

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.	<b>Einführung</b>	15
1.	<b>Gemeinsamkeiten beim Anwenden von Feldmeßverfahren</b>	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.-Venantsches 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.	<b>Spannungsoptik</b>	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.	Isothetenverfahren . . . . .	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
<b>4.</b>	<b>Holografische Interferometrie . . . . .</b>	<b>173</b>
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 Versuchsaapparatur . . . . .	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
<b>5.</b>	<b>Dehngitterverfahren . . . . .</b>	<b>206</b>
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
<b>6.</b>	<b>Reißlackverfahren . . . . .</b>	<b>219</b>
6.1.	Prinzip . . . . .	219
6.2.	Grundlagen . . . . .	219
6.3.	Reißlackarten . . . . .	221
6.4.	Erzeugung der Reißbilder . . . . .	223
6.5.	Ursprung und Veränderung der Reißempfindlichkeit . . . . .	223

6.6.	Erkennbarkeit der Risse . . . . .	224
6.7.	Auswertung der Rißbilder . . . . .	225
6.8.	Beispiele . . . . .	228
6.9.	<i>Weiterführende Literatur</i> . . . . .	230
<b>7.</b>	<b>Elektrisches Messen mechanischer Größen</b> . . . . .	<b>231</b>
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 Anzeigeegeräte . . . . .	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 Anzeigeegeräte . . . . .	270
7.6.2.3.	Digitale Registriergeräte . . . . .	271
7.6.2.4.	Digital Speicher . . . . .	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.	<i>Weiterführende Literatur</i> . . . . .	280

<b>8.</b>	<b>Messen mit Dehnungsmeißstreifen</b>	<b>281</b>
8.1.	Einführung	281
8.2.	Meßprinzip	282
8.3.	Haupttypen der Dehnungsmeißstreifen (DMS)	283
8.3.1.	Draht- und Folien-DMS	284
8.3.2.	Halbleiter-DMS	285
8.4.	Wheatstonesche 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
<b>9.</b>	<b>Auswertung dynamischer Messungen</b>	<b>310</b>
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

.....	281
.....	281
.....	282
.....	283
.....	284
.....	285
.....	286
.....	289
.....	290
.....	291
.....	291
.....	293
ungsmessung mit DMS	294
.....	294
.....	294
.....	294
.....	297
.....	299
.....	303
.....	304
Meßpunkt	304
ehnungsgrößen bei prisma-	307
.....	307
.....	308
.....	308
.....	309
.....	310
messungen	310
maloperationen	311
enzbereich	311
.....	312
.....	313
.....	317
.....	318
.....	318
.....	320
.....	321
.....	322
temen	322
ktion $p(x)$	323
.....	325
.....	326
.....	327
.....	327
.....	328
.....	328
.....	328
.....	331
.....	331
unktionen	332

9.4.	Experimentelle Frequenzanalyse
9.4.1.	Diskrete Fouriertransformation (DFT)
9.4.2.	Schnelle Fouriertransformation (FFT)
9.4.3.	Konsequenzen der DFT
9.4.3.1.	Auswertbarer Frequenzbereich
9.4.3.2.	Aliasing
9.4.3.3.	Abbruchfehler
9.4.3.4.	Fensterfunktionen
9.4.4.	Anwendung auf stochastische Signale. Mittel
9.4.5.	Handhabung der digitalen Verfahren zur Bes
9.4.5.1.	Leistungsspektrum und Autokorrelationsfunk
9.4.5.2.	Kreuzleistungsspektrum und Kreuzkorrelatio
9.4.5.3.	Rechentchnische Realisierung
9.4.5.4.	Beispiele
9.4.6.	Realisierung der Frequenzanalyse mit analog
9.4.6.1.	Filteranalyse
9.4.6.2.	Multiplikative Vergleichsverfahren zur Fre
.....	verfahren
9.4.6.3.	Vergleich digitaler und analoger Verfahren zu
9.4.7.	Kombinierte Analyseverfahren (Zeitkompress
9.4.8.	Frequenzanalyse instationärer Signale
9.4.8.1.	Stoßanalyse
9.4.8.2.	Transiente Vorgänge
9.4.8.3.	Nichtstationäre stochastische Signale
9.5.	Klassierung (Auswertung im Zeitbereich)
9.5.1.	Begriffsbestimmung und Einsatzbereich
9.5.2.	Einteilung der Klassiervverfahren
9.5.3.	Einparametrische Klassiervverfahren
9.5.4.	Zweiparametrische Klassiervverfahren
9.5.4.1.	Klassierung nach Verformungszyklen (Rain-F
9.5.5.	Weitere Verfahren
9.5.6.	Darstellung und Auswertung von Klassiererg
9.5.7.	Praktische Anwendung der Klassiervverfahren
9.6.	Beurteilung von Meßergebnissen
9.6.1.	Beurteilung von stationären Maschinenschwir
9.6.2.	Schwingungen von Maschinenfundamenten
9.6.3.	Bauwerksschwingungen
9.6.4.	Schwingungsbeeinflussung des Menschen
9.7.	Weiterführende Literatur
10.	Messung und Analyse mechanischer Frequen
10.1.	Grundlagen
10.1.1.	Einführung
10.1.2.	Analytische Beschreibung mechanischer Frequ
10.1.3.	Anschauliche Interpretation von Frequenzgär
10.1.4.	Grafische Darstellungen
10.1.5.	Weitere Möglichkeiten der Definition mechan
10.2.	Experimentelle Bestimmung von Frequenzgär
10.2.1.	Grundaufbau der Meßeinrichtung
10.2.2.	Schwingungserreger
10.2.3.	Kalibrierung der Meßkette
10.2.4.	Einsatz von Klein- und Mikrorechnern
10.2.5.	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
	<b>Bildanhang</b> . . . . .	<b>421</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	<b>461</b>