

Karl Hoffmann

Eine Einführung in die Technik des

Messens mit Dehnungsmessstreifen

Inhalt	Seite
1	Einleitung 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	In der DMS-Technik gebräuchliche Begriffe und Maßeinheiten 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	Der Dehnungsmessstreifen, Auswahlkriterien 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	Applikationsmittel für Dehnungsmessstreifen	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	Die Wheatstone'sche Brückenschaltung	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	Das Kalibrieren einer Messeinrichtung	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	Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Messfehlern	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	Das Hooke'sche Gesetz zur Ermittlung von Werkstoff- spannungen aus Dehnungsmessungen	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	Betrachtungen zur Messgenauigkeit	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 ν	271
9.2.4	Vertrauensgrenze und Vertrauensbereich für den Erwartungswert μ	272
9.2.5	Messunsicherheit u	275
10	Schrifttum	276
11	Stichwortverzeichnis	288
	Verzeichnis der Tafeln	292