
Stefan Keil

Dehnungsmessstreifen

2., neu bearbeitete Auflage

 Springer Vieweg

Inhaltsverzeichnis

1	Historische Rückschau	1
2	Grundlagen der Dehnungsmessstreifen-Technologie	13
2.1	Messprinzip und Aufbau	13
2.1.1	Grundlagen	13
2.1.2	Trägerwerkstoff	26
2.1.3	Messgitterwerkstoff	28
2.2	Empfindlichkeit	31
2.3	Querempfindlichkeit	38
2.4	Temperatureinfluss	45
2.4.1	Temperatureinfluss auf die Empfindlichkeit	45
2.4.2	Temperaturgang	46
2.5	Mechanik des Dehnungsmessstreifens	52
2.5.1	Dehnungsübertragung vom Messobjekt auf das Messgitter	52
2.5.2	Kriechen des Dehnungsmessstreifens	54
2.5.3	Hysterese	63
2.6	Druckeinfluss	66
2.6.1	Hydrostatischer Überdruck	66
2.6.2	Verhalten im Vakuum	72
2.7	Dynamische Eigenschaften	73
2.7.1	Erste Problemlösungen mit Graphitstreifen	73
2.7.2	Dauerschwingbeanspruchung	75
2.7.3	Stoßartige Belastung	80
2.7.4	Ermüdungsmessstreifen	82
2.8	Elektrische Belastbarkeit	85
2.9	Messen bei hohen Temperaturen	88
2.9.1	Vorbetrachtungen	88
2.9.2	Anschweißbare Röhrenstreifen	92
2.9.3	Freigitter-Dehnungsmessstreifen	94
2.10	Spannungsmessstreifen	95

3	DMS-Installation	101
3.1	Vorbereitende Arbeiten	101
3.1.1	Allgemeine Vorbereitung	101
3.1.2	Vorbereitung des Dehnungsmessstreifens	102
3.1.3	Vorbereitung der Messstelle	103
3.2	Klebevorgang und Befestigungsmittel	105
3.2.1	Gestellte Anforderungen	105
3.2.2	Cyanoacrylate	107
3.2.3	Methylacrylat	108
3.2.4	Epoxidharz-Klebstoffe	111
3.2.5	Phenolharz-Klebstoffe	113
3.2.6	Keramischer Kitt	113
3.2.7	Flammspritzen	115
3.2.8	Punktschweißen	117
3.3	Bemerkungen zu einigen Messobjektwerkstoffen	118
3.3.1	Glas, Emaille, glasiertes Porzellan	118
3.3.2	Beton	118
3.3.3	Holz	122
3.3.4	Kunststoffe	124
3.4	Messstellenschutz	129
3.5	Messstellentests während und nach der Installation	136
4	Wheatstonesche Brückenschaltung	141
4.1	Prinzip der Schaltung	141
4.2	Grundgleichung der Brückenschaltung	142
4.3	Temperaturkompensation	147
4.4	Auflösungsgrenze eines Brückensignals	150
4.5	Beispiele für einige elementare Brückenschaltungen	151
5	Kompensations- und Abgleichschaltungen	159
5.1	Allgemeines	159
5.2	Kompensation des Temperaturgangs des Nullsignals und Nullabgleich	162
5.3	Kompensation der Temperatureinflüsse auf die Empfindlichkeit und Linearisierungsmaßnahmen	168
5.4	Abgleich des Kennwerts	175
5.5	Kriechkompensation	176
5.6	Parallelschalten von Vollbrücken	177
6	Kabel zwischen DMS-Brückenschaltung und Messgerät	181
6.1	Grundlagen	181
6.2	Ohmscher Kabelwiderstand	182
6.2.1	Vorbemerkung	182

6.2.2	Ohmscher Kabelwiderstand bei Vollbrückenschaltungen	182
6.2.3	Ohmscher Kabelwiderstand bei Halb- und Viertelbrückenschaltungen	184
6.3	Einfluss der Kabelkapazität	186
6.3.1	Vorbemerkung	186
6.3.2	Kapazitive Asymmetrie	187
6.3.3	Phasenverschiebung	188
6.3.4	Amplitudenabfall	191
6.4	Vollbrückenanschluss in Vierleitertechnik	193
6.5	Sechsheiterschaltung	196
6.6	Zweikanalprinzip	197
6.7	Anschluss von Halb- und Viertelbrücken	201
6.8	Schutz gegen Störeinflüsse	205
6.8.1	Schutz gegen elektrische und magnetische Felder	205
6.8.2	Elektromagnetische Verträglichkeit	207
6.8.3	Schutz gegen Überspannungen	209
7	Gerätetechnik	213
7.1	Einführung	213
7.2	Analoge Messverstärker	215
7.2.1	Struktur der analogen Signalverarbeitung	215
7.2.2	Brückenspeisung mit Trägerfrequenz	217
7.2.3	Brückenspeisung mit Gleichspannung	222
7.3	Digitale Verstärkerkonzeptionen	225
7.3.1	Rechnersteuerbare Analogverstärker	225
7.3.2	Schnelles und hochauflösendes Umsetzverfahren als Basis für die digitale Messverstärkertechnik	226
7.3.3	Struktur digitaler Messverstärker	228
7.4	Kompensatoren	231
7.5	Vielstellenmesstechnik	235
7.5.1	Vorbemerkungen	235
7.5.2	Serielle Vielstellenmesstechnik	235
7.5.3	Parallele Vielstellenmesstechnik	239
8	Kalibrieren von Messeinrichtungen zum Messen mit Dehnungsmessstreifen	243
8.1	Einleitung	243
8.2	Messkette	244
8.3	Kennlinie und Empfindlichkeit	245
8.4	Kalibrieren der gesamten Messkette als Messeinrichtung	248
8.5	Kompensatoren	249
8.6	Messgrößenaufnehmer	250

8.6.1	Vom Hersteller kalibrierte Messgrößenaufnehmer	250
8.6.2	Kalibrieren selbstgebauter Aufnehmer durch den Anwender . . .	251
8.7	Maßverkörperungen	252
8.7.1	Kalibriergerät	252
8.7.2	Messverstärker mit eingebauter Kalibriereinrichtung	254
8.7.3	Nebenschlusskalibrierung	255
8.8	Kalibrieren von Messanordnungen	
	mit selbstinstallierten Dehnungsmessstreifen	259
8.8.1	Wheatstonesche Brückenschaltung	259
8.8.2	Beispiel mit selbstinstallierten Dehnungsmessstreifen	260
9	Ermittlung mechanischer Lastspannungen bei elastischer Verformung des Messobjekts	263
9.1	Einleitung	263
9.2	Dehnungs- und Spannungsbegriff	264
9.3	Elastische Verformungen und Spannungen beim einachsigen Zugversuch	266
9.4	Der zweiachsige Spannungszustand	273
9.5	Der Mohrsche Spannungskreis für den ebenen Spannungszustand	278
9.6	Der Verformungskreis	284
9.7	Rosettentypen und Messgitterbezeichnungen	287
9.8	Auswertung von Dehnungsmessungen mit 0°/45°/90°-DMS-Rosetten . .	289
9.9	Auswertung von Dehnungsmessungen mit 60°/120°/180°-Rosetten . . .	293
10	Anwendungsbeispiele für elastische Beanspruchungen	297
10.1	Vorbetrachtung	297
10.2	Bekannte Hauptrichtungen	300
10.2.1	Längskraftbelastete Messobjekte	300
10.2.2	Biegebeanspruchte Messobjekte	305
10.2.3	Verdrehbeanspruchte Messobjekte	317
10.2.4	Querkraftbeanspruchte Messobjekte	321
10.3	Unbekannte Hauptrichtungen	326
10.3.1	Spannungsanalyse mit einer 0°/60°/120°-DMS-Rosette	326
10.3.2	Beanspruchung einer Welle durch Überlagerung von Verdrehung und Biegung	329
10.3.3	Zur Auswertung dynamischer Rosettenmessungen	335
10.4	Gleichzeitiges Erfassen mehrerer Belastungskomponenten	339
10.5	Anwendung von Membranrosetten	346
10.5.1	Grundlagen	346
10.5.2	Beispiel für die Dimensionierung einer Membran für Druckmessungen	350

11	Ermittlung von Wärmespannungen	353
11.1	Entstehung von Wärmespannungen	353
11.2	Erfassen der behinderten Wärmedehnungen bei identischer Temperatur am Kompensationsstreifen und am aktiven Dehnungsmessstreifen	355
11.3	Rechnerische Korrektur der Messwerte mit an Dummies gemessenen Temperaturgängen	357
11.4	Rechnerische Korrektur mit am Originalmessobjekt ermittelten Temperaturgängen	359
11.5	Der „reversible“ Dehnungsmessstreifen	360
11.6	Trennung der mechanischen von den thermischen Dehnungen	361
11.7	Fremdkompensierter Halbbrückenstreifen mit Kompensationswiderstand	362
12	Dehnungsmessstreifen als Hilfsmittel zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen	365
12.1	Einleitende Betrachtung	365
12.2	Zerlegeverfahren	367
12.3	Schichtabtrageverfahren	375
12.4	Ringkernverfahren	382
12.4.1	Grundlagen des Verfahrens	382
12.4.2	Durchführung des Verfahrens	389
12.4.3	Elektrische Verschaltung der Ringkern-Rosette	390
12.4.4	Auswertung der Messergebnisse	392
12.4.5	Mehrstufige Anwendung des Ringkernverfahrens	394
12.4.6	Modifizierte Ringkern-Rosetten für kleinere Kerndurchmesser	398
12.4.7	Anwendungsbeispiel für das einstufige Verfahren mit 14 mm Kerndurchmesser	399
12.5	Bohrlochverfahren	402
12.5.1	Einleitung	402
12.5.2	Eigenspannungen als Mittelwert über die Bohrtiefe	405
12.5.3	Ermittlung der Eigenspannungsverteilung in Abhängigkeit von der Tiefe	413
12.5.4	Bohrlocherzeugung	418
13	Spannungsanalyse mit Dehnungsmessstreifen bei elastoplastischer Werkstoffverformung	421
13.1	Einleitung	421
13.2	Vergleichszustand bei elastischer Verformung	422
13.3	Elastoplastische Verformung	425
13.4	Auswertungsbeispiel	428
13.5	Tensorielle Darstellung der elastoplastischen Verformungsanteile	430

14	Festigkeitshypothesen	435
14.1	Vorbetrachtung	435
14.2	Anstrengungsbegriff	437
14.3	Experimentelle Ergebnisse	440
14.4	Normalspannungshypothese	444
14.5	Schubspannungshypothese	445
14.6	Erweiterte Schubspannungshypothese	446
14.7	Plastisches Potential von v. Mises	448
14.8	Hypothese von der Maßgeblichkeit der Oktaederschubspannung	449
14.9	Gestaltänderungsenergiehypothese	450
	Literatur	455
	Sachverzeichnis	479