

Joachim Heymann · Adolf Lingener

Meßverfahren der experimentellen Mechanik

Mit 375 Abbildungen und 23 Tabellen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo 1986

Inhaltsverzeichnis

0.	Einführung	15
1.	Gemeinsamkeiten beim Anwenden von Feldmeßverfahren	19
1.1.	Kontinuumsmechanische Grundlagen	19
1.1.1.	Spannungstensor und Spannungszustände	19
1.1.2.	Verschiebungs-Verzerrungs-Beziehungen — Thermische Dehnung	25
1.1.3.	Verzerrungstensor und Verzerrungszustände	28
1.1.4.	Elastische Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen	30
1.1.5.	<i>St.-Venant'sches Prinzip</i>	34
1.2.	Zur Übertragung von Versuchsergebnissen an Modellen auf die Hauptausführung	35
1.2.1.	Strenge physikalische Ähnlichkeit und Ähnlichkeitsmaßstäbe	36
1.2.2.	Methoden zur Gewinnung von Modellgesetzen und Ähnlichkeitskennzahlen	38
1.2.2.1.	Ermittlung aus dem Verhältnis der wirkenden Kräftearten	38
1.2.2.2.	Dimensionsanalyse	39
1.2.2.3.	Funktionsanalyse	42
1.2.3.	Angenäherte Ähnlichkeit	44
1.2.4.	Erweiterte Ähnlichkeit	45
1.2.5.	Maßstabsfehler	48
1.2.6.	Beispiel	49
1.3.	<i>Weiterführende Literatur</i>	50
2.	Spannungsoptik	51
2.1.	Einführung	51
2.2.	Grundlagen der ebenen Spannungsoptik	53
2.2.1.	Doppelbrechung und Polarisation	53
2.2.2.	Linear, zirkular und elliptisch polarisiertes Licht	58
2.3.	Spannungsoptische Apparatur	61
2.3.1.	Aufbau	61
2.3.2.	Prinzip und Strahlengang	62
2.4.	Ebenes spannungsoptisches Grundgesetz	63
2.4.1.	Doppelbrechende Kristallplatte zwischen gekreuzten Polarisatoren	63
2.4.1.1.	Linear polarisiertes monochromatisches Licht	63
2.4.1.2.	Zirkular polarisiertes monochromatisches Licht	66
2.4.2.	Belastetes Modell zwischen gekreuzten Polarisatoren	68
2.4.2.1.	Analogie Kristallplatte — belastetes Modell	68
2.4.2.2.	Homogener Spannungszustand	69
2.4.2.3.	Hauptgleichung der Spannungsoptik	70
2.4.2.4.	Anwendung der Intensitätsgleichung und der Hauptgleichung auf Feldprobleme	72
2.4.2.5.	Weißes Licht	74
2.4.3.	Bestimmung der spannungsoptischen Konstanten	75
2.5.	Isochromaten	76
2.5.1.	Besonderheiten und Aufnahme der Isochromaten	76
2.5.1.1.	Isochromaten als Linien gleicher Hauptschubspannung	76

2.5.1.2.	Isochromaten am lastfreien Rand	76
2.5.1.3.	Isochromaten in singulären und isotropen Punkten	77
2.5.1.4.	Aufnahme des Isochromatenbildes	78
2.5.2.	Typische Isochromatenbilder	78
2.5.2.1.	Reiner Zug bzw. reiner Druck in Stäben	79
2.5.2.2.	Biegung mit Querkraft in Stäben	79
2.5.2.3.	Einzellast senkrecht auf der Halbebene	79
2.5.2.4.	Walzendruck	80
2.5.2.5.	Momentennullpunkte	81
2.5.3.	Bestimmung nichtganzzahliger Isochromatenordnungen	81
2.5.3.1.	Bestimmung durch grafische Extrapolation	81
2.5.3.2.	Bestimmung durch Hellfeldaufnahmen	82
2.5.3.3.	Bestimmung durch Kompensation nach <i>Sénarmont</i>	83
2.5.4.	Nagelprobe	84
2.6.	Isoklinen und Spannungstrajektorien	85
2.6.1.	Herstellung des Isoklinenbildes	85
2.6.2.	Besonderheiten der Isoklinen	86
2.6.2.1.	Ermittlung der Schubspannungen	86
2.6.2.2.	Isoklinen am lastfreien Rand und in Symmetrieachsen	86
2.6.2.3.	Isoklinen in singulären und isotropen Punkten	87
2.6.3.	Konstruktion der Hauptspannungstrajektorien	87
2.7.	Zur vollständigen Auswertung des ebenen Spannungsfeldes	88
2.8.	Modellwerkstoffe	93
2.8.1.	Güteanforderungen	93
2.8.2.	Auswahl und Gießtechnik	94
2.9.	Räumliche Spannungsoptik	95
2.9.1.	Optische Grundlagen	96
2.9.2.	Sekundäre Hauptspannungen	97
2.10.	Verfahren der räumlichen Spannungsoptik	99
2.10.1.	Erstarrungsverfahren	99
2.10.1.1.	Prinzip und Versuchsdurchführung	99
2.10.1.2.	Auswertung von Symmetrieschnitten	100
2.10.1.3.	Schiefe Durchstrahlung in der Oberfläche	101
2.10.2.	Oberflächenschichtverfahren	104
2.10.2.1.	Prinzip und Versuchsdurchführung	104
2.10.2.2.	Theoretische Grundlagen	105
2.10.3.	Zwischenschichtverfahren	106
2.10.4.	Verfahren mit eingebetteten Reflexionsschichten	107
2.11.	Dynamische Spannungsoptik	107
2.12.	Fotoplastizität	109
2.12.1.	Versuche mit Modellen	109
2.12.2.	Anwendung des Oberflächenschichtverfahrens	110
2.13.	Weiterführende Literatur	110
3.	Moiréverfahren	112
3.1.	Wesen des Moiréeffekts	113
3.2.	Meßprinzipien des Moiréverfahrens	115
3.3.	Isothenenverfahren	117
3.3.1.	Mathematische Analyse des Moiréeffekts	117
3.3.1.1.	Homogener Deformationszustand	117
3.3.1.2.	Eindimensionaler Fall	118
3.3.1.3.	Mismatch-Effekt im eindimensionalen Fall	122
3.3.1.4.	Zweidimensionaler Fall	124

3.3.1.5.	Grundgleichungen des Isothetenverfahrens	127
3.3.1.6.	Mismatch-Effekte im zweidimensionalen Fall	128
3.3.1.7.	Verdrehmoiré	130
3.3.2.	Analyse des Moiréeffekts bei inhomogener Deformation	131
3.3.3.	Auswertung von Isothetenfeldern	131
3.3.3.1.	Numerieren von Isothetenfeldern	131
3.3.3.2.	Ermittlung der Deformationen	135
3.3.3.3.	Grafische und numerische Differentiation von Isothetenfeldern	136
3.3.3.4.	Auswertung am Rand	140
3.3.4.	Versuchstechnik des Isothetenverfahrens	141
3.3.4.1.	Originalraster	141
3.3.4.2.	Rasterkopiertechniken	142
3.3.4.3.	Objektraster	144
3.3.4.4.	Bezugsraster	146
3.3.4.5.	Kontrast und fotografische Aufnahme von Moirébildern	146
3.3.5.	Anwendungen des Isothetenverfahrens	149
3.3.5.1.	Elastische Probleme	149
3.3.5.2.	Kombination des Isothetenverfahrens mit dem spannungsoptischen Erstarrungsverfahren	149
3.3.5.3.	Elastisch-plastische Deformationsfelder	151
3.3.5.4.	Plastisches Fließen	152
3.3.5.5.	Viskoelastisches Materialverhalten	154
3.3.5.6.	Moirédehnungsgeber	154
3.4.	Moiréstreifenmultiplikation	155
3.4.1.	Beugung an einem einzelnen Gitter	155
3.4.2.	Beugung an einem Bezugs- und Objektgitter	156
3.4.3.	Versuchstechnik	158
3.4.4.	Anwendungen der Moiréstreifenmultiplikation	159
3.4.4.1.	Elastische Probleme	159
3.4.4.2.	Kombination mit dem spannungsoptischen Erstarrungsverfahren	160
3.4.4.3.	Elastisch-plastische Deformationsfelder	160
3.5.	Schattenmoiréverfahren	161
3.5.1.	Schattenmoiréverfahren mit divergentem Strahlengang	161
3.5.2.	Schattenmoiréverfahren mit parallelem Strahlengang	162
3.5.3.	Versuchstechnik und Versuchsauswertung	163
3.5.4.	Anwendungen des Schattenmoiréverfahrens	165
3.5.4.1.	Querdehnung in Scheiben	165
3.5.4.2.	Durchbiegung von Platten	165
3.5.4.3.	Beulverhalten von Flächentragwerken	167
3.5.4.4.	Anwendungen außerhalb der Festkörpermechanik	167
3.6.	Reflexionsmoiréverfahren	167
3.6.1.	Strahlengang des Reflexionsmoiréverfahrens	167
3.6.2.	Versuchstechnik	170
3.6.3.	Anwendungen des Reflexionsmoiréverfahrens	171
3.7.	Weiterführende Literatur	172
4.	Holografische Interferometrie	173
4.1.	Einführung	173
4.2.	Physikalische Grundlagen	173
4.2.1.	Grundbegriffe	174
4.2.2.	Grundlagen der Interferometrie	174
4.2.2.1.	Interferenz und Kohärenz von Wellen	174
4.2.2.2.	Keil und ebene Platte; Zwei- und Mehrstrahlinterferenzen	176
4.2.2.3.	Interferometer	177

4.2.3.	Grundlagen der holografischen Interferometrie	178
4.2.3.1.	Holografische Aufzeichnung	178
4.2.3.2.	Begründung der holografischen Speicherung und Rekonstruktion	180
4.2.3.3.	Einige wichtige Eigenschaften des holografischen Bildes	182
4.2.3.4.	Holografische Interferometrie	184
4.3.	Methoden der holografischen Interferometrie	185
4.3.1.	Doppelbelichtungsmethode (double exposure)	185
4.3.2.	Echtzeitmethode (real time)	186
4.3.3.	Zeitmittelungsmethode (time average)	187
4.4.	Auswertung holografischer Interferogramme	188
4.4.1.	Grundgleichung der holografischen Interferometrie	188
4.4.2.	Statisches Auswerteverfahren	189
4.4.3.	Dynamisches Auswerteverfahren	191
4.4.4.	Zur Anwendung der beiden Auswerteverfahren	192
4.5.	Holografische Versuchsapparatur	193
4.5.1.	Laser	193
4.5.2.	Optische und feinmechanische Bauelemente	195
4.5.3.	Versuchstisch	195
4.5.4.	Aufzeichnungsmaterialien für Hologramme	196
4.6.	Anwendung der holografischen Interferometrie	198
4.6.1.	Bestimmung der Durchbiegung und Schwingungsformen von Platten und Scheiben	198
4.6.2.	Schwingungen von Zylindern	200
4.6.3.	Anwendungen zur Untersuchung plastischer Verformungen und bruchmechanischer Probleme	200
4.7.	Speckle-Verfahren	202
4.7.1.	Speckle-Fotografie	203
4.7.2.	Speckle-Interferometrie	204
4.8.	Ausblick	204
4.9.	Weiterführende Literatur	205
5.	Dehngitterverfahren	206
5.1.	Prinzip	206
5.2.	Grundlagen und Auswertung	208
5.3.	Modellwerkstoffe und Modellherstellung	211
5.4.	Meßmethoden mit Anwendungen	212
5.4.1.	Gummimodellmethode	212
5.4.2.	Methode zur Berücksichtigung des Eigengewichts	213
5.4.3.	Kombination von Dehngitterverfahren und Spannungsoptik	214
5.4.4.	Anwendung des Dehngitterverfahrens zum Erfassen von Trenn- und Umformvorgängen	217
5.5.	Weiterführende Literatur	218
6.	Reißblackverfahren	219
6.1.	Prinzip	219
6.2.	Grundlagen	219
6.3.	Reißblackkarten	221
6.4.	Erzeugung der Rißbilder	223
6.5.	Ursprung und Veränderung der Rißempfindlichkeit	223

6.6.	Erkennbarkeit der Risse	224
6.7.	Auswertung der Rißbilder	225
6.8.	Beispiele	228
6.9.	Weiterführende Literatur	230
7.	Elektrisches Messen mechanischer Größen	231
7.1.	Einige Grundlagen zum Messen zeitabhängiger Größen	231
7.1.1.	Zeitabhängige Meßgrößen der Festkörpermechanik	231
7.1.2.	Grundbegriffe zur Darstellung und Charakterisierung zeitabhängiger Größen	232
7.1.3.	Grundbegriffe zum Beschreiben von Meßeinrichtungen für mechanische Größen	235
7.1.4.	Informationen und Signale	238
7.1.5.	Klassifizierung von Meßsignalen	239
7.1.6.	Das logarithmische Pegelmaß	242
7.1.7.	Meßfehler bei dynamischen Messungen	243
7.2.	Aufbau und Eigenschaften von Meßeinrichtungen für mechanische Größen	245
7.3.	Aufnehmende Elemente	247
7.3.1.	Aufnehmende Elemente für Bewegungsgrößen	247
7.3.2.	Aufnehmende Elemente für Kraftgrößen	250
7.4.	Wandler	251
7.4.1.	Aktive Wandler	252
7.4.1.1.	Elektrodynamische Wandler	252
7.4.1.2.	Elektromagnetische Wandler	253
7.4.1.3.	Piezoelektrische Wandler	254
7.4.2.	Passive Wandler. Brückenschaltungen	255
7.4.2.1.	Ohmsche Wandler	257
7.4.2.2.	Induktive Wandler	258
7.4.2.3.	Kapazitive Wandler	259
7.4.2.4.	Passive Wandler als Elemente elektrischer Schwingkreise	260
7.4.2.5.	Digitale Wandler	260
7.5.	Verstärker	261
7.6.	Anzeige, Registrierung und Speicherung von Meßsignalen	262
7.6.1.	Analoge Verfahren	263
7.6.1.1.	Analoge Anzeigegeräte	263
7.6.1.2.	Analoge Registriergeräte	264
7.6.1.3.	Magnetbandspeicherung von Analogsignalen	267
7.6.2.	Digitale Verfahren	268
7.6.2.1.	Analog-Digital-Umsetzer	268
7.6.2.2.	Digitale Anzeigegeräte	270
7.6.2.3.	Digitale Registriergeräte	271
7.6.2.4.	Digitalspeicher	271
7.7.	Kalibrierung von Meßeinrichtungen	273
7.7.1.	Zweck der Kalibrierung	273
7.7.2.	Verfahren zur Kalibrierung	273
7.8.	Spezielle Meßeinrichtungen für mechanische Größen	274
7.8.1.	Meßsysteme auf der Basis piezoelektrischer Aufnehmer	275
7.8.1.1.	Bauarten piezoelektrischer Aufnehmer	275
7.8.1.2.	Blockschaltbild einer Meßeinrichtung	276
7.8.2.	Meßsysteme auf der Basis elektrodynamischer Aufnehmer	277
7.8.3.	Phasenmessungen	277
7.8.4.	Frequenzmessungen	279
7.9.	Weiterführende Literatur	280

8.	Messen mit Dehnungsmeßstreifen	281
8.1.	Einführung	281
8.2.	Meßprinzip	282
8.3.	Haupttypen der Dehnungsmeßstreifen (DMS)	283
8.3.1.	Draht- und Folien-DMS	284
8.3.2.	Halbleiter-DMS	285
8.4.	<i>Wheatstonesche</i> Brückenschaltung	286
8.4.1.	Speisung der Brückenschaltung	289
8.4.2.	Kalibrierung der Meßschaltung	290
8.5.	Meßgeräte für das DMS-Verfahren	291
8.5.1.	Trägerfrequenzmeßverstärker	291
8.5.2.	Meßgeräte für Halbleiter-DMS	293
8.6.	Gesichtspunkte bei der Vorbereitung einer Dehnungsmessung mit DMS	294
8.6.1.	Auswahl der Meßstellen	294
8.6.2.	Auswahl der DMS	294
8.6.2.1.	Spannungszustand des Meßobjektes	294
8.6.2.2.	Statische und dynamische Beanspruchung	297
8.6.3.	Weitere Gesichtspunkte	299
8.6.4.	Aufkleben der DMS	303
8.6.5.	Schutz der DMS gegen äußere Einwirkungen	304
8.7.	Auswertung des Spannungszustandes für einen Meßpunkt	304
8.8.	Zusammenhang zwischen Belastungs- und Dehnungsgrößen bei prismatischen Bauteilen	307
8.8.1.	Zug-Druck-Beanspruchung	307
8.8.2.	Biegebeanspruchung	308
8.8.3.	Torsionsbeanspruchung	308
8.9.	Weiterführende Literatur	309
9.	Auswertung dynamischer Messungen	310
9.1.	Zielstellung bei der Auswertung dynamischer Messungen	310
9.2.	Die <i>Fourier</i> transformation und weitere Funktionaloperationen	311
9.2.1.	Bedeutung der <i>Fourier</i> analyse. Zeit- und Frequenzbereich	311
9.2.2.	Komplexe <i>Fourier</i> reihe	312
9.2.2.1.	Amplitudenspektrum	313
9.2.2.2.	Leistungsspektrum	317
9.2.3.	<i>Fourier</i> transformation	318
9.2.3.1.	Amplitudendichtespektrum	318
9.2.3.2.	Leistungsdichtespektrum	320
9.2.4.	<i>Laplace</i> transformation	321
9.2.5.	Faltung zweier Funktionen	322
9.3.	Weitere Kennfunktionen von Signalen und Systemen	322
9.3.1.	Verteilungsfunktion $F(x)$. Verteilungsdichtefunktion $p(x)$	323
9.3.2.	Autokorrelationsfunktion (AKF)	325
9.3.3.	Cepstrum	326
9.3.4.	Kreuzkorrelationsfunktion (KKF)	327
9.3.5.	Kreuzleistungsdichtespektrum	327
9.3.6.	Gewichtsfunktion	328
9.3.7.	Übergangsfunktion	328
9.3.8.	Komplexer Frequenzgang	328
9.3.9.	Übertragungsfunktion $H(p)$	331
9.3.10.	Zur Rolle der Phaseninformation	331
9.3.11.	Informationsaspekt bei der Bildung von Kennfunktionen	332

nungsmessung mit DMS	294	9.4.	Experimentelle Frequenzanalyse
	294	9.4.1.	Diskrete Fouriertransformation (DFT) . . .
	294	9.4.2.	Schnelle Fouriertransformation (FFT) . . .
	294	9.4.3.	Konsequenzen der DFT
	294	9.4.3.1.	Auswertbarer Frequenzbereich
	294	9.4.3.2.	Aliasing
	294	9.4.3.3.	Abbruchfehler
	294	9.4.3.4.	Fensterfunktionen
	294	9.4.4.	Anwendung auf stochastische Signale. Mittel .
	294	9.4.5.	Handhabung der digitalen Verfahren zur Be .
	294	9.4.5.1.	Leistungsspektrum und Autokorrelationsfunk .
	294	9.4.5.2.	Kreuzleistungsspektrum und Kreuzkorrelatio .
	294	9.4.5.3.	Rechentechnische Realisierung
	294	9.4.5.4.	Beispiele
	294	9.4.6.	Realisierung der Frequenzanalyse mit analog .
	294	9.4.6.1.	Filteranalyse
	294	9.4.6.2.	Multiplikative Vergleichsverfahren zur Fre .
	294	9.4.6.3.	verfahren
	294	9.4.7.	Vergleich digitaler und analoger Verfahren zu .
	294	9.4.8.	Kombinierte Analyseverfahren (Zeitkompress .
	294	9.4.8.1.	Frequenzanalyse instationärer Signale . . .
	294	9.4.8.2.	Stoßanalyse
	294	9.4.8.3.	Transiente Vorgänge
	294	9.5.	Nichtstationäre stochastische Signale
	294	9.5.1.	Klassierung (Auswertung im Zeitbereich) . .
	294	9.5.2.	Begriffsbestimmung und Einsatzbereich . . .
	294	9.5.3.	Einteilung der Klassierverfahren
	294	9.5.4.	Einparametrische Klassierverfahren
	294	9.5.4.1.	Zweiparametrische Klassierverfahren
	294	9.5.5.	Klassierung nach Verformungszyklen (Rain-F .
	294	9.5.6.	Weitere Verfahren
	294	9.5.7.	Darstellung und Auswertung von Klassierergo .
	294	9.6.	Praktische Anwendung der Klassierverfahren .
	294	9.6.1.	Beurteilung von Meßergebnissen
	294	9.6.2.	Beurteilung von stationären Maschinenschwir .
	294	9.6.3.	Schwingungen von Maschinenfundamenten . .
	294	9.6.4.	Bauwerksschwingungen
	294	9.7.	Schwingungsbeeinflussung des Menschen . . .
	294	10.	Weiterführende Literatur
	294	10.1.	Messung und Analyse mechanischer Frequen
	294	10.1.1.	Grundlagen
	294	10.1.2.	Einführung
	294	10.1.3.	Analytische Beschreibung mechanischer Frequ
	294	10.1.4.	Anschauliche Interpretation von Frequenzgrä
	294	10.1.5.	Grafische Darstellungen
	294	10.2.	Weitere Möglichkeiten der Definition mechan
	294	10.2.1.	Experimentelle Bestimmung von Frequenzgrä
	294	10.2.2.	Grundaufbau der Meßeinrichtung
	294	10.2.3.	Schwingungserreger
	294	10.2.4.	Kalibrierung der Meßkette
	294	10.2.5.	Einsatz von Klein- und Mikrorechnern . .
	294		Die Kohärenzfunktion

10.3.	Parameterbestimmung bei Systemen mit einem Freiheitsgrad	407
10.3.1.	Allgemeines	407
10.3.2.	Abschätzung der Parameter aus dem Betrag des Frequenzganges	407
10.3.3.	Abschätzung der Parameter aus der Ortskurve.	408
10.4.	Experimentelle Modalanalyse	411
10.4.1.	Erläuterung der Problemstellung	411
10.4.2.	Analytische Beschreibung der Frequenzgangmatrix	412
10.4.3.	Messung der Frequenzgangmatrix	412
10.4.4.	Modalanalyse gemessener Frequenzgänge	414
10.4.5.	Rechnergestützte Modalanalyse	418
10.5.	<i>Weiterführende Literatur</i>	420
Bildanhang		421
Sachwortverzeichnis		461