

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 ( <i>k</i> -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 geliefertem 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	Zweiviertel- 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
8	<b>Das Hooke'sche Gesetz zur Ermittlung von Werkstoff- spannungen aus Dehnungsmessungen</b>	216
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