cu-Mg 1;  $E = 72100 \text{ N/mm}^2$

Messungen:

Die Dehnungen  $\epsilon_{ob}$  und  $\epsilon_u$  sind getrennt zu messen. Messergebnis:

$$\epsilon_{ob} = + 490 \mu\text{m/m},$$

$$\epsilon_u = - 400 \mu\text{m/m}.$$

A: Rechnerische Lösung

Aus den beiden gemessenen Dehnungen  $\epsilon_o$  und  $\epsilon_u$  errechnen sich die Randspannungen zu

$$\sigma_{ob} = \epsilon_{ob} \cdot E = 490 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 = 35,3 \text{ N/mm}^2,$$

$$\sigma_u = \epsilon_u \cdot E = 400 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 = -28,8 \text{ N/mm}^2.$$

Zur rechnerischen Ermittlung der Dehnungskomponenten benötigt man den Schwerpunktabstand  $e$  (s. Bild 8.4-7). Für Normprofile ist er in Tabellen verzeichnet; für andere Profilformen findet man die Formeln zur Berechnung in Tabellenbüchern. Für das dem Beispiel 2 zugrunde gelegte Profil gilt:

$$e = \frac{1}{2} \cdot \frac{a \cdot H^2 + b \cdot c^2}{a \cdot H + b \cdot c}. \quad (8.4-15)$$

Mit den Maßen des Modells gemäß Bild 8.4-7 ergibt sich das Maß  $e$  zu

$$e = \frac{1}{2} \cdot \frac{2,5 \cdot 15^2 + 12,5 \cdot 2^2}{2,5 \cdot 15 + 12,5 \cdot 2} = 4,9 \text{ mm}.$$

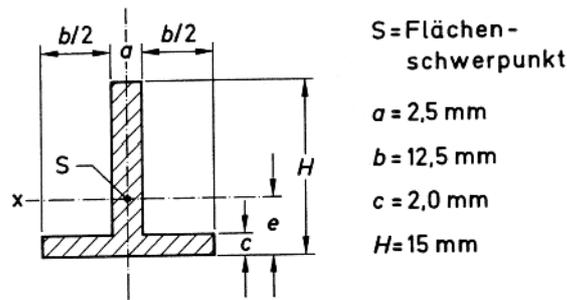


Bild 8.4-7: Maßskizze des T-Querschnitts

Die Normaldehnung  $\varepsilon_n$  errechnet sich nach der Beziehung

$$\varepsilon_n = \varepsilon_u + e \cdot \frac{\varepsilon_{ob} - \varepsilon_u}{H} \quad (8.4-16)$$

Das ergibt für das Beispiel 2:

$$\varepsilon_n = -400 + 4,9 \cdot \frac{490 - (-400)}{15} = 4,9 \cdot \frac{890}{15} - 400 = -109 \mu\text{m/m}.$$

Die Normalkraft  $F_n$  ist

$$F_n = \varepsilon_n \cdot E \cdot A = -109 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 \text{ N/mm}^2 \cdot 64 \text{ mm}^2 = 503 \text{ N} \quad (8.4-17)$$

Die Biegedehnungen haben bei asymmetrischen Querschnitten unterschiedliche Beiträge. Es sind

$$\begin{aligned} \varepsilon_{bu} &= \varepsilon_u - \varepsilon_n = -400 - (-109) = -291 \mu\text{m/m}, \\ \varepsilon_{bob} &= \varepsilon_{ob} - \varepsilon_n = 490 - (-109) = +599 \mu\text{m/m}. \end{aligned}$$

### B: Graphische Lösung

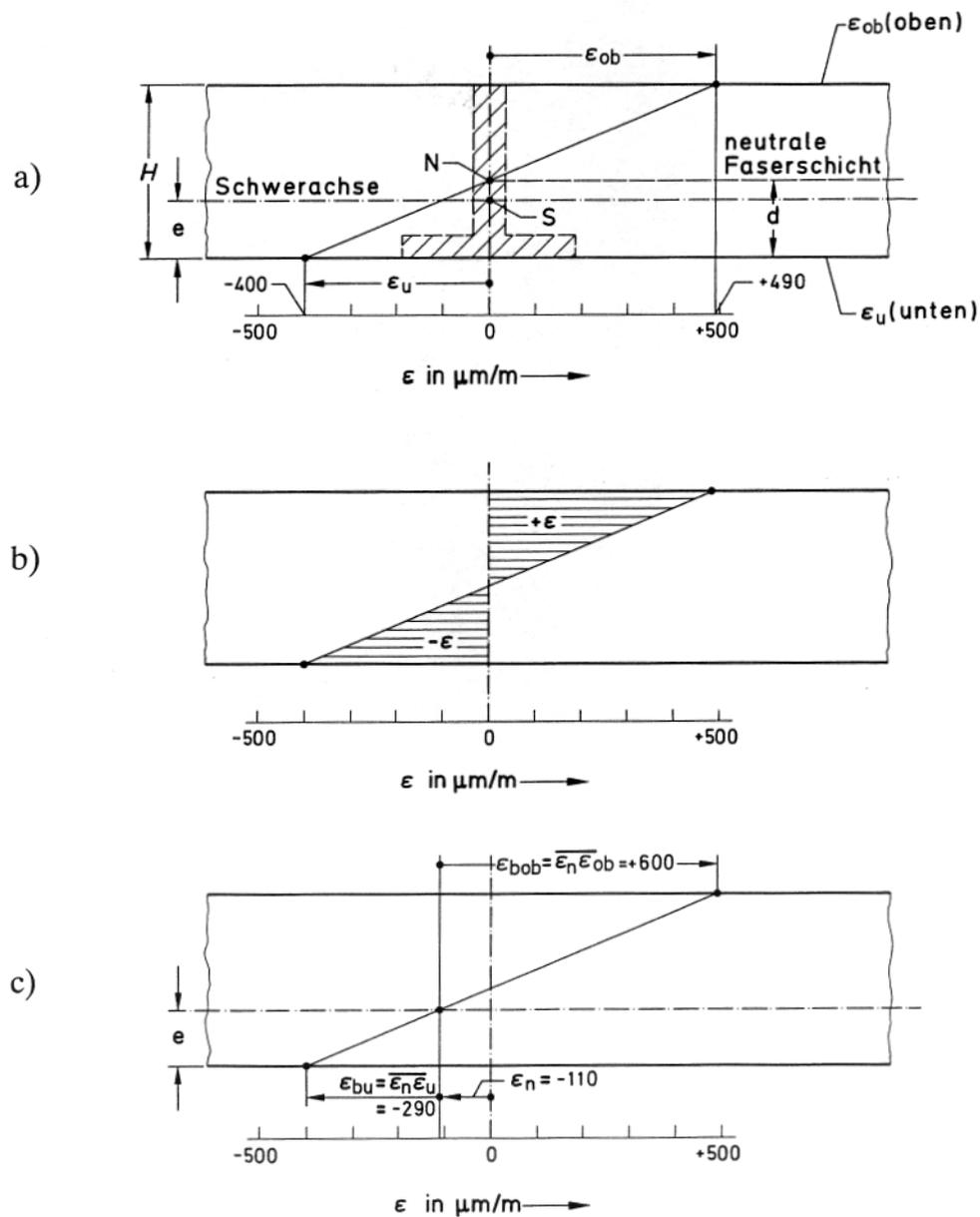
Der Lösungsweg ist analog dem für symmetrische Querschnitte.

Man zeichne die Kontur des Prüflings erst auf ein Blatt Millimeterpapier und daneben eine s-Skala, Bild 8.4-8a.

In die Skizze zeichne man im Abstand  $e$  von der Basis die Schwerachse ein; sie ist die Linie, welche die Schwerpunkte der Querschnittsflächen verbindet. Auf der  $\varepsilon$ -Skala trage man die gemessenen Dehnungswerte  $\varepsilon_{ob}$  und  $\varepsilon_u$  an, projiziere sie auf die entsprechenden Randlinien der Objektskizze und verbinde die beiden Punkte durch eine Gerade. Der Schnittpunkt  $N$  dieser Geraden mit der  $\varepsilon_0$ -Linie gibt den Abstand  $d$  der neutralen Faserschicht zur Unterkante des Prüflings an, er kann aus der Skizze herausgemessen werden, Bild 8.4-8a.

Die schraffierten Felder rechts und links von der  $\epsilon_0$ -Linie zeigen die Dehnungsverteilung über den Querschnitt des Prüflings, rechts die positiven Dehnungen, links die negativen, Bild 8.4-8b.

Auf der Schwerachse markiere man den Schnittpunkt mit der Verbindungsgeraden  $\epsilon_{ob} \rightarrow \epsilon_u$  und projiziere diesen Punkt auf die  $\epsilon$ -Skala, Bild 8.4-8c. Dort kann man den Betrag der Normaldehnung  $\epsilon_n$  ablesen, im Beispiel  $-110 \mu\text{m/m}$ .



**Bild 8.4-8: Graphische Lösung zum Beispiel 2.**  
Erläuterungen im Text.

Die Biegedehnungen entsprechen den Strecken

$$\overline{\varepsilon_{ob}\varepsilon_n} = \varepsilon_{bob} = 600 \mu\text{m/m},$$

$$\overline{\varepsilon_n\varepsilon_u} = \varepsilon_{bu} = -290 \mu\text{m/m}.$$

Auch hier ist die Zeichengenauigkeit maßgeblich für die Genauigkeit des Ergebnisses und hängt von der Wahl des Maßstabes ab.

#### 8.4.4 Messung an einem Torsionsstab (Verdrehstab)

Eine Messung am Torsionsstab kann mehrere Ziele haben:

1. Die Bestimmung der Normal- und der Schubspannungen für Festigkeitsbetrachtungen.
2. Die Ermittlung des wirksamen Torsionsmomentes  $M_t$ , aus dem bei rotierenden Wellen die übertragene Leistung  $P$  berechnet werden kann.
3. Die Ermittlung des Schiebungswinkels  $\gamma$  oder des Verdrehungswinkels  $\varphi$ .

##### Zu 1.

Eine auf Torsion beanspruchte Welle unterliegt einem zweiachsigen Spannungszustand. Die Hauptnormalspannungen verlaufen unter einem Winkel von  $\pm 45^\circ$  zu den Mantellinien (Linien parallel zur Wellenlängsachse). Die von den Normalspannungen erzeugten Dehnungen sind mit DMS zu messen. Dazu sind die im Bild 3.2-9a dargestellten X-Rosetten gut geeignet, insbesondere die V-Form mit den Messgitterachsen unter  $\pm 45^\circ$  zur Symmetrieachse. Die Messgitterachsen müssen mit den Hauptspannungsrichtungen übereinstimmen, Bild 8.4-9.

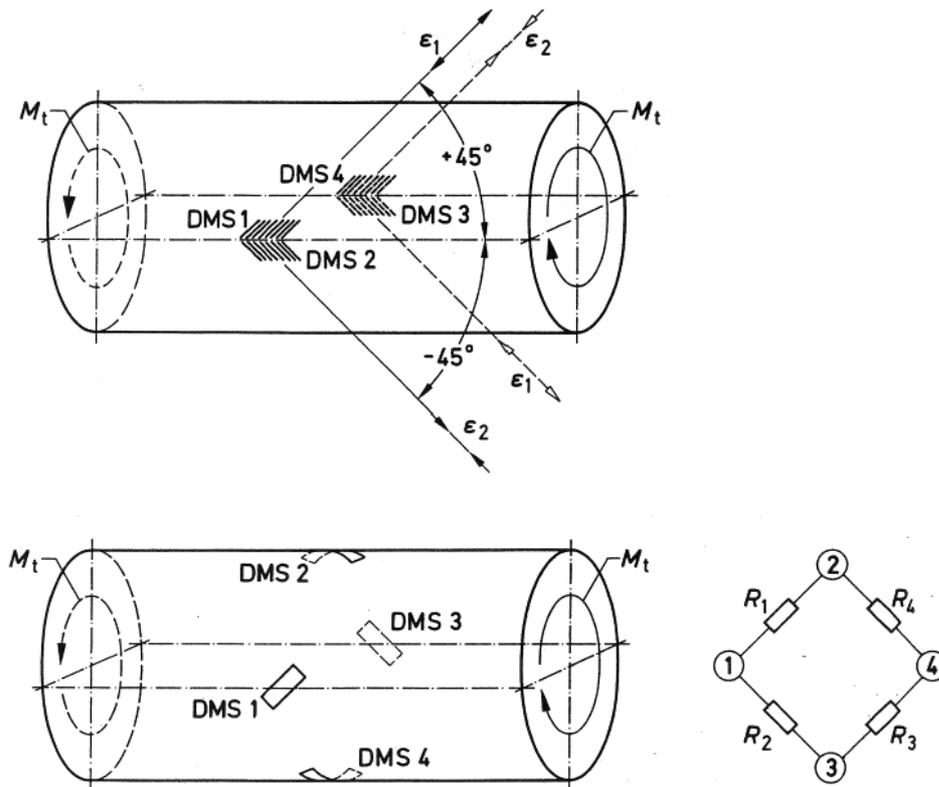
##### Anmerkung:

Ein richtiges Ergebnis setzt eine korrekte Messung voraus. Die Messgitterachsen müssen mit den Hauptspannungsrichtungen übereinstimmen. Abweichungen um den Winkel  $\alpha$  ergeben einen Messfehler  $f$  von

$$f = (\cos 2\alpha - 1) \cdot 100 \% . \quad (8.4-18)$$

Wird ein DMS mit einem Richtungsfehler von  $\alpha = 5^\circ$  geklebt, dann wird der Messwert um 1,6 % zu klein. Werden bei Halb- und Vollbrückenordnungen die übrigen DMS richtig orientiert, dann vermindert sich der Fehler auf -0,8 % bei der Halbbrückenschaltung und auf -0,4 % bei der Vollbrückenschaltung. Man beachte jedoch, dass bei unsymmetrischen Anordnungen der DMS zusätzliche, unter Umständen größere Fehler infolge mangelhafter Kompensation eventuell vorhandener Normal- und Biegedehnungen auftreten können.

Geeignete Schaltungen sind die Halbbrücken- und die Vollbrückenschaltungen. Bei der Übertragung der Messwerte von rotierenden Wellen über Schleifringe muss die Vollbrückenschaltung angewandt werden, weil andernfalls durch veränderliche Übergangswiderstände innerhalb der Brückenschaltung erhebliche Messfehler entstehen können. Bei der Vollbrückenschaltung liegen die Übergangswiderstände in den Speiseleitungen 2 und 3 in Serie mit dem Brückenwiderstand, in den Messleitungen 1 und 4 in Serie mit dem Verstärker-Eingangswiderstand. In beiden Fällen sinkt ihr Einfluss auf ein unerhebliches Maß ab, vorausgesetzt, die Schleifringe und -bürsten sind von guter Qualität (s. Abschn. 8.4.4.1).



**Bild 8.4-9:** Torsionswelle mit in den Hauptdehnungsrichtungen  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  applizierten DMS und deren Anordnung in der Brückenschaltung.

- a) bei Verwendung spezieller X- Rosetten  
b) bei Verwendung einzelner DMS

Die Vollbrückenschaltung kompensiert auch Störsignale aus überlagerten Normal- und Biegebeanspruchungen am besten, wenn die DMS in der im Bild

8.4-9a und b gezeigten Weise appliziert werden.

Aus den gemessenen Hauptdehnungen  $\epsilon_1, \epsilon_2$  lassen sich die Hauptnormalspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  nach den Formeln (8.2-1) und (8.2-2) für den zweiachsigen Span-

nungszustand mit bekannten Hauptrichtungen berechnen; sie werden hier wiederholt:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2), \quad (8.2-1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \cdot \varepsilon_1). \quad (8.2-2)$$

für die Torsionswelle gilt:

$$|\varepsilon_1| = |\varepsilon_2|, \quad (8.4-19)$$

$$\varepsilon_2 = -\varepsilon_1. \quad (8.4-20)$$

Schaltet man die DMS als Halbbrücken in die Brückenarme 1 und 2, dann entsteht für  $\varepsilon_2$  eine Vorzeichen-Umkehr, s. Abschn. 5 und Gln. (5.2-12) und (5.2-14). Der angezeigte Dehnungswert  $\varepsilon_a$  wird demzufolge

$$\varepsilon_a = \varepsilon_1 - (-\varepsilon_2) = |\varepsilon_1| + |\varepsilon_2| = 2 \varepsilon. \quad (8.4-21)$$

Entsprechendes gilt für die Vollbrückenschaltung.

Daraus ergibt sich der Vorzeichenwechsel im Klammersausdruck der nachfolgenden Gleichung gegenüber den Gln. (8.2-1) und (8.2-2).

Für die Halbbrückenschaltung gilt:

$$\sigma_{1,2} = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot (1 - \nu) \cdot \varepsilon_a. \quad (8.4-22)$$

Für die Vollbrückenschaltung gilt:

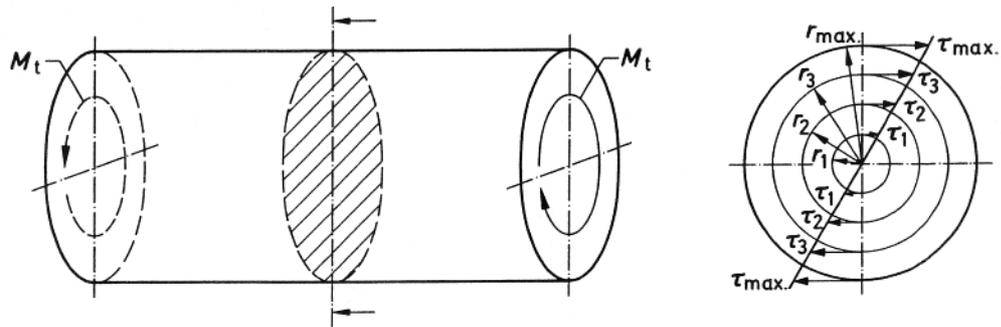
$$\sigma_{1,2} = \pm \frac{1}{4} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot (1 - \nu) \cdot \varepsilon_a. \quad (8.4-23)$$

Die Schubspannung  $\tau$  steigt von  $\tau = 0$  im Zentrum zum Umfang hin auf den Maximalwert  $\tau_{\max}$ .

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= 2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G & (8.4-24) \\ &= \varepsilon_a \cdot G \text{ für die Halbbrückenschaltung,} \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot G \text{ für die Vollbrückenschaltung.} \end{aligned}$$

$\varepsilon_a$  = bei Halb- bzw. Vollbrückenschaltungen angezeigter Dehnungswert

$G$  = Gleitmodul (s. Abschnitt 2.3.2, Gl. 2.3-2)



**Bild 8.4-10: Verteilung der Torsionsspannung über den Querschnitt einer tordierten Welle.**

### Zu 2.

Das Torsionsmoment  $M_t$  errechnet sich aus der nach Gl. (8.4-24) ermittelten Schubspannungen  $\tau_{\max}$  und dem polaren Widerstandsmoment  $W_p$  der Welle zu

$$M_t = \tau_{\max} \cdot W_p = 2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G \cdot W_p \quad (8.4-25)$$

Für die Halbbrückenschaltung gilt:

$$M_t = \varepsilon_a \cdot G \cdot W_p \quad (8.4-26)$$

Für die Vollbrückenschaltung gilt:

$$M_t = \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot G \cdot W_p \quad (8.4-27)$$

Mit  $r$  und  $G$  in  $\text{N}/\text{cm}^2$  und  $W_p$  in  $\text{cm}^3$  ergibt sich  $M_t$  in  $\text{Ncm}$ .

Das polare Widerstandsmoment  $W_p$  ist von der Querschnittsform des tordierten Stabes abhängig. Formeln zu seiner Berechnung sind Tabellenbüchern zu entnehmen. Für die zylindrische Welle gilt:

$$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \approx 0,2 d^3 \quad (8.4-28)$$

Die von rotierenden Wellen übertragene Leistung  $P$  errechnet sich zu

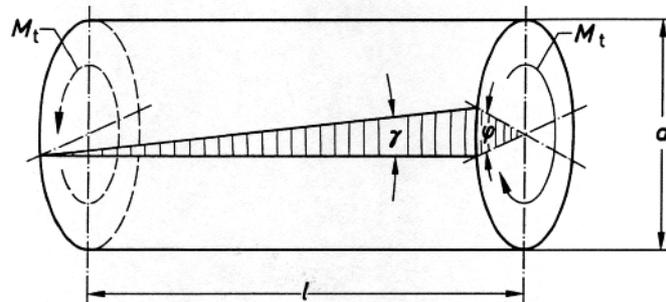
$$P = \omega \cdot M_t = \frac{2 \pi \cdot n}{60} \cdot M_t = 0,105 \cdot n \cdot M_t = \frac{n \cdot M_t}{9,55} \quad (8.4-29)$$

Mit  $M_t$  in  $\text{Nm}$  und der Drehzahl  $n$  in  $1/\text{min}$  erhält man  $P$  in  $\text{Nm}/\text{s} = \text{W}$ .

Zur Übertragung des Messsignals von rotierenden Wellen siehe Abschnitt 8.4.4.1.

Zu 3.

Das Bild 8.4-11 erklärt den Schiebungswinkel  $\gamma$  und den Verdrehungswinkel  $\varphi$  an der Torsionswelle.



**Bild 8.4-11:** Erläuterung zum Schiebungswinkel  $\gamma$  und dem Verdrehungswinkel  $\varphi$ .

Der Schiebungswinkel  $\gamma$  errechnet sich zu

$$\gamma = \frac{\tau_{\max}}{G} \quad (8.4-30)$$

und der Torsionswinkel  $\varphi$  zu

$$\varphi = 2 \cdot \frac{l}{d} \cdot \gamma = 4 \varepsilon_{45^\circ} \cdot \frac{l}{d}; \quad (8.4-31)$$

für die Halbbrücke gilt

$$\varphi = 2 \varepsilon_a \cdot \frac{l}{d}, \quad (8.4-32)$$

für die Vollbrücke gilt

$$\varphi = \varepsilon_a \cdot \frac{l}{d}. \quad (8.4-33)$$

#### 8.4.4.1 Zur Übertragung des Messsignals von rotierenden Wellen

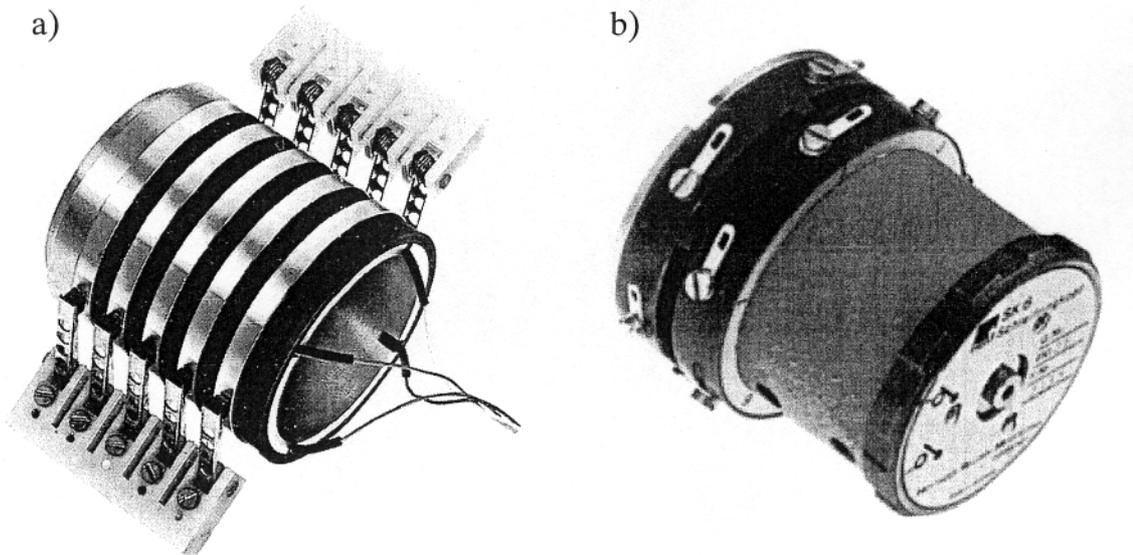
Zur Übertragung des Messsignals von rotierenden Wellen bieten sich verschiedene Möglichkeiten an.

Bei langsamer Drehbewegung und nur wenigen Umdrehungen des Messobjektes kann ein Schleppkabel, das auf- bzw. abgewickelt wird, die einfachste Lösung

darstellen. Sie ist für alle Schaltungsarten anwendbar (auch für die Viertelbrücken-Schaltung, jedoch mit den in den Abschnitten 7.1.1 und 7.2.1 genannten Einschränkungen).

Eine zweite Möglichkeit ist die Übertragung der Brückenspeisespannung und des Messsignals über Schleifringsätze. Es eignen sich nur Ausführungen bester Qualität wegen der zu fordernden extrem niedrigen Übergangswiderstände zwischen Schleifring und Bürste, deren geringem Verschleiß bei möglichst hoher Schleifgeschwindigkeit und sehr kleinen Thermospannungen.

HBM liefert solche Einrichtungen als Schleifringkörper zum Aufziehen auf die rotierenden Wellen in verschiedenen Größen mit 2 Bürstenkämme zum freien Anbau. Die Garnitur enthält 5 Schleifbahnen; davon dienen 4 Bahnen zum Anschluss der DMS, die 5. besorgt eine einwandfreie Masseverbindung mit der rotierenden Welle zwecks Verhinderung von Störimpulsen. Sogenannte Schleifringköpfe zum Anflanschen an ein freies Wellenende sind mit 6 oder 12 Bahnen lieferbar (Bild 8.4-12). Über die zulässigen Drehzahlen und andere technischen Daten informieren die Datenblätter.



**Bild 8.4-12: Schleifringübertrager**

a) Schleifringkörper SK5 mit Bürstenkämmen SK5/ZB

b) Schleifringkopf SK6

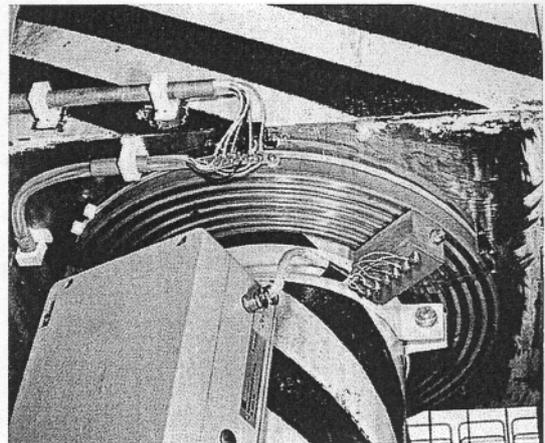
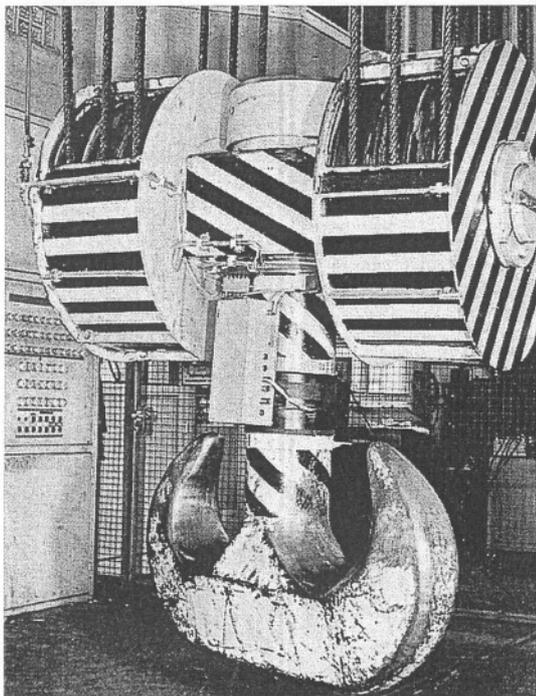
Trotz bester Kontaktwerkstoffe der Schleifringübertrager sind gewisse Schwankungen des Übergangswiderstandes (Kontaktrauschen) unvermeidlich. HBM nennt einen Übergangswiderstand zwischen Ring und Bürste von  $40 \text{ m}\Omega$  und gibt dessen Schwankungen mit  $< 2 \text{ m}\Omega$  an. Während der Übergangswiderstand ziemlich bedeutungslos ist, bilden sich seine Schwankungen im Messsignal ab. Berücksichtigt man, dass sich der Widerstand eines  $120 \Omega$ -DMS bei einer

Dehnung von  $1000 \mu\text{m}/\text{m}$  um ca.  $240 \text{ m}\Omega$  ändert, dann ergibt sich bei einem Viertelbrückenanschluss über 2 Schleifbahnen eine Unruhe des Messsignals von ca.  $1,7 \% = 17 \mu\text{m}/\text{m}$ . Der konstante Anteil des Übergangswiderstandes von  $2 \times 40 \text{ m}\Omega$  verursacht eine scheinbare Empfindlichkeitsminderung des DMS von nur  $0,06 \%$ .

Wesentlich günstiger sind die Verhältnisse beim Anschluss einer Halbbrückenschaltung. Dabei liegen die Übergangswiderstände in Serie mit dem Halbbrücken-Widerstand. Dadurch entsteht bei  $120 \Omega$ -DMS durch den Abfall der Speisespannung an den Kontaktstellen ein scheinbarer Empfindlichkeitsverlust von nur  $0,03 \%$ , bei höheren DMS-Widerständen noch weniger. Der Kontaktwiderstand des 3. Schleifrings, des Signalpfades, hat keinen Einfluss auf die Messung.

Wegen ihrer Vorteile hinsichtlich der Kompensation von Störeinflüssen ist die Vollbrückenschaltung vorzuziehen, wo immer dies möglich ist. Beispiele für die Anwendung der Schleifringübertragung bei DMS-Messungen sind in [8-7,8-8] beschrieben.

Bei stark überdimensionierten Bauteilen entstehen nur geringe Dehnungen. Dadurch entsteht die Gefahr, dass die Messsignale zu einem mehr oder minder



▲  
b)

◀ a)

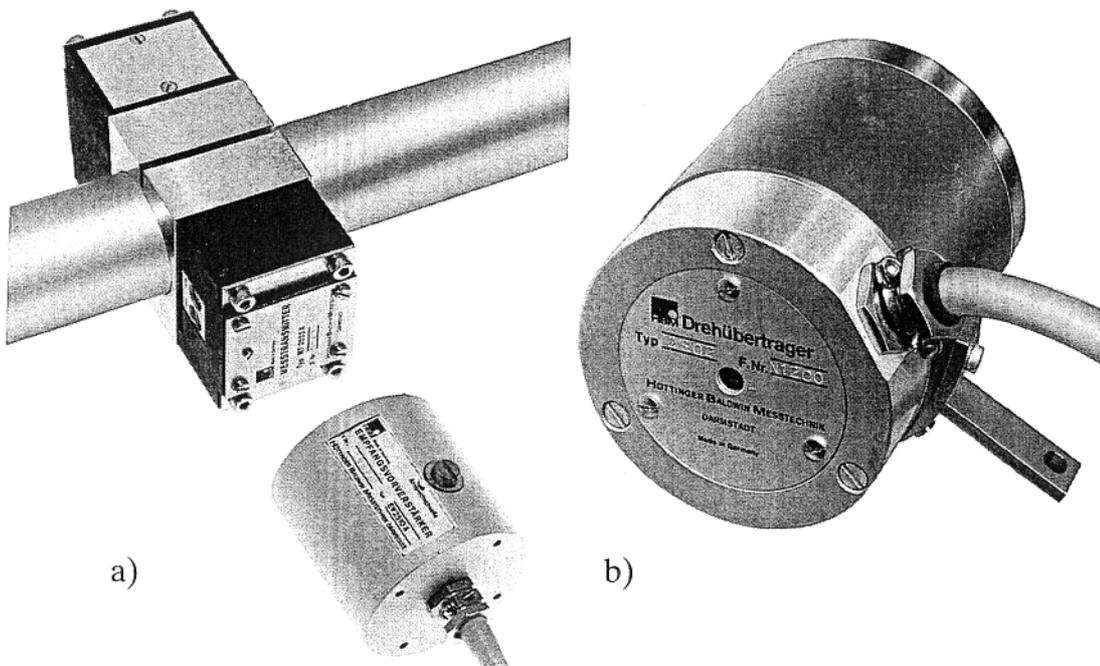
**Bild 8.4-13:** Beispiel für den Anbau eines Verstärkers an dem beweglichen Teil und die Übertragung des verstärkten Signals über Schleifringe (Bilder entnommen aus [8-10]).

- a) Gesamtansicht eines 120 t-Kranhakens mit DMS-Applikationen und montiertem Industrie-Messverstärker
- b) Detailansicht der Schleifringe und Bürsten zur Übertragung der Versorgungsspannung, des verstärkten Messsignals und eines Steuersignals.

großen Teil von den Rauschspannungen und anderen Störsignalen überdeckt werden. Hier kann die Montage des Verstärkers oder eines Vorverstärkers auf dem rotierenden Teil und die Übertragung des verstärkten Signals über die Schleifringe in Betracht gezogen werden, Bild 8.4-13.

Beachtliche Vorteile bietet die berührungslose Messsignalübertragung durch verschleißfreien Betrieb und weitgehende Immunität gegenüber Störeinflüssen. Je nach Aufbau der Systeme kann die Speisung der DMS-Schaltung durch mitrotierende Batterien oder durch berührungslose, induktive Übertragung der Speiseenergie erfolgen.

Die Auskopplung des frequenzmodulierten Messsignals kann kapazitiv oder induktiv erfolgen, je nach Zweckmäßigkeit. Die Umformung der Pulsfrequenz in eine messwertproportionale Gleichspannung erfolgt in Peripheriegeräten. Das Bild 8.4-14 zeigt als Beispiele zwei Ausführungen berührungsloser Messsignalübertrager.



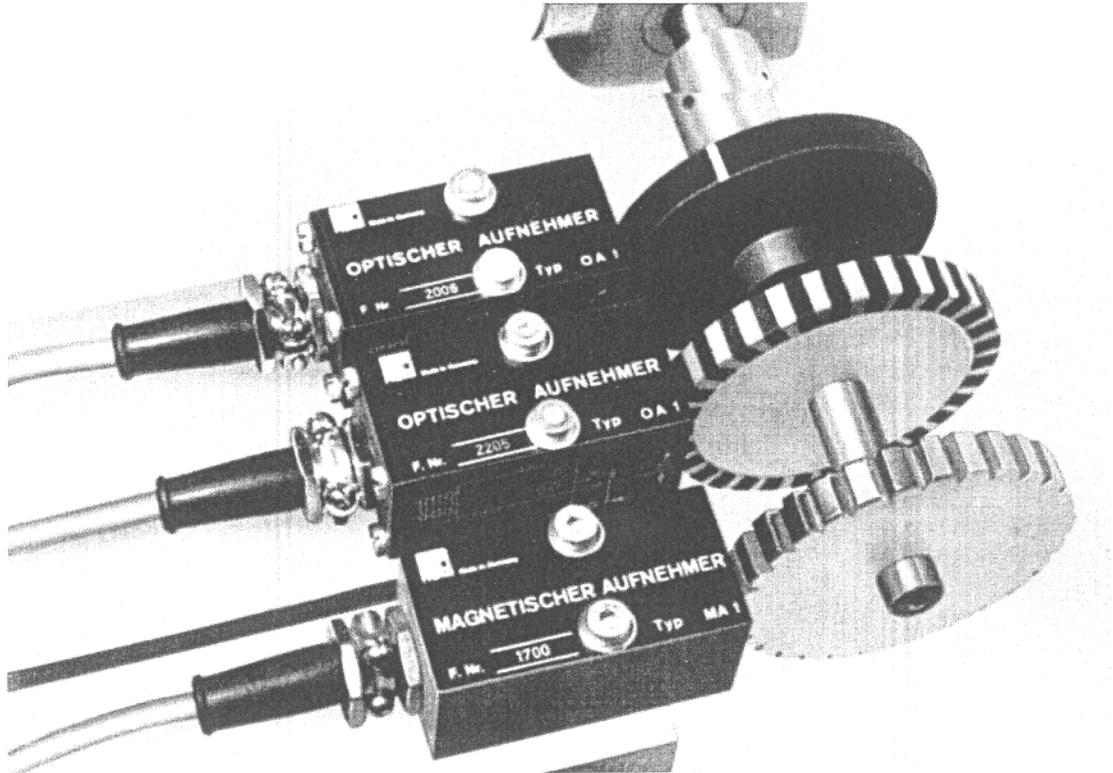
**Bild 8.4-14: Berührungslose Messsignalübertrager**

- a) An der Welle montierbares System mit Batteriekasten und Messtransmitter sowie peripherem Empfangsvorverstärker
- b) Drehübertrager zur Montage an einem Wellenende

Die Erweiterung der Drehmomentmessung zur Leistungsmessung erfordert nur geringen zusätzlichen Aufwand zur Bestimmung der Drehzahl. Hier kommen neben dem Tachodynamo, der eine drehzahlproportionale Spannung liefert, die berührungslosen optischen oder magnetischen Systeme zur Drehzahlmessung in Frage. Beispiele für letztere zeigt das Bild 8.4-15.

Durch Multiplikation der drehmomentproportionalen mit der drehzahlproportionalen Spannung in einem Multiplikationsverstärker erhält man das leistungsproportionale Signal.

Weitere Einzelheiten entnehme man den einschlägigen technischen Datenblättern.



**Bild 8.4-15: Aufnehmersysteme zur berührungslosen Erfassung der Drehzahl rotierender Teile.**

#### 8.4.5 Messung an einem mit Normalkraft und Biegemoment überlagerten Torsionsstab

Es sind zwei Zielrichtungen zu unterscheiden:

1. die Ermittlung der einzelnen Beanspruchungs-Komponenten,
2. die Ermittlung der maximalen Beanspruchung.

Beides ist möglich, erfordert jedoch unterschiedliche DMS-Applikationen.

##### Zu 1.

Jede Beanspruchungskomponente ist separat zu messen. Sollen die Komponenten wegen ihrer zeitlichen Zuordnung gleichzeitig erfasst werden, dann ist

für jede Komponente ein eigener Kanal erforderlich. Die Messsignale können z. B. mit einem Mehrkanalschreiber, synchron registriert werden.

Torsion mit überlagerter Normalbeanspruchung.

Die getrennte Messung jeder Beanspruchungskomponente erfordert:

zur Messung der Torsion eine Applikation nach Abschnitt 8.4.4, Bild 8.4-9, zur Messung der Normalbeanspruchung eine Applikation nach Abschnitt 8.4.1, Bild 8.4-1.

Ein solches Messproblem besteht beispielsweise an Schiffspropeller-Wellen. Wegen der erfahrungsgemäß ziemlich kleinen Dehnungen sollte immer die Vollbrückenschaltung angewandt werden. Sie garantiert auch die beste Unterdrückung von Störeinflüssen.

Torsion mit überlagerter Biegung

Auch hier lassen sich die beiden Komponenten in ähnlicher Weise getrennt messen.

Die Torsionsmessung erfordert wiederum eine Applikation nach Abschnitt 8.4.4, Bild 8.4-9.

Die Biegekomponente ist mit einer Applikation nach Abschnitt 8.4.2, Bild 8.4-2 messbar; es muss jedoch die Richtung des Biegemomentes, die Biegeebene, bekannt sein. Ist die Richtung der Biegeebene unbekannt, dann kann sie durch Suchmessungen mit axial angeordneten Einzel-DMS über  $90^\circ$  des Umfangs gefunden werden oder durch Anwendung eines Übersichtsverfahrens. Dazu gehören das Reisslackverfahren [8-4], das spannungsoptische Oberflächenschichtverfahren und spezielle keramische Überzüge. Letztere erfordern eine Einbrenntemperatur von  $550^\circ\text{C}$ .

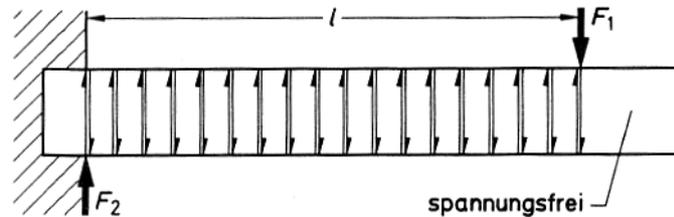
### Zu 2.

Die resultierende Beanspruchung eines mit verschiedenen Komponenten beanspruchten Objektes lässt sich nur nach dem Verfahren zur Analyse eines zweiachsigen Spannungszustandes mit unbekanntem Haupttrichtungen nach Abschnitt 8.2.2 ermitteln.

Bei Torsion mit überlagerter Normalbeanspruchung ist der Ort der Messung belanglos, weil beide Beanspruchungen gleichmäßig über den Querschnitt wirken. Anders bei Torsion mit überlagerter Biegung. Die Biegebeanspruchung durchläuft den Querschnitt vom positiven zum negativen Maximum. Die Stellen der Beanspruchungsmaxima findet man, wenn die Richtung der Biegeebene bekannt ist. Messungen sind an mehreren Stellen über  $90^\circ$  des Umfangs oder durch Anwendung eines der oben genannten Übersichtsverfahren erforderlich.

### 8.4.6 Messungen am Scherstab

In ähnlicher Weise, wie beim Torsionsstab die Schubspannungen in Verbindung mit einem Drehmoment auftreten, so entstehen sie beim Scherstab in Verbindung mit einem Biegemoment. An dem im Bild 8.4-16 dargestellten Beispiel soll dies erläutert werden.



**Bild 8.4-16: Entstehung von Schubbeanspruchungen in einem Kragbalken.**

Der einseitig eingespannte Balken (Kragbalken) wird im Abstand  $l$  mit der Kraft  $F_1$  belastet. Die gleichgroße Reaktionskraft  $F_2$  ist entgegengesetzt gerichtet. Es entsteht ein Kräftepaar, wie es schon im Bild 2.2-2 gezeigt wird. Die Tatsache, dass die Kraftangriffspunkte einen großen Abstand haben, ist für die entstehenden Schubspannungen ohne Belang. In jeder Querschnittsebene zwischen den beiden Kraftangriffspunkten entstehen Schubspannungen. Die mit den Schubspannungen  $\tau$  einhergehenden Normalspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  verlaufen - wie beim Torsionsstab - unter einem Winkel von  $45^\circ$  zur Schubebene, Bild 8.4-17a. Gleichzeitig bewirkt die Kraft  $F$  mal der Strecke  $l$  ein Biegemoment; die davon erzeugten Biegespannungen überlagern sich den Normalspannungen. Deshalb gilt die Winkelangabe  $\pm 45^\circ$  exakt nur in Höhe der neutralen Faserschicht, wo die Biegespannungen zu null werden. Zu den Rändern hin dreht sich das Achsenkreuz, so dass die Randspannungen (es sind reine Biegespannungen) parallel zu den Rändern verlaufen, Bild 8.4-17b. Deshalb ist es wichtig, die DMS so nahe wie möglich an die neutrale Faser heran zu bringen.

Die Schubspannungen  $\tau$  und die Schiebungswinkel  $\gamma$  sind mit DMS nicht messbar; beide lassen sich jedoch aus den unter  $45^\circ$  gemessenen Dehnungen berechnen. Es gilt die Beziehung

$$\varepsilon_{45^\circ} = \frac{\tau}{2G} = \frac{1}{2} \gamma. \quad (8.4-34)$$

Daraus ergeben sich:

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \gamma \cdot G = 2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G & (8.4-35) \\ &= \varepsilon_a \cdot G \text{ für die Halbbrückenschaltung,} \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot G \text{ für die Vollbrückenschaltung.} \end{aligned}$$

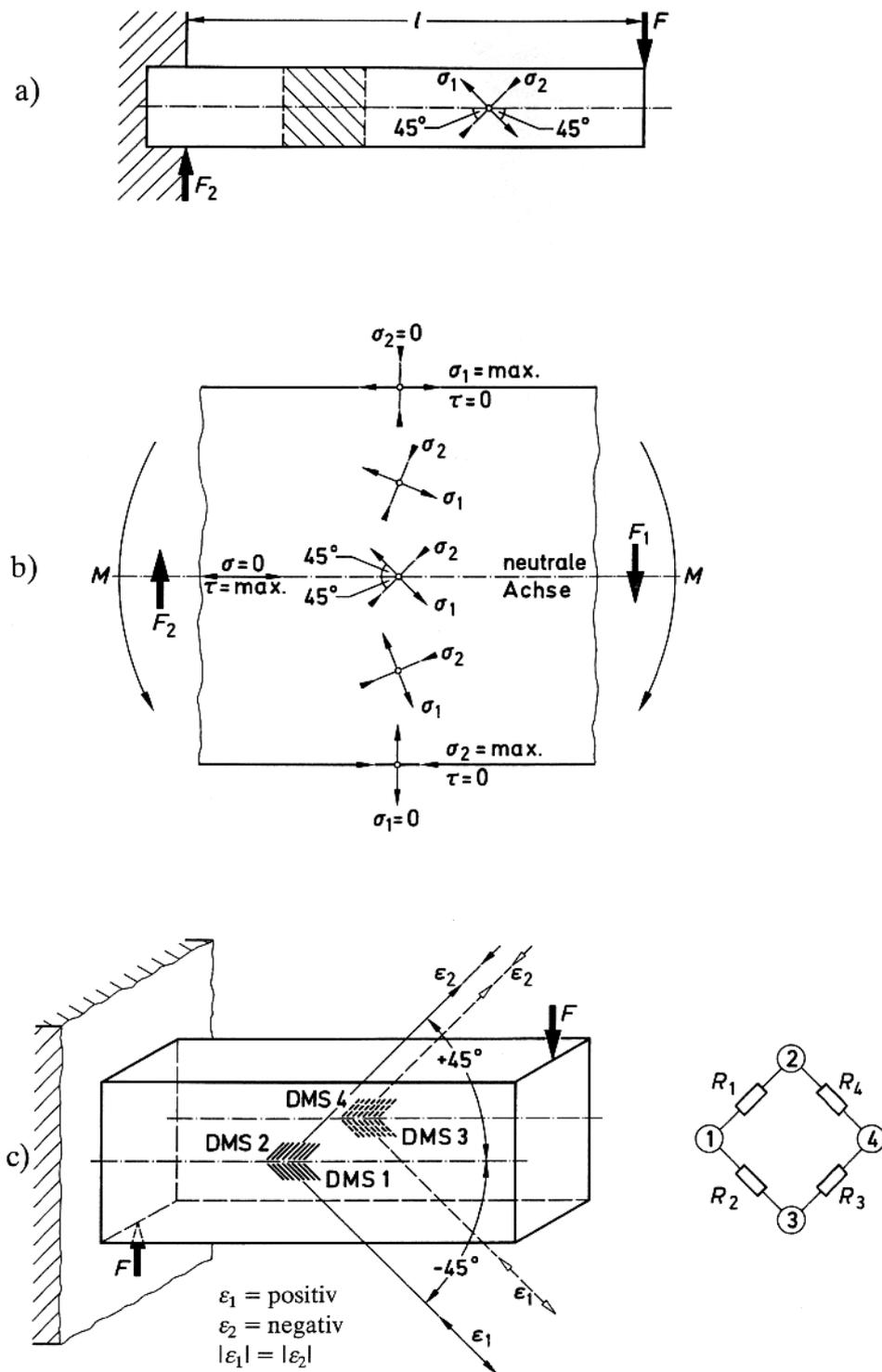
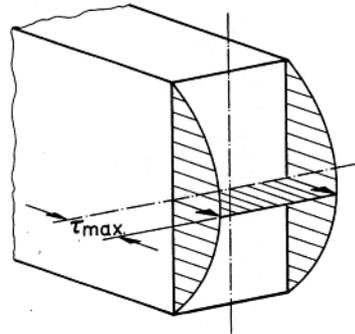


Bild 8.4-17: Spannungs- und Dehnungszustände am Scherstab

- a) Richtungen der Hauptnormalspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  in Höhe der neutralen Faserschicht  
b) Richtungen der Hauptnormalspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  und der Schubspannungen  $\tau$  entlang der Querschnittshöhe bei überlagerter Scher- und Biegebeanspruchung  
c) Anordnung der DMS zur Messung der Dehnungsmaxima  $\epsilon_{45^\circ}$  und in der Brückenschaltung

$$\gamma = 2 \varepsilon_{45^\circ}. \quad (8.4-36)$$

Die Schubspannungsverteilung über den Querschnitt ist nichtlinear. Bei einem Rechteckquerschnitt ist die Verteilung etwa so, wie es das Bild 8.4-18 zeigt.



**Bild 8.4-18: Schubspannungsverteilung in einem Rechteck-Querschnitt**

Die überlagerten Biegedehnungen/Biegespannungen können nach der im Abschnitt 8.4.2 beschriebenen Methode bestimmt werden. Dazu wird die dort beschriebene DMS-Anordnung zusätzlich benötigt.

Aus der gemessenen Dehnung  $\varepsilon_{45^\circ}$  kann man auch die Kraft  $F$  bestimmen. Es gilt

$$F = \frac{2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G \cdot A}{c_A}, \quad (8.4-37)$$

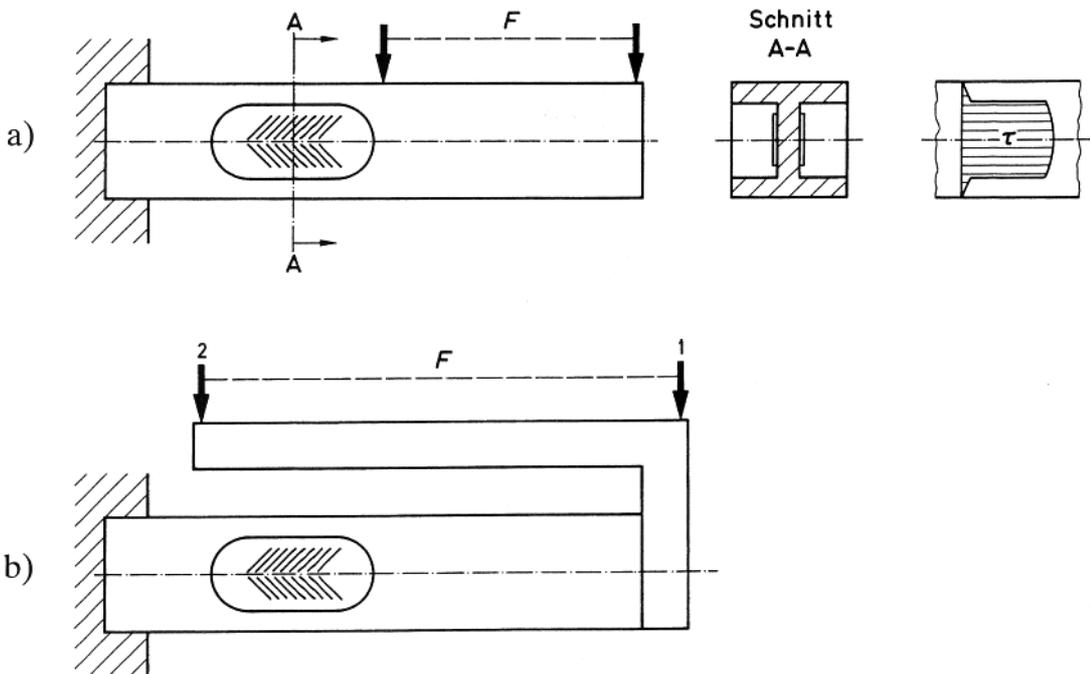
entstanden aus

$$\tau_{\max} = \frac{F}{A} \cdot c_A = \gamma \cdot G = 2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G. \quad (8.4-38)$$

Der Formfaktor  $c_A$  hängt von der Querschnittsform des Balkens ab. Für rechteckige Querschnitte mit  $b/h \leq 1/2$  wird  $c_A = 3/2$ ; für einen Kreisquerschnitt  $c_A = 4/3$  und für einen Kreisringquerschnitt  $c_A = 2$ . Für andere Querschnittsformen lässt sich  $c_A$  nach den in der Fachliteratur gegebenen Formeln berechnen. Will man den Scherstab ausschließlich zur Kraftmessung benutzen, dann empfiehlt es sich, ein Profil zu verwenden, das bei minimaler Querschnittsfläche ein maximales Biege-Widerstandsmoment besitzt, z. B. ein I-Profil. Seine Vorteile sind, verglichen mit einem Rechteck-Profil:

- Die  $\varepsilon_{45^\circ}$ -Dehnungen werden größer.
- Die Biegespannungen werden kleiner.
- Die Schubspannungs-Verteilung im Bereich der DMS wird gleichförmiger.
- Das Messsignal wird (im Gegensatz zum Biegestab) unabhängig vom Kraftangriffspunkt.

Das Bild 8.4-19 zeigt ein Beispiel. Die Variante **b)** mit einer angekoppelten Armatur erlaubt, den Kraftangriffspunkt noch über die Messstelle hinaus zu verlagern.



**Bild 8.4-19: 1-Variante eines Scherstabes zur Kraftmessung und Schubspannungsverteilung im Steg. Weitere Erläuterungen im Text.**

Die Anordnung der DMS erfolge zweckmäßigerweise gemäß Bild 8.4-17c in Vollbrückenschaltung. Die Zuordnung des Messsignals  $\varepsilon_a$  zur Kraft  $F$  erfolge durch Kalibrieren mit einer Kraft bekannter Größe.

#### 8.4.7 Messung von Wärmespannungen

Wärmespannungen entstehen in Bauteilen, wenn die durch Temperaturänderungen verursachte Ausdehnung oder Zusammenziehung gewaltsam be- oder verhindert wird. Wärmespannungen sind normale Werkstoffspannungen. Als typisches Beispiel für ein Objekt, in dem Wärmespannungen größeren Ausmaßes entstehen, seien endlos geschweisste Eisenbahnschienen erwähnt. Die Entstehung von Wärmespannungen soll ein Beispiel erläutern.

Ein Rohr aus Stahl von  $l = 2 \text{ m}$  Länge wird von  $15^\circ\text{C}$  auf  $35^\circ\text{C}$  erwärmt, das ergibt  $\Delta\vartheta = 20\text{K}$ . Der Längenausdehnungskoeffizient von Stahl beträgt  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ m}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Daraus errechnet sich die Längenänderung  $\Delta l$  zu

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta = 2\text{m} \cdot 12 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m/m}}{\text{K}} \cdot 20\text{K} = 480 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 480 \mu\text{m}.$$

Bezogen auf 1m Länge ergibt das eine Dehnung von

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{480 \mu\text{m}}{2 \text{ m}} = 240 \mu\text{m/m}.$$

Um diese Dehnung wieder zu beseitigen, ist eine Kraft erforderlich, die das Rohr auf seine ursprüngliche Länge zurückdrückt. Dadurch entsteht eine (in diesem Fall negative) Längsspannung im Rohr. Die gleiche Spannung entsteht, wenn das Rohr durch äußere Einspannungen in seiner ursprünglichen Länge festgehalten wird. Die Längsspannung  $\sigma$  ergibt sich zu

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = - 240 \mu\text{m/m} \cdot 206 \text{ N/mm}^2 \approx - 50 \text{ N/mm}^2.$$

Die dabei entstehende (Druck-) Kraft  $F$  ist vom Querschnitt  $A$  des Rohres abhängig. Bei einem Rohr mit einem Außendurchmesser von  $50 \text{ mm}$  und einer Wandstärke von  $3 \text{ mm}$  errechnet sich der Querschnitt aus dem mittleren Durchmesser  $D$  mal der Wandstärke  $s$  zu

$$A = (D - s) \cdot \pi \cdot s = (50 - 3) \cdot \pi \cdot 3 = 443 \text{ mm}^2.$$

$$F = \sigma \cdot A = - 50 \text{ N/mm}^2 \cdot 443 \text{ mm}^2 = - 22150 \text{ N}.$$

Das Beispiel zeigt, dass relativ kleine Temperaturänderungen schon beachtliche Spannungen und Kräfte erzeugen können.

Die Anordnung der DMS am Messobjekt richtet sich danach, was man messen will. Bei stabförmigen Objekten geben die Abschnitte 8.4.1 bis 8.4.3 Informationen dazu, für flächenhafte Objekte der Abschnitt 8.2.2. Selbsttemperaturgang kompensierende DMS sind vorzuziehen. Eine gleichzeitige Temperaturmessung [8-5, 8-6] bringt in manchen Fällen nützliche zusätzliche Informationen.

Das Problem ist nun: Wie kann man mit DMS verhinderte Dehnungen messen? Die folgenden Abschnitte beschreiben mehrere Methoden, deren jeweilige Zweckmäßigkeit von den am Messobjekt angetroffenen Bedingungen diktiert wird.

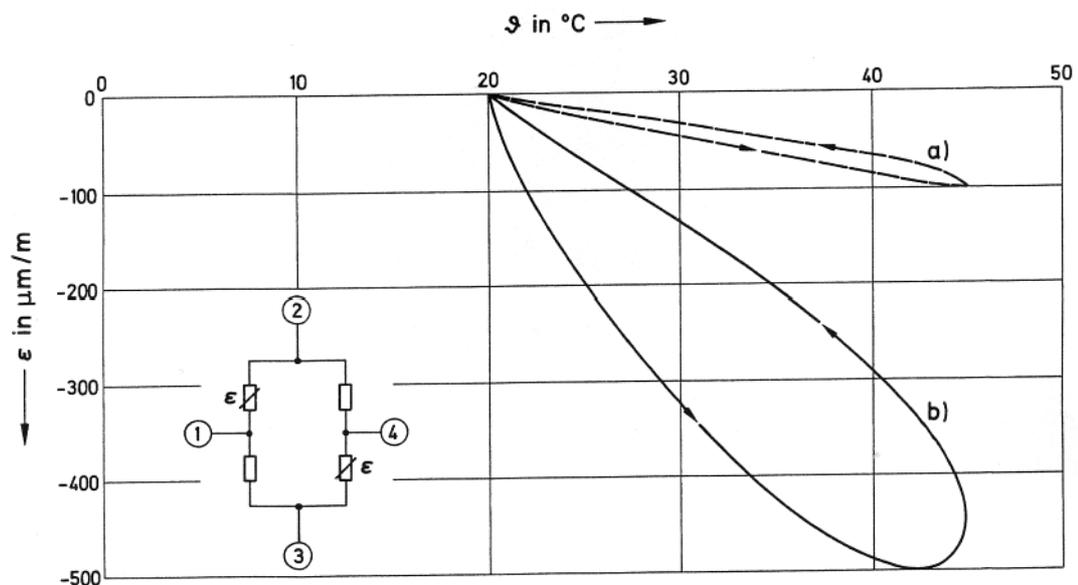
Die speziellen Probleme bei der Ermittlung von Wärmespannungen mit DMS an Epoxydharzmodellen sind in [8-10] beschrieben.

### 8.4.7.1 Vergleich zweier Messungen am freien und am eingespannten Objekt

Eine Vergleichsmessung ist nur möglich, wenn das zu untersuchende Bauteil entweder vor oder nach der Lastmessung frei gemacht und im gleichen Temperaturbereich einer Bezugsmessung unterzogen werden kann. Auf diese Weise lassen sich Temperaturgangfehler feststellen und eliminieren. Die Methode soll an einem durchgeführten Modellversuch erklärt werden.

Ein in seiner Wärmeausdehnung nicht behindertes Aluminiumrohr trägt auf gegenüberliegenden Seiten 2 DMS und zusätzlich 1 Thermowiderstand Pt 100 zur Temperaturmessung. Die DMS sind als 2/4- oder Diagonalbrücke geschaltet zwecks Verdoppelung des Messwertes  $\varepsilon_1$  und Kompensation eventuell auftretender Biegung. Bei der Zweiviertelbrückenschaltung wird  $\varepsilon_1 = 1/2 \varepsilon_a$ .

Das Rohr wird von Raumtemperatur auf 45 °C erwärmt. Der entstehende Messwert  $\varepsilon = 1/2 \varepsilon_a = -100 \mu\text{m/m}$  entsteht durch Fehlanpassung des DMS an den Wärmedehnungskoeffizienten des Aluminiumrohres (Temperaturgang), Bild 8.4-20a.



**Bild 8.4-20: Ergebnis eines Modellversuchs zur Ermittlung von Wärmespannungen.**

**a) Signal des frei expandierenden Rohres (Bezugsmessung),**

**b) Signal des eingespannten Rohres (Lastmessung).**

**Für die Zweiviertelbrückenschaltung gilt:  $\varepsilon = 1/2 \varepsilon_a$ .**

Nach der Abkühlung wird das Rohr an seinen beiden Enden in eine kräftige Klammer gespannt, welche die Wärmedehnung des Rohres weitgehend verhindert. Bei erneutem Anwärmen entsteht ein Messwert  $\varepsilon = 1/2 \varepsilon_a = -500 \mu\text{m/m}$  (Lastmessung), obwohl das Rohr in seiner Länge zwangsläufig fixiert ist, Bild 8.4-20b.

Die Differenz von  $-400 \mu\text{m/m}$  entspricht der verhinderten Wärmedehnung. (Die große Hystereseschleife entsteht durch die ungleichmäßige Abkühlung des Rohres im eingespannten Zustand. Infolge der massiven Spannelemente kühlen die Rohrenden wesentlich schneller ab als die Rohrmitte, wo die Temperatur gemessen wird. Während sich die Temperaturanzeige auf den einen Punkt bezieht, wird die Dehnungsanzeige vom Dehnungsintegral über die Rohrlänge bestimmt.)

Ohne die Bezugsmessung wäre ein Fehler von 20 % entstanden.

#### 8.4.7.2 Messung mit einem Kompensationsstück

Die einfachste Methode zur Kompensation des Temperaturgangfehlers besteht darin, ein separates Stück des Bauteilmaterials als Kompensationsstück zu benutzen. Bei Messungen an Eisenbahnschienen kann das ein anderes, nicht eingespanntes Stück Schiene sein. Diese Art der Temperaturgangkompensation ist im Abschnitt 7.1 beschrieben. Der Vorteil ist, dass man mit nur einer Messung das richtige Ergebnis erhält und sich die Bezugsmessung erspart.

#### 8.4.7.3 Separate oder nachträgliche Ermittlung des Temperaturgangs

Wenn es nicht möglich ist, die Bezugsmessung am realen Objekt durchzuführen, kann sie auch an einem separaten Stück des gleichen Bauteilwerkstoffs vorgenommen werden. Dann braucht man jedoch die Zuordnung des Dehnungsmesswertes zur Temperatur, das heißt, man muss am Vergleichsstück und am Messobjekt nahe beim DMS die Temperatur messen.

Wenn es das Objekt zulässt, kann man auch nach der Lastmessung durch einen Eingriff den DMS samt dem darunter befindlichen Werkstoff heraustrennen, etwa in der Art, wie es Bild 3.2-10 zeigt. Dabei darf der DMS keinen Schaden erleiden. Die Bezugsmessung (Temperaturgangmessung) kann dann nachträglich in der eingangs geschilderten Weise ermittelt werden.

Je nachdem ein- oder zweiachsige Wärmespannungen zu erwarten sind, müssen Linear-DMS oder R-Rosetten verwendet werden. Die Auswertung der Messwerte erfolge gemäß den Abschnitten 8.1 bzw. 8.2.2.

## 9 Betrachtungen zur Messgenauigkeit

Dehnungsmessstreifen sind im Anlieferungszustand zwar ein fertiges Produkt, aber noch kein fertiges Messgerät. Diese nur scheinbar widersinnige Feststellung ergibt sich aus der Tatsache, dass der DMS erst nach der vom Anwender auszuführenden Applikation messfähig wird. Insofern sind Genauigkeitsangaben seitens des Herstellers an die bei ihm anzutreffenden Bedingungen gebunden. Deshalb wird, damit auch der Anwender gute Messergebnisse bekommt, in allen dafür in Frage kommenden Abschnitten dieses Buches ausführlich auf mögliche Fehlerquellen hingewiesen und werden Maßnahmen zur Kompensation oder Korrektur von Fehlern beschrieben.

Dass DMS imstande sind, ungewöhnlich genaue Messergebnisse zu liefern, ist von den Messgrößenaufnehmern bekannt. Wägezellen für den eichpflichtigen Verkehr liegen an der Spitze mit einem zulässigen Fehler von weniger als 0,02 %. Die zeitliche Konstanz des Kennwertes (Empfindlichkeit) ist besser als  $1 \cdot 10^{-4}$ /Jahr. Diese extreme Genauigkeit ist nur mit Aufnehmern zu erreichen und zu halten, bei welchen die Messstellen hermetisch gekapselt sind. Neueste Konstruktionen von Präzisions-Kraftaufnehmern, die für internationale Vergleichsmessungen an Kraftnormalmesseinrichtungen bestimmt sind, brachten eine weitere Steigerung der Messgenauigkeit [9-1].

Unter den bei der experimentellen Spannungsanalyse und vergleichbaren Anwendungsgebieten anzutreffenden Bedingungen reduziert sich die erreichbare Messgenauigkeit sehr schnell auf konventionelle Werte im Prozentbereich. Dabei darf nicht übersehen werden, dass sämtliche Glieder der Messkette, das Messobjekt eingeschlossen, einen Beitrag zum Messfehler liefern.

Hierbei denke man an elektrische Unsymmetrien in der Brückenschaltung, mechanische Unsymmetrien im Messobjekt (z. B. durch Fertigungstoleranzen, Verzerrungen der Querschnitte infolge der Belastung, Anisotropie der elastischen Eigenschaften), Richtungsfehler der DMS und ähnliches.

Eine sorgfältige Fehlerbetrachtung sollte deshalb jede Messung begleiten: vor der Messung, um große Fehlerquellen zu erkennen und, wenn möglich, zu beseitigen; nach der Messung, um eine konkrete Vorstellung von der Größenordnung des verbleibenden, wahrscheinlichen Messfehlers zu erhalten.

Die neuere Philosophie ersetzt den Begriff „Messfehler“ bis auf wenige Ausnahmen durch den Begriff „Messunsicherheit“. Eine weitergehende Darlegung des in diesem Abschnitt behandelten Themas ist in [9-2] zu finden.

## 9.1 Ursachen für Messabweichungen

Jedes Messergebnis wird verfälscht durch Unvollkommenheit

- des Messgegenstandes,
- der Messgeräte (einschließlich der Maßverkörperungen),
- der Messverfahren,
- durch Umwelteinflüsse,
- durch persönliche Einflüsse des Beobachters,
- durch zeitliche Veränderungen aller vorgenannten Fehlerquellen.

Durch diese Einflüsse weicht jeder Messwert um gewisse Beträge vom wahren Wert der gesuchten Größe ab. Ein Messergebnis ist unvollständig, wenn nicht eine Angabe über das Ausmaß der in ihm enthaltenen Abweichungen gemacht wird. Es müssen Grenzen genannt werden, innerhalb derer der wahre Wert der gesuchten Größe liegt.

Man unterscheidet:

- a) grobe Fehler,
- b) Zufallsstreuungen,
- c) systematische Abweichungen.

Zu a):

Grobe Fehler entstehen z. B. durch

- Wahl eines ungeeigneten Mess- oder Auswerteverfahrens,
- falsche Anwendung von Messwertaufnehmern (z. B. Applikationsfehler),
- Fehler in der Schaltung,
- falsche Bedienung der Messgeräte,
- Irrtümer beim Ablesen des Messwertes,
- Protokollierfehler,
- Vernachlässigen einer Fehlerquelle.

Für grobe Fehler gibt es keine Korrekturmöglichkeit. Entweder werden sie rechtzeitig erkannt und eliminiert oder sie gehen voll in das Messergebnis ein. Gelegentlich erkennt man an einem unwahrscheinlichen Ergebnis, dass sich ein grober Fehler eingeschlichen hat. Mitunter sind aber auch „unwahrscheinliche“ Ergebnisse richtig und die Erwartungen waren falsch.

Zu b):

Zufallsstreuungen entstehen durch Einflüsse, deren Vorhandensein vom Zufall abhängt. Dazu gehören alle während der Messung nicht erfassbaren und nicht beeinflussbaren Änderungen

- des Messgegenstandes (Alterung),
- der Umwelt (Temperatur, Feuchtigkeit, Luftdruck, elektrische und magnetische Felder, Strahlung),

- der Belastungseinrichtungen (Reibung, Abnutzung, Spiel in Hebelübersetzungen),
- der Messgeräte (Alterung, Änderung der Betriebsspannung, Umwelteinflüsse),
- des Beobachters (Ermüdung, Beeinträchtigung durch äußere Einflüsse).

Die verschiedenen Einflüsse können nicht getrennt werden und folgen keinem erkennbaren Gesetz. Zufallsstreuungen schwanken ungleich nach Betrag und Vorzeichen ( $\pm$ ). Sie sind in ihrem Ausmaß nur durch mehrfache Wiederholung der Messung erfassbar.

Zu c):

Systematische Abweichungen werden hauptsächlich hervorgerufen durch

- Unvollkommenheit des Messgegenstandes,
- Unvollkommenheit des Messverfahrens,
- Unvollkommenheit der Messgeräte,

in zweiter Linie durch

- Einflüsse aus der Umwelt,
- Eigenarten des Beobachters.

Systematische Abweichungen haben einen bestimmten Betrag und ein bestimmtes Vorzeichen (entweder + oder -). Sie können grundsätzlich durch Vergleichsmessungen mit Geräten oder Verfahren höherer Genauigkeit erfasst werden. Eine bekannte systematische Abweichung kann durch das angewandte Messprinzip bedingt sein (z. B. Anschluss eines Aufnehmers mit nichtlinearer Charakteristik an einen Messverstärker mit linearer Kennlinie). Erfassbare systematische Abweichungen sind zu korrigieren. Die Korrektur  $K$  hat das entgegengesetzte Vorzeichen der Abweichung.

## 9.2 Rechnerische Erfassung der Zufallsstreuung von Messwerten einer Messreihe

Mit den Mitteln der mathematischen Statistik können die Zufallsstreuungen zahlenmäßig abgeschätzt werden, und zwar um so zuverlässiger, je größer die Anzahl der ausgeführten Messungen ist, d. h. es können Grenzen angegeben werden, innerhalb derer das Messergebnis unsicher ist.

### 9.2.1 Versuchsvoraussetzungen

Die Versuchsbedingungen haben einen Einfluss auf die Streuung der Messwerte. Man unterscheidet zwischen zwei Grenzfällen praktischer Versuchsvoraussetzungen:

Wiederhol-Bedingungen:

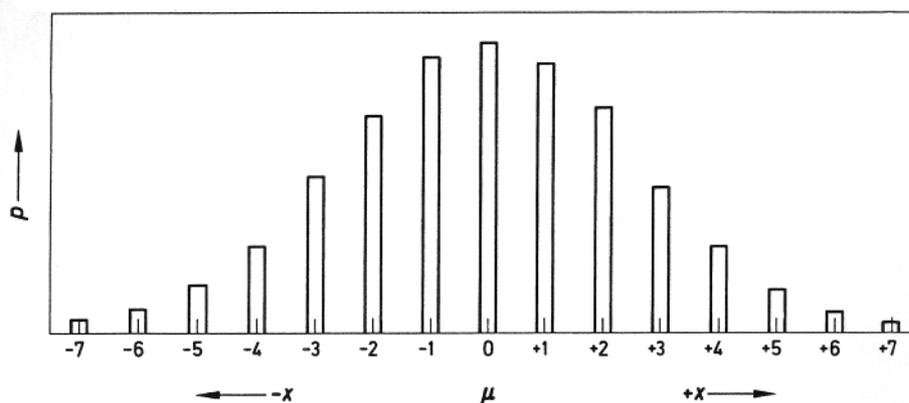
Ein Beobachter bestimmt den Messwert mit ein und demselben Messgerät nacheinander unter gleichen Arbeitsbedingungen. Unter Wiederhol-Bedingungen sind systematische Fehler nicht erkennbar.

Vergleich-Bedingungen:

Verschiedene Beobachter führen Messungen in verschiedenen Laboratorien unter Verwendung verschiedener Messgeräte der gleichen Bauart durch. In diesem Fall ist die Standardabweichung im allgemeinen größer als unter Wiederholbedingungen.

## 9.2.1.1 Die Gauß-Verteilung

Für die statistische Auswertung einer Messung wird eine Gauß'sche Normalverteilung der untersuchten Größe vorausgesetzt. Die Gaußverteilung kann überall dort erwartet werden, wo Streuungen der Messgröße rein zufallsbedingt sind; es darf keine Vor-Auswahl oder andere Maßnahme getroffen sein, durch die eine einseitige Verschiebung oder Bevorzugung eines Teilbereiches des Streubereiches erfolgt. Das bedeutet, dass alle Messungen unter Wiederhol-Bedingungen ausgeführt werden, wenigstens aber unter Vergleich-Bedingungen. Aus einer auf diese Weise gewonnenen sehr großen Anzahl von Einzelmessungen (z. B. 1000) errechne man den arithmetischen Mittelwert nach Gleichung (9.2-1), Abschnitt 9.2.2. Von jedem einzelnen Messwert bilde man die Differenz zum Mittelwert. Man wird finden, dass eine große Anzahl von Einzelmessungen genau den Mittelwert trifft, eine weitere große Anzahl dicht dabei liegt und eine immer kleiner werdende Anzahl mit immer größeren positiven und negativen Abweichungen vom Mittelwert. Trägt man in einem Histogramm (Säulendia-



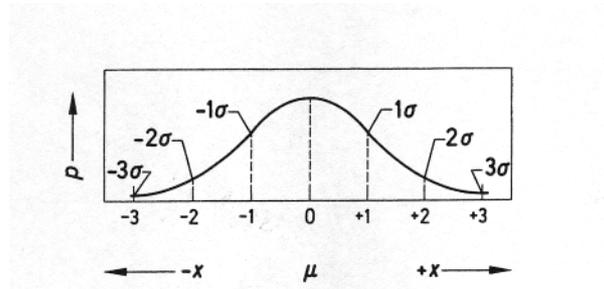
$x$  = Abweichung vom Mittelwert  $\mu$  (Erwartungswert)

$p$  = Anzahl der Messwerte innerhalb jeder Gruppe

**Bild 9.2-1: Histogramm der Verteilung von Streuwerten einer Messreihe**

gramm) die für jeden Differenzwert gefundenen Anzahlen  $p$  ein, so entsteht ein charakteristisches Verteilungsbild, Bild 9.2-1.

Unter idealen Bedingungen und in unendlich feingestufte Darstellung erhält man eine Normalverteilung, die nach ihrem Begründer auch Gauß-Verteilung genannt wird, Bild 9.2-2.



**Bild 9.2-2: Häufigkeitsdichte  $p$  der Gaußverteilung („Gauß'sche Glocken-Kurve“)**

Im Gauß-Diagramm entsprechen die Inhalte der Flächenteile unter der Kurve dem Anteil der Einzelwerte an der Gesamtzahl der Messwerte, der sogenannten Grundgesamtheit.

Die Wendepunkte der die Fläche begrenzenden Kurve sind im Bild 9.2-2 mit  $-1\sigma$  und  $+1\sigma$  gekennzeichnet. Die Strecke  $u$  auf der Abszissenachse (im Bild 9.2-2 ist  $1\sigma = 1x$  gesetzt) wird Standardabweichung der Grundgesamtheit genannt.

Bei der Normalverteilung (Gaußverteilung) der Messgröße fallen im Mittel von 1000 unabhängigen Einzelwerten

683 in den Bereich  $x \pm 1\sigma$  (68,3 %),

954 in den Bereich  $x \pm 2\sigma$  (95,4 %),

997 in den Bereich  $x \pm 3\sigma$  (99,7 %).

Die Prozentzahlen entsprechen dem jeweiligen Vertrauensniveau  $(1-\alpha)$ .

In der Industrie wird bei der Fertigungsüberwachung zunehmend ein Vertrauensniveau  $(1-\alpha)$  von 95 % vorgezogen, auf manchen Anwendungsgebieten auch 99 %.

Von 1000 unabhängigen Einzelwerten fallen hierbei

950 in den Bereich  $x \pm 1,96\sigma$ ,  $1-\alpha = 95\%$ ,

990 in den Bereich  $x \pm 2,58\sigma$ ,  $1-\alpha = 99\%$ .

Wenn eine Messgröße nur wenig streut, erhält man eine enge Kurve, Bild 9.2-3a, bei großer Streuung hingegen eine weitgespannte Kurve, Bild 9.2-3b. Man kann aus dem Zahlenwert für  $\sigma$  erkennen, ob eine Messgröße wenig oder stark streut.

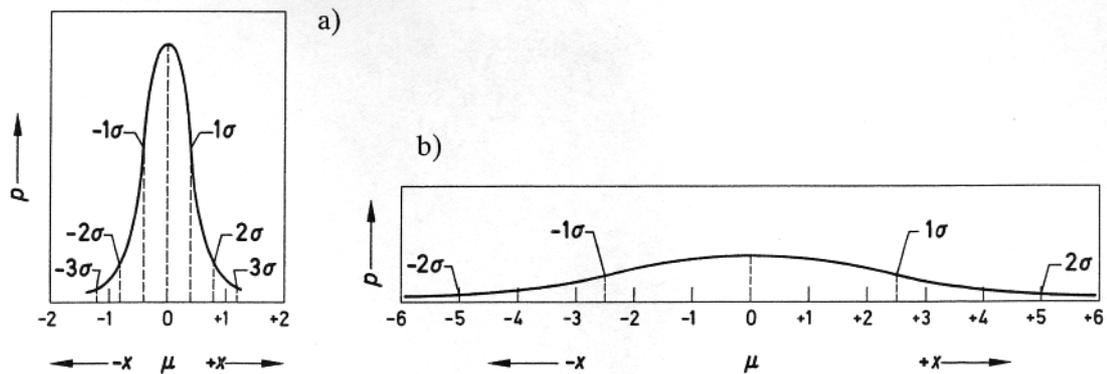


Bild 9.2-3: Häufigkeitsdichte  $p$  der Gaußverteilung

a) bei kleiner Streuung der Messgröße ( $\sigma = 0,4x$ )

b) bei großer Streuung der Messgröße ( $\sigma = 2,5x$ )

In der Praxis ist es nun nicht möglich, jede Messung 1000 mal zu wiederholen. Man berechnet deshalb (anstelle der Standardabweichung  $\sigma$  der Grundgesamtheit) aus einer kleineren Anzahl Messungen mit der Gleichung (9.2-2), Abschnitt 9.2.3, einen Schätzwert für  $\sigma$ , die Standardabweichung  $s$ . Je größer die Anzahl der Einzelmessungen ist, um so mehr nähert sich  $s$  dem Wert  $\sigma$ .

## 9.2.2 Arithmetischer Mittelwert

Sind bei einer Messreihe  $n$  voneinander unabhängige Einzelwerte  $x_1 \dots x_i \dots x_n$  unter Wiederhol- oder Vergleich-Bedingungen gemessen worden, so gilt als Ergebnis üblicherweise das arithmetische Mittel aus diesen  $n$  Einzelwerten, kurz *Mittelwert*  $\bar{x}$  genannt (gesprochen x-quer).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (9.2-1)$$

$\bar{x}$  ist ein Schätzwert für den Erwartungswert  $\mu$ .

## 9.2.3 (Empirische) Standardabweichungen $s$ und Variationskoeffizient $v$

Die wichtigste Rechengröße für die zahlenmäßige Erfassung der Zufallsstreuung von  $n$  Einzelwerten einer Messreihe um ihren Mittelwert  $\bar{x}$  ist die mittlere quadratische Abweichung der Einzelbeobachtungen; sie wird (*empirische*) *Standardabweichung*  $s$  genannt:

$$\begin{aligned}
 s &= + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = & (9.2-2) \\
 &= + \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}}.
 \end{aligned}$$

Die (empirische Standardabweichung  $s$  ist ein Schätzwert für die Standardabweichung  $\sigma$  (s. Abschnitt 9.3).

Das Quadrat der Standardabweichung heißt Varianz  $s^2$  bzw.  $\sigma^2$ .

Anstelle der (empirischen) Standardabweichung  $s$  wird auch der (empirische) Variationskoeffizient  $v$  benutzt;  $v$  wird auch in % ausgedrückt. Es gilt für  $x \neq 0$ :

$$v = \frac{s}{|\bar{x}|} = \frac{100 s}{|\bar{x}|} \% . \quad (9.2-3)$$

Der Variationskoeffizient wurde früher „relative Standardabweichung  $s_r$ “ genannt.

#### 9.2.4 Vertrauensgrenze und Vertrauensbereich für den Erwartungswert $\mu$

Man darf nicht annehmen, dass der Mittelwert  $\bar{x}$  gleich dem Erwartungswert  $\mu$  bzw. dem wahren Wert  $x_w$  sei. Es ist aber möglich, ein Intervall um den (um bekannte systematische Abweichungen berichtigten) Mittelwert  $\bar{x}$  anzugeben, das den Erwartungswert mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit  $(1-\alpha)$  überdeckt. Die Grenzen dieses Intervalls heißen Vertrauensgrenzen für den Erwartungswert und das Intervall selbst Vertrauensbereich für den Erwartungswert; sie sind dem Vertrauensniveau  $(1-\alpha)$  zugeordnet. Das gewählte Vertrauensniveau muss angegeben werden. Die symmetrisch zum Mittelwert liegenden Vertrauensgrenzen für den Erwartungswert  $\mu$  errechnen sich zu

$$\bar{x} + \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s \text{ (obere Vertrauensgrenze),} \quad (9.2-4)$$

$$\bar{x} - \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s \text{ (untere Vertrauensgrenze).} \quad (9.2-5)$$

Der Faktor  $t$  ( $t$ -Verteilung nach Student) hängt von dem gewählten Vertrauensniveau  $(1-\alpha)$  ab. In der Tafel 9.2-1 sind die Zahlenwerte auszugsweise für verschiedene Vertrauensniveaus zusammengestellt.

Anzahl n der Einzel- werte	Werte für $t$ und $t/\sqrt{n}$ (gerundet)					
	Vertrauensniveau $(1-\alpha)$					
	68,3 %		95 %		99 %	
	$t$	$t/\sqrt{n}$	$t$	$t/\sqrt{n}$	$t$	$t/\sqrt{n}$
2	1,84	1,30	12,7	8,98	63,7	45,0
3	1,32	0,76	4,3	2,48	9,9	5,7
4	1,20	0,60	3,2	1,59	5,8	2,9
5	1,15	0,51	2,8	1,24	4,6	2,1
6	1,11	0,45	2,6	1,05	4,0	1,7
8	1,08	0,38	2,4	0,84	3,5	1,2
10	1,06	0,34	2,3	0,71	3,3	1,0
20	1,03	0,23	2,1	0,48	2,9	0,6
200	1,0	0,07	1,97	0,14	2,6	0,2

Tafel 9.2-1: Werte für  $t$  und  $t/\sqrt{n}$  bei verschiedenen Werten der Vertrauensniveaus  $(1-\alpha)$  (Auszug)

Das über jede physikalisch sinnvolle Grenze hinausgehende Anwachsen von  $t$  bei kleiner Anzahl  $n$ , besonders für hohe Vertrauensniveaus, zeigt, dass bei nur 2 Messungen überhaupt keine reale statistische Aussage gemacht werden kann, wenn  $s$  oder  $\sigma$  nicht aus früheren Beobachtungen bekannt sind.

Andererseits lohnt es sich nicht, die Anzahl der Messungen zu hoch zu wählen. Im allgemeinen sollte  $n$  nicht höher als 10 sein, da dann die erzielte Verkleinerung der Vertrauensgrenze in keinem Verhältnis mehr zum Aufwand steht. Es ist besser, durch sorgfältiges Messen und durch Wahl eines zuverlässigen Messverfahrens die Standardabweichung  $s$  zu verringern. Man sollte jedoch, wenn es möglich ist, jeden Messvorgang etwa 4- bis 5mal wiederholen, da man dann die Messunsicherheit mit ausreichender Zuverlässigkeit bei vertretbarem Aufwand erhält.

### 9.2.5 Messunsicherheit $u$

Das Messergebnis aus einer Messreihe ist der um die bekannten systematischen Abweichungen berichtigte Mittelwert  $\bar{x}$ , verbunden mit einem Intervall, in dem der wahre Wert der Messgröße liegt. Als Messunsicherheit wird jeweils das Intervall zwischen dem berichtigten Mittelwert und der oberen bzw. unteren Intervallgrenze bezeichnet. Man beachte; Die gesamte Weite des Intervalls zwischen oberer und unterer Grenze darf nicht Messunsicherheit genannt werden [9-2]!

Die Messunsicherheit  $u$  hat zwei Komponenten:

- die Zufallskomponente  $u_z$  betrifft die zufälligen Abweichungen,
- die systematische Komponente  $u_s$  betrifft die unbekannt systematischen Abweichungen.

Die Gleichung

$$u_z = \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s \quad (9.2-6)$$

gilt für eine Messreihe unter Wiederholbedingungen bei unbekannter Wiederholstandardabweichung  $\alpha_r$ .

Die systematische Komponente  $u_s$  kann im allgemeinen nur anhand ausreichender experimenteller Erfahrung (oder verlässlicher Angaben des Herstellers) abgeschätzt werden.

Zu den Herstellerangaben ist anzumerken:

Alle Messgeräte haben systematische Abweichungen, die durch unvermeidliche Ungleichmäßigkeiten bei der Fertigung von Exemplar zu Exemplar verschieden groß sind. Es wäre viel zu aufwendig, die tatsächliche Abweichung jedes einzelnen Gerätes durch Vergleich mit einem Normal festzustellen. Man begnügt sich damit, Grenzen anzugeben, innerhalb derer die äußersten Abweichungen nach oben und unten vom Sollwert liegen. Die technischen Daten sind bei Geräten hoher Qualität in den Technischen Datenblättern aufgelistet und mit ihren Grenzwerten angegeben. Der Hersteller prüft nur, ob die Abweichungen innerhalb der garantierten Grenzen liegen. Insofern sind die Zahlen keine Absolutwerte.

Die Abweichungen können additive oder multiplikative Größen betreffen, worauf zu achten ist; sie können außerdem verschiedene Vorzeichen besitzen und sich gegenseitig mehr oder weniger ausgleichen. Es empfiehlt sich deshalb, aus den im einzelnen nicht erfassbaren systematischen Abweichungen einen Schätzwert für die systematische Komponente  $u_s$  der Messunsicherheit zu ermitteln. Die geometrische Summe aller Einzelwerte  $a_i$  ist m. E. ein brauchbarer Weg dazu.

$$u_s = \pm \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2} \quad (9.2-7)$$

Die Messunsicherheit  $u$  erhält man durch lineare Addition der beiden Komponenten  $u_z$  und  $u_s$ :

$$u = u_z + u_s \quad (9.2-8)$$

Wenn die beiden Komponenten etwa gleich groß sind, dann kann man  $u$  auch als geometrische Summe ermitteln:

$$u = \sqrt{u_z^2 + u_s^2} \quad (9.2-9)$$

### 9.2.6 Messergebnis

Das Ergebnis  $y$  einer Messung setzt sich zusammen aus:

- dem arithmetischen Mittelwert  $\bar{x}$  einer Messreihe,
- der Korrektur  $K$  für die erfassbaren systematischen Abweichungen,
- der Messunsicherheit  $u$ ,
- der Angabe des gewählten Vertrauensniveaus  $(1-\alpha)$ .

$$y = \bar{x} + K \pm u \text{ für } (1-\alpha) = \dots \%. \quad (9.2-10)$$

#### Anmerkung:

Den Ausführungen des Abschnittes 9 liegt [9-2] zugrunde. Es wurden nur die Passagen berücksichtigt, die für Dehnungsmessungen mit DMS zutreffend erscheinen. Weitergehende Informationen entnehme man dem Normblatt.

## 10 Schrifttum

- [1-1] Hooke, Robert: De potentia restitutiva. London 1678.
- [1-2] Wheatstone, Charles: An Account of several new Instruments and Processes for determining the Constants of a Voltaic Circuit. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1843.
- [1-3] Thomson, William: On the Electro-dynamic Qualities of Metals. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1856.
- [1-4] Tatnall, F. G.: Tatnall on Testing. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, USA, 1966.
- [1-5] USA-Patent Nr. 2 292 549, Titel: Material Testing Apparatus. Anmeldedatum: 23. Februar 1940, Ausgabedatum: 11. August 1942.
- [1-6] Britisches Patent Nr. 728,606, Titel: Electric Resistance Devices. Anmeldedatum: 28. August 1952, Ausgabedatum: 20. April 1955.
- [1-7] Ort, W.: Eine neue Technologie zur Herstellung von Dünnschicht-Dehnungsmeßstreifen für den Aufnehmerbau. Meßtechnische Briefe 13 (1977) H. 1, S. 7/11. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [1-8] Bray, A., und P. Valabrega: The strain sensitivity of Nichrome Films prepared by vacuum deposition. Vortragsmanuskript 2<sup>me</sup> Conference d'Analyse des Contraintes, Paris 1962.
- [1-9] Bray, A., und M. Plassa: The strain sensitivity of Ge and Cr-Si Thin Films deposited under Vacuum. Vortragsmanuskript IMEKO-Konferenz Stockholm 1964.
- [1-10] Watanabe, O., und K. Shioda: Meßtechnische Eigenschaften von Dünnschicht-Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen. Materialprüf. 9 (1967) Nr. 6, S. 223/227.
- [1-11] Schulz, M.: Einsatz kapazitiver Dehnungsmeßstreifen für statische Messungen bei hohen Temperaturen. VDI-Berichte Nr. 313 (1978), S. 317/322. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [1-12] Schulz, M.: Statische Dehnungsmessung bei 500 °C über 10720 Stunden zur Bestimmung von Materialkonstanten. VDI-Berichte Nr. 439 (1982), S. 155/159, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.

- [1-13] Fortmann, M.: Hochtemperatur-Dehnungsmessungen mit dem neuen kapazitiven Meßgeber von Interatom. VDI-Berichte Nr. 514 (1984), S. 45/48, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [1-14] Böhm, W., P. Hofstötter und N. Rasche: Laboruntersuchungen zum Langzeitverhalten kapazitiver Dehnungsmeßstreifen CERL-Planer und Interatom bei Temperaturen bis 550 °C. VDI-Berichte Nr. 552 (1985), S. 97/111. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [1-15] Procter, E.: High temperature creep strain measurements using a capacitance type strain gauge. VDI-Berichte Nr. 514 (1984), S. 101/107.
- [1-16] Tatnall, F. G.: Development of the Scratch Gage. *Experimental Mechanics*, June 1969, Pgs. 27N/34N.
- [1-17] Bertodo, R.: Development of High-temperature Strain Gauges. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 173 (1959) No. 23, Pgs. 605/616. London.
- [1-18] Greger, G.: Zur Herstellung von Siliziumeinkristallen nach dem Czochralsky-Verfahren. *Z. f. angew. Physik* (1961) Nr. 1, S. 47/51.
- [1-19] N. N.: Silicon Semiconductor Strain Gauges. *Zeitschrift Direct Current*, Sept. 1962, S. 235/237.
- [2-1] VDI/VDE-Richtlinie 2635, Blatt 1: Dehnungsmeßstreifen mit metallischem Meßgitter. Kenngrößen und Prüfbedingungen. August 1974, Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin und Köln.
- [2-2] Wolfstieg, U.: Stand und Möglichkeit der röntgenographischen Spannungsanalyse. VDI-Berichte Nr. 313, 1978, S. 217/226. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [2-3] Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 2. 7. 1969. Bundesgesetzblatt, Teil I (1969) Nr. 55, S. 709/712.
- [2-4] Ausführungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 26. 6. 1970. Bundesgesetzblatt Teil I (1970) Nr. 62, S. 981/991.
- [2-5] Winter, F. W.: Die neuen Einheiten im Meßwesen. 2. Aufl. (1974). Girardet-Taschenbuch Nr. 10, Essen.
- [2-6] Peiter, A.: Eigenspannungen I. Art, Ermittlung und Bewertung. Michael-Triltsch-Verlag, Düsseldorf, 1966.
- [2-7] Rappe, H.-A.: Messung von Schweißeigenspannungen mit Dehnungsmeßstreifen. *Meßtechnische Briefe* 9 (1973) H. 2, S. 31/37. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [2-8] DIN 50 125: Prüfen metallischer Werkstoffe. Zugproben. Richtlinien für die Herstellung. (März 1986). Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin 30.

- [3-1] Hoffmann, K.: Über die Ermittlung von Kenngrößen metallischer Dehnungsmeßstreifen (DMS). ATM. Archiv für technisches Messen V 1372-3 (Februar 1976), S. 65/68.
- [3-2] Müller, R. K.: Der Einfluß der Meßlänge auf die Ergebnisse bei Dehnungsmessungen an Beton. „Beton“ 14 (1964) H. 5, S. 205/208. Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf-Oberkassel.  
Nachdruck in Meßtechnische Briefe 2 (1966) H. 3, S. 37/41. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [3-3] Stein, P. K.: Measurement Engineering, Vol. II, 2nd Edition, Chapter 21: Gage length effects. Stein Engineering Services, Inc., Phoenix AZ, USA.
- [3-4] Hirt, M.: Dehnungsmessungen am Zahnfuß von geradverzahnten Stahl-Stirnrädern. Meßtechnische Briefe 10 (1974) H. 2, S. 33/38. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [3-5] Wolf, H., und W. Böhm: Das Ringkern-Verfahren zur Messung von Eigenspannungen und seine Anwendung bei Turbinen und Generatorwellen. Arch. f. d. Eisenhüttenwesen, 42. Jg. H 3 (März 1971) S. 195/200. Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf.
- [3-6] Birkenfeld, W.: Messung von Eigenspannungen mittels Dehnungsmeßstreifen. Meßtechnische Briefe 4 (1968) H. 3, S. 37/42, Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [3-7] Keil, St.: Zur Eigenspannungsermittlung mit DMS-Bohrlochrosetten. Meßtechnische Briefe 11 (1975) H. 3, S. 53/58. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [3-8] Amberg, C., und N. Czaika: Über das langzeitige Drift- und Kriechverhalten gekapselter, aufschweißbarer Dehnungsmeßstreifen mit NiCr-Meßdraht bei Temperaturen bis 320 °C. VDI-Berichte Nr. 399 (1981), S. 105/111. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [3-9] Böhm, W., und N. Rasche: Bestimmung von DMS-Eigenschaften bei höheren Temperaturen mit einer rechnergesteuerten Prüfungseinrichtung. VDI-Berichte Nr. 366 (1980), S. 51/53. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [3-10] Böhm, W.: Hinweise zur Anwendung des 2fachen Aufschießens von EATON-Hochtemperatur Dehnungsmeßstreifen zur Voruntersuchung von DMS-Eigenschaften. VDI-Berichte Nr. 480 (1983), S. 167/169, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [3-11] Gentsch, A.: Probleme der Bestimmung statischer Beanspruchung mit Hilfe der Dehnungsmeßtechnik bei hohen Temperaturen. Maschinentechnik 12 (1963), H. 9, S. 474/480. VEB-Verlag Technik, Berlin (Ost)

- [3-12] Wolf, H., und H.-D. Schlichting: Zur Messung statischer Beanspruchungen großer Bauteile bei hohen Temperaturen mit Dehnungsmeßstreifen. ATM Blatt V 132-23 (12.1967). Verlag R. Oldenbourg, München.
- [3-13] Ludewig, H.: Schwingungsmessungen an Turbinenschaufeln von Abgasturboladern mit Hochtemperatur-Dehnungsmeßstreifen. Meßtechnische Briefe H. 1/1969, S. 8/11. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [3-14] Amberg, C., und N. Czaika: Zur Vorherbestimmung und Reproduzierbarkeit des Nullpunkttemperaturganges aufschweißbarer DMS bis 320 bzw. 600 °C. VDI-Berichte Nr. 480, 1983, S. 145/150. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [3-15] Felgner, K., und K. Hoffmann: Das Verhalten von induktiven Wegaufnehmern und von DMS bei tiefen Temperaturen (-196 °C). Meßtechnische Briefe 3 (1965), S. 2/4. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [3-16] Rohrbach, Chr., und E. Knublauch: Dehnungsmessungen mit Meßstreifen bei hohen Temperaturen. Materialprüfung 10 (1968) Nr. 4, S. 105/115.
- [3-17] Böhm, W., P. Hofstötter, N. Rasche und J. Weichsel: Praktischer Einsatz gekapselter Hochtemperatur-Dehnungsmeßstreifen bis 315 °C. VGB Kraftwerkstechnik 61 (1981) Heft 6, S. 502/509.
- [3-18] Hofstötter, P., und J. Weichsel: Einsatz einer Klemmvorrichtung zur Kalibrierung von Hochtemperatur-Dehnungsmeßstreifen. Technische Überwachung 21 (1980) Nr. 4, S. 147/150. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [3-19] Hofstötter, P.: Calibration of High-temperature Strain Gauges with the Aid of a Clamping Device. Experimental Mechanics Vol. 22 (1982) Pgs. 223/225.
- [3-20] Anderko, K., D. Keilbach und E. Wacker: Wärmespannungsmessungen an einem Aluminium-Kolben für einen mittelgroßen Dieselmotor mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen. MTZ Motortechnische Zeitschrift 28 (1967). Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart.
- [3-21] Fukamichi, K., Kimura, H. M., Masumoto, T. and Gambino, R. J.: Strain Gauge Characteristics of Ni-Base Amorphous Alloys. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag.-16, Nr. 5 (1980) Pgs. 907/909.
- [3-22] Tsen-tai Wu, Liang-cheng Ma, and Lin-bao Zhao: Development of Temperature-compensated Resistance Strain Gages for Use to 700 °C. Experimental Mechanics (1981) Pgs. 117/123.

- [3-23] Andrae, G., und G. Niessen: Über die Ursache des Driftens von Hochtemperatur-Dehnungsmeßstreifen, insbesondere solcher mit PtW-Leiter. *Materialprüfung* 24 (1982) Nr. 12, S. 431/436.
- [3-24] Dorsey, J.: *Semiconductor Strain Gage Handbook*. Firmendruckschrift BLH-Electronics, Inc. Waltham MA, USA.
- [3-25] Hoffmann, K.: Der Temperaturgang von Dehnungsmeßstreifen und die Beseitigung seines Anteils an Meßergebnissen. *TZ f. prakt. Metallbearbeitung* 56. Jg. (1962) H. 11, S. 639/644, Techn. Verlag G. Grossmann GmbH, Stuttgart-Vaihingen.
- [3-26] Hoffmann, K.: Ursachen temperaturabhängiger Nullpunkts- und Empfindlichkeitsänderungen bei Dehnungsmeßstreifen-Aufnehmern. *VDI-Berichte* Nr. 137 (1970) S. 23/27. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [3-27] Stein, P. K.: *Measurement engineering, Vol. II, 2nd Edition, Chapter 22: Effect of Temperature*. Stein Engineering Services, Inc., Phoenix AZ, USA.
- [3-28] Andrae, G.: Über das Verhalten von Dehnungsmeßstreifen bei großen Dehnungen. *Materialprüfung* 13 (1971) Nr. 4, S. 117/123.
- [3-29] Hoffmann, K.: Zum Linearitätsfehler bei Dehnungsmessungen mit Dehnungsmeßstreifen im Hochdehnungsbereich. *Meßtechnische Briefe* 12 (1976) H. 3, S. 53/57. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [3-30] Kern, W. F.: Über Verformungsmessungen an Kraftfahrzeugreifen mittels spezieller Dehnungsgeber. *ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift*, Jg. 63, H. 2 (1961), S. 33/41, Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart.
- [3-31] Oi, K.: *Transient Response of Bonded Strain Gages*. *Experimental Mechanics*, Sept. 1966, Pgs. 463/469.
- [3-32] Bagaria, W. J., and W. M. Sharpe jr.: *Temperature and Rise-Time Effects on Dynamic Strain Measurements*. Paper No. 2309 A of the 1974 SESA Spring Meeting, Detroit/Mich., published in *International Aerospace Abstracts, Technical Information Service, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., New York*
- [3-33] Rohrbach, Chr., und N. Czaika: Über das Dauerschwingverhalten von Dehnungsmeßstreifen, *Materialprüfung* 3 (1961) Nr. 4, S. 125/136.
- [3-34] Müller, R. K.: *Ein Beitrag zur Dehnungsmessung an Kunstharzmodellen*. Habilitationsschrift Stuttgart 1964.
- [3-35] Rohrbach, Chr., und N. Czaika: Deutung des Mechanismus des Dehnungsmeßstreifens und seiner wichtigsten Eigenschaften an Hand eines Modells. *Materialprüfung* 1 (1959) Nr. 4, S. 121/131. Hrsg. Deutscher Verband f. Materialprüfung (DVM), Düsseldorf.

- [3-36] Andraea, G.: Zur Genauigkeit von Dehnungsmeßstreifen. *Materialprüfung* 12 (1970) Nr. 3, S. 87/92.
- [3-37] Andraea, G.: Über den Einfluß hydrostatischen Drucks auf Dehnungsmeßstreifen. *Materialprüfung* 16 (1974) Nr. 4, S. 98/102.
- [3-38] Hoffmann, K., D. Jost und St. Keil: Experimentelle Untersuchung des Einflusses hydrostatischen Drucks auf Dehnungsmeßstreifen-Applikationen und die Ermittlung von Korrekturwerten. *VDI-Berichte* Nr. 313 (1978), S. 553/558. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [3-39] N.N.: DMS messen den Impuls bei der weichen Landung von Surveyor I auf dem Mond. *Meßtechnische Briefe*, H. 1 (1967), S. 19. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [3-40] Caris, R. F.: Strain Gages in Hard Vacuum. *Proceedings of Western Regional Strain Gage Committee, Spring Meeting 1968*, Pgs. 29/35.
- [3-41] Telinde, J.: Strain Gages in Cryogenics and Hard Vacuum. *Proceedings of Western Regional Strain Gage Committee, Spring Meeting 1968*, Pgs. 45/54.
- [3-42] Krevitt, R.: A Compilation of Literature on Radiation Effects. *Proceedings of Western Regional Strain Gage Committee, Fall Meeting 1967*, Pgs. 65/68.
- [3-43] Gunn, J.: Investigation of Strain Gages in Strong Magnetic Fields. *Proceedings of Western Regional Strain Gage Committee, Fall Meeting 1966*, Pgs. 37/40.
- [3-44] Armand, G., und J. Lapujoulade: Mesures des Contraintes par jauges a fil resistant en presence de champ magnetique. *Analyse des Contraintes*, Vol. IV (1961) Nos. 1 et 2.
- [3-45] Vigness, J.: Magnetostrictive Effects in Wire Strain Gages. *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis*, Vol. XIV (1957) No. 2.
- [3-46] Strauss, H. E.: Method for Measuring of Magnetostriction Corrected for Initial Domain Distribution and Its Application to Nickel and Iron. *J. Appl. Phys.*, Vol. 29 (1958) No. 2.
- [3-47] Takahi, H., and T. Tsuji: A Note on the Magnetoresistance Effect of Strain Gage Wire. *J. Phys. Soc. Japan*, Vol. 13 (1958), S. 1406.
- [3-48] Stein, P. K.: Representative Magnetic Field Strengths. *Strain Gage Readings* 1 (1958) No. 4, S. 24. Verlag Stein Engineering Services, Phoenix, AZ., USA.
- [3-49] Bickle, L. W.: The Response of Strain Gages to Longitudinally Sweeping Strain Pulses. *Experimental Mechanics*, August 1970, S. 333/337.

- [3-50] Andreae, G., und G. Niessen: Über Möglichkeiten und Grenzen der Hochtemperatur-Dehnungsmeßstreifen mit Platin-Wolfram-Leiter. Teil I: Zur Ursache des Driftens und zum Kriechverhalten. Materialprüf. 27 (1985) Nr. 11, S. 344/346.  
Teil II: Zur Linearität. Materialprüf. 27 (1985) Nr. 12, S. 381/383.
- [3-51] Hoffmann, K.: Zur Herstellung moderner Folien-Dehnungsmeßstreifen und den dabei gegebenen Korrekturmöglichkeiten für Kriechen und Querempfindlichkeit. Meßtechnische Briefe 22 (1986) Heft 2, S. 41/46. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [3-52] Glücklich, D.: Die Versteifung von Kunststoffmodellen durch elektrische Dehnungsmeßstreifen. Berichte des Instituts für Modellstatik der Universität Stuttgart, H. 4, 1975.
- [4-1] Hoffmann, K.: Hinweise zum Applizieren von Dehnungsmeßstreifen. Broschüre VD 84005 der Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [4-2] Michel, M.: Adhäsion und Klebetechnik. Carl Hanser Verlag, München (1969).
- [4-3] Mittrop, F.: Das Kleben als Befestigungsverfahren für Dehnungsmeßstreifen. In „Haus der Technik e.V. Essen Vortragsveröffentlichungen“ Heft 31 (1965), S. 15/27.
- [4-4] N.N.: A Megohmmeter Circuit for SR-4 Strain Indicators. BLH Measurement Topics Vol. 4, No. 2, June 1966, Pg. 6.
- [5-1] Kreuzer, M.: Linearitäts- und Empfindlichkeitsfehler beim Messen mit Einzeldehnungsmeßstreifen bei spannungsgespeisten und stromgespeisten Schaltungen. Meßtechnische Briefe 19 (1983) Heft 2, S. 37/42. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [5-2] Kreuzer, M.: Vergleichende Betrachtung verschiedener Schaltungsarten für das Messen mit Dehnungsmeßstreifen. Meßtechnische Briefe 19 (1983) Heft 3, S. 63/68. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [5-3] Kreuzer, M.: Messungen mit Dehnungsmeßstreifen ohne schaltungstechnischen Nullabgleich. VDI-Berichte Nr. 509 (1984), S. 159/162.
- [5-4] Kreuzer, M.: Praktische Bedeutung der effektiven Dehnung für die Schaltungstechnik von Dehnungsmeßgeräten. VDI-Berichte Nr. 514 (1984), S. 121/127.

- [5-5] Heringhaus, E.: Trägerfrequenz- und Gleichspannungs-Meßverstärker für das Messen mechanischer Größen – ein Systemvergleich aus anwendungstechnischer Sicht.  
Teil 1: Arbeitsweisen und Vergleich charakteristischer Eigenschaften. Meßtechnische Briefe 18 (1982) H. 2, S. 42/49.  
Teil 2: Verhalten gegenüber externen Störeinflüssen und praktische Auswahlhilfen. Meßtechnische Briefe 18 (1982) H. 3, S. 70/73. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [6-1] VDI/VDE-Richtlinie 2600, Blatt 3: Metrologie (Meßtechnik), Gerätetechnische Begriffe (November 1973) Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin und Köln.
- [7-1] Kreuzer, M.: Eine Vielstellenmeßanlage mit FET-Schaltern. Meßtechnische Briefe 12 (1976) S. 4/9 und S. 35-41. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [7-2] Kreuzer, M.: Elektrische Vielstellen-Meßeinrichtung; Patentschrift DE 3238 482 (1983).
- [7-3] Meyer, M. L.: On the measurement of transverse sensitivity of strain gages. Strain, Vol. 9 (1973) No. 1, Pgs. 26/28, London.
- [7-4] Baumberger, R., und F. Hines: Practical Reduction Formulas for Use on Bonded Wire Strain Gages in Two-Dimensional Stress Fields. Experimental Stress Analysis, Vol. II No. 1 (1944), Pgs. 113/127.
- [7-5] Measurements Group: Errors due to Transverse Sensitivity in Strain Gages. Experimental Techniques 1983 No. 1, Pgs. 30/35.
- [8-1] Keil, St.: Analyse ebener Spannungszustände mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen.  
Teil 1: Meßtechnische Briefe 8 (1972), H. 1, S. 1/4,  
Teil 2: Meßtechnische Briefe 8 (1972), H. 2, S. 21/26. Dort weitere Literaturhinweise. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [8-2] Müller, R. K.: Modellstatische Untersuchungen von Schalentragwerken. Berichte des Instituts für Modellstatik der Universität Stuttgart, Heft Nr. 2, 1973.
- [8-3] Technisches Datenblatt D 24.32.0, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [8-4] Spangenberg, D.: Grundlagen und Anwendung des Reißlackverfahrens zur Spannungsanalyse. Techn. Überwachung 12 (1971) Nr. 3, S. 80/84.
- [8-5] Lindorf, H.: Technische Temperaturmessungen. Verlag W. Girardet, Essen. 3. Aufl. 1968.

- [8–6] Winter, F. W.: Technische Wärmelehre. Verlag W. Girardet, Essen. 7. Aufl. 1970.
- [8–7] Maute, D., und U. Stöckle: Kraft- und Drehmomentmessungen am Antriebssystem eines Wehrsegments der Staustufe Iffezheim. Meßtechnische Briefe 19 (1983) H. 1, S. 1/6. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [8–8] Grünbaum, P.: Drehmomentmessungen an Nockenwellen von Dieselmotoren. Meßtechnische Briefe 21 (1985) H. 2, S. 39/46. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [8–9] Kranz, E.: Gewichtsbestimmungen von 5-MVA- bis 100-MVA-Transformatoren mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen an einem 120-t-Brückenkran. Meßtechnische Briefe 18 (1982) H. 1, S. 7/10. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [8–10] Haas, E.: Ermittlung von Wärmespannungen mit Dehnungsmeßstreifen an Epoxydharz-Modellen. Heft Nr. 6, 1977, Berichte des Instituts für Modellstatik der Universität Stuttgart.
- [9–1] Hellwig, R.: Präzisions-Kraftaufnehmer für internationale Vergleichsmessungen an Kraftnormalmeßeinrichtungen. Meßtechnische Briefe 22 (1986) H. 2, S. 47/52. Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [9–2] DIN 1319: Grundbegriffe der Meßtechnik. Blatt 3: Begriffe für die Meßunsicherheit und für die Beurteilung von Meßgeräten und Meßeinrichtungen. Ausgabe August 1983: Beuth-Verlag GmbH, Berlin 30.

Weitere empfehlenswerte Bücher, die im Text nicht angezogen sind:

Bergmann, K.: Elektrische Meßtechnik: elektr. u. elektron. Verfahren, Anlagen u. Systeme. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1981. ISBN 3-528-04080-7.

Hederer, A., u.a.: Dynamisches Messen: (Messen von schnellveränderl. elektr. u. nichtelektr. Größen). Grafenau 1/Württ.: Lexika-Verlag, 1978. Kontakt + Studium; Bd. 32. ISBN 3-88146-192-2.

Müller, R. K.: Handbuch der Modelltechnik. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1971. ISBN 3-540-05217-8, Springer Verlag New York, Heidelberg, Berlin. ISBN 0-387-05217-8.

Müller, R. K., u.a.: Mechanische Größen elektrisch gemessen: (Grundlagen u. Beispiele zur techn. Ausführung) / 2. überarbeitete u. erweiterte Auflage. Grafenau/Württ.: Lexika-Verlag, 1984. Kontakt + Studium, Bd. 45. ISBN 3-88508-933-5.

Profos, P (Hrsg.): Handbuch der industriellen Meßtechnik: (Meßtheorie, Meßverfahren, Meßwertverarbeitung, Sensortechnik, Gerätetechnik ganzer Meßeinrichtungen). Essen, Vulkan-Verlag. 4. Neubearb. Aufl. erscheint demnächst.

Rohrbach, Chr.: Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen. VDI-Verlag, Düsseldorf 1967.

Referatororgan „Elektrisches Messen mechanischer Größen“. Darin werden fachliche Informationen aus Zeitschriften, Büchern und Patentschriften des In- und Auslandes referiert. Das Referatororgan und Kopien der referierten Aufsätze sind zu beziehen von der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Fachgruppe Meßwesen und Regeltechnik, Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45.

## 11 Stichwortverzeichnis

- Abdeckmittel 138, 140
- Anschlussmittel 132 ff
- Anschweißbare DMS 56, 57
- Anwendungsbereiche 7, 41
- Applikation 123 ff
- Applikations-Hilfsmittel 128 ff
- Applikationsmittel 95, 101, 105, 123
- Arithmetischer Mittelwert 45, 272
- Aufgedampfte DMS 9
- Ausgasungsrate 112
- Auswahlkriterien für DMS 39
  
- Bauformen der DMS 6, 42
- Beanspruchungsarten 37
- Befestigungsmittel 95, 101, 105, 123
- Belastbarkeit, elektrische 91
- Biegebeanspruchung 240, 243
- Biomechanik 7, 41
- Bohrlochverfahren 54, 233
- Brückenergänzungswiderstand 149
- Brückenschaltung 145
- Brückenspeisung 145, 152
- Brückenverstimmung 147
  
- Dauerschwingverhalten 81 ff
- Dehnbarkeit des DMS, statische 78
- Dehnbarkeit des DMS, dynamische 81
- Dehnung 19
- Dehnungsaufnehmer DD1 98
- Dehnungsempfindlichkeit der Halbleiter-DMS 62
- Dehnungsempfindlichkeit metallischer DMS, k-Faktor 61
- Diagonal- oder Zweiviertelbrückenschaltung 150, 180
- Dreileiterschaltung 176, 187, 202
- Draht-DMS 6
- Dreiachsiger Spannungszustand 28
- Drift 76
- Druckeinfluss, hydrostatischer 104
- Druckstab 237

- Dünnfilm-DMS 9
- Durchgangswiderstand 135
- Dynamische Dehnungen 48, 81 ff
- Dynamische Messungen 38, 81 ff
  
- Ebener Spannungszustand 28
- Eigenspannungen 28
- Eigenspannungsmessungen 52, 233
- Einachsiger Spannungszustand 28, 217
- Eisler, Paul 7
- Elastizitätsmodul 29
- Elektrische Belastbarkeit 91
- Elektrische Felder 133
- Elektrischer Widerstand 58
- Energiereiche Strahlung 113
- Ergänzungswiderstand 149
  
- Fehlerkorrektur 192
- Feuchtigkeitseinfluss 103
- Flussmittel 130
- Folien-DMS 7
- Freigitter-DMS 56
  
- Gauß-Verteilung 270
- Gleichspannungsspeisung 152
- Gleitmodul 33
- Grenzfrequenz 85
  
- Halbbrückenschaltung 149, 181, 190, 202
- Halbleiter-DMS 8
- Hauptnormalspannungen 222, 224, 226, 229
- Hauptrichtungen 206, 219, 221, 226, 229
- HBM-Brückenschaltung 193
- Hochdehnungs-DMS 79
- Hochtemperatur-DMS 56, 57
- Homogenes Dehnungsfeld 43
- Hooke, Robert 1
- Hooke'sches Gesetz 1, 217 ff
- Huggenberger, Tensometer 2
- Hydrostatischer Druck 104
- Hysterese 99, 105
  
- Inhomogenes Dehnungsfeld 45, 174
- Inspektion, visuelle 135

Ionisierende Strahlung 113  
Isolationswiderstand 103, 136, 138

Kabelkapazität 197 ff  
Kabelwiderstand 183 ff  
Kalibrieren 155 ff  
Kalibriergerät 165  
Kalibriersignal 160, 161  
Kapazitive DMS 10, 60  
Kapazitive Unsymmetrie 199  
Karma 62  
Kelvin, Lord 2  
Kenngrößen der DMS 41, 60 ff  
Kerbspannungen 46  
Ketten-DMS 42, 48  
k-Faktor 61, 168  
k-Faktor, Temperaturabhängigkeit 77  
Klebstoffe für DMS 94, 101, 105, 123  
Konstantan 62  
Kombinierte Lastfälle 243, 258  
Kompensations-DMS 178, 188, 202  
Korrektur der Querempfindlichkeit 204 ff  
Kreuzer-Schaltung 193  
Kriechen 92

Lagerung der DMS 121  
Längenausdehnung, thermische 35, 71  
Längsdehnung 219  
Lastfälle, elementare und kombinierte 236 ff  
Leitungsmaterial 133  
Leitungswiderstand 183 ff  
Lote und Flussmittel 130  
Lötgerät 129  
Lötmittel 129 ff  
Lötstützpunkte 132  
Linear-DMS 42, 206

Magnetische Felder 118, 133  
Maßeinheiten 21, 23, 27, 31, 33  
Mechanische Dehnungsmesser 1  
Mechanische DMS 12  
Mechanische Spannung 1, 23  
Mechanische Hysterese 99, 105  
Mehrfach-DMS 48

- Messeinrichtung 17, 155
- Messergebnis 276
- Messfehler-Vermeidung 171 ff
- Messgenauigkeit 267
- Messgitterlänge 43, 45, 86
- Messgrößenaufnehmerbau 8, 9, 42
- Messkabel 133
- Messkette 17, 155
- Messstellenschutz 138
- Messunsicherheit 274
- Messverstärker 152, 157
- Metallische DMS 2
- Mittelwert, arithmetischer 45, 272
- Modellmesstechnik 29, 41
- Mohr'scher Spannungskreis 229
  
- Nebenschluss-Kalibrierung 162
- Nichrome V 62
- Nicht-nullpunktbezogene Messungen 38
- Normalkraft 237, 243, 258
- Normalspannung 23, 28
- Nullpunktbezogene Messungen 37, 103
  
- Phasendrehung 203
- Piezoelektrische-DMS 11
- Platin-Wolfram 62
- Poisson, Siméon Denis 34
- Poissonzahl 33
- Prüfmittel 135
  
- Quasistatische Messungen 38
- Querdehnung 204
- Querempfindlichkeit der DMS 64
- Querempfindlichkeit, Korrektur 204 ff
- Querszahl 34
  
- Räumlicher Spannungszustand 28
- Reinigungsmittel 128
- Ringkernverfahren 53
- Rosetten-DMS 42, 48, 51, 212 ff
- R-Rosetten 42, 48, 51, 214, 225 ff
- Rotierende Wellen, Signalübertragung 254
- Ruge, Arthur Claude 3
- Scheinbare Dehnung → Temperaturgang

Scherbeanspruchung 260  
Scherspannung 25  
Schubmodul 33  
Schubspannung 25, 229  
Schwingfestigkeit d. DMS → dynamische Dehnungen  
Sechsheiterschaltung 167, 196  
Selbst-temperaturgangkompens. DMS 70, 173  
Shunt-Kalibrierung 162  
Simmons, Edward E. 3  
Smith, C. S. 8  
Spannungsanalyse 1, 41  
Spannungsgradienten 48  
Spannungsoptische DMS 11  
Spannungszustände 28  
Speisespannung 145, 146, 152  
Standardabweichung, empirische 272  
Statische Messungen 37, 78  
Stoßvorgänge 85 ff  
Strahlung, energiereiche (ionisierende) 113

Tatnall, Francis G. 6  
Technische Daten 60 ff  
Temperaturabhängigkeit d. k-Faktors 77  
Temperaturbereich, nutzbarer 59, 134  
Temperatureinfluss 59, 103  
Temperaturgang 68, 173  
Temperaturgangkompensation 173 ff  
Temperaturgangkompensierende DMS 70  
Tensometer nach Huggenberger 2  
Thermische Drift 76  
Thermische Längenausdehnung 35, 71  
Thermospannungen 152  
Thomson, William 2  
Torsion 248 ff  
Trägerfrequenzspeisung 153

- Umwelteinflüsse 102 ff
- 
- Vakuum-Einfluss 110  
Variationskoeffizient 272  
Vermeidung von Messfehlern 171 ff  
Versuchs-Voraussetzungen 269  
Vertrauensgrenzen 273  
Viertelbrückenschaltung 149, 174, 184, 188, 202  
Visuelle Inspektion 135  
Vollbrückenschaltung 150, 182, 190, 200  
Wärmeausdehnungskoeffizienten 36, 71  
Wärmespannungen 28, 263  
Wechselspannungsspeisung 153  
Werkstoffkennwerte 29  
Wheatstone, Sir Charles 145  
Wheatstone'sche Brückenschaltung 145  
Widerstand, elektrischer d. DMS 58  
Wirkungsprinzip d. Halbleiter-DMS 15  
Wirkungsprinzip metallischer DMS 13
- X-Rosetten 42, 51, 212, 224
- Zugstab 237  
Zweiachsiger Spannungszustand 28, 51, 221 ff  
Zweiviertel- oder Diagonalbrückenschaltung 150, 180, 189, 202

## Tafeln

- T 2.3–1: Elastizitätsmoduli 32
- T 2.3–2: Elastische Querszahlen 35
- T 2.3–3: Mittlere thermische Längenausdehnungskoeffizienten 36
- T 3.0–1: Schema zur Analyse der Bedingungen, denen eine Messstelle genügen muss 40
- T 3.3–1: Mittlere k-Faktoren von DMS mit verschiedenen Messgitterwerkstoffen 62
- T 3.4–1: Die auf Druckempfindlichkeit untersuchten DMS/Klebstoff-Kombinationen 108
- T 3.4–2: Der Einfluss hydrostatischen Drucks auf die untersuchten DMS-Applikationen ... 109
- T 3.4–3: Ausgasungsrate verschiedener Werkstoffe in Vakuum 112
- T 3.4–4: Kritische Strahlungs-dosis für einige Kunststoffe 117
- T 3.4–5: Beständigkeit der Bestandteile einer DMS-Messstelle gegen Gammastrahlung 118
- T 3.4–6: Nullpunktverschiebung von DMS im statischen Magnetfeld 120
- T 3.4–7: Flussdichte (Intensität) magnetischer Felder 121
- T 4.2–1: Gebräuchliche Lösemittel zur Reinigung und Entfettung von DMS-Klebestellen 128
- T 4.2–2: Weichlote 131
- T 4.2–3: Die wichtigsten Kabel-(Leitungs-) Isolierstoffe und einige ihrer technischen Daten 134
- T 7.0–1: Mögliche Fehlerquellen und Störeinflüsse auf eine DMS-Messstelle ... 172
- T 8.4–1: Am Zug-/Druckstab anwendbarer Schaltungen ... 238
- T 8.4–2: Am Biegestab mit spiegelsymmetrischem Querschnitt anwendbare Schaltungen ... 241
- T 8.4–3: Äquatoriale- (Biege-)Widerstandsmomente für einige häufig vorkommende Querschnittsformen 243
- T 9.2–1: Werte für  $t$  und  $t/\sqrt{n}$  bei verschiedenen Werten der Vertrauensniveaus  $(1-\alpha)$  274