

Inhaltsverzeichnis

4	Schwingungen linearer Systeme mit mehreren Freiheitsgraden	1
4.1	Systeme mit zwei Freiheitsgraden	4
4.1.1	Freie, ungedämpfte Schwingungen	5
4.1.1.1	Mechanische Modelle und ihre Bewegungsgleichungen	5
4.1.1.2	Lösung der Bewegungsgleichungen; Eigenfrequenzen und Eigenformen	9
4.1.1.3	Anfangsbedingungen; Hauptschwingungen	15
4.1.1.4	Entkopplung der Bewegungsgleichungen; Modaltransformation	16
4.1.1.5	Beschreibung in Matrizenform	18
4.1.2	Erzwungene, ungedämpfte Schwingungen bei harmonischer Anregung	23
4.1.2.1	Mechanische Modelle und ihre Bewegungsgleichungen	24
4.1.2.2	Lösung der Bewegungsgleichungen	26
4.1.2.3	Schwingungstilgung	29
4.1.3	Einbeziehung von Dämpfung	34
4.1.3.1	Freie Schwingungen	35
4.1.3.2	Erzwungene Schwingungen	38
4.1.3.3	Auswirkung auf die Schwingungstilgung	39
4.2	Systeme mit mehr als zwei Freiheitsgraden	46
4.2.1	Freie, ungedämpfte Schwingungen	46
4.2.1.1	Mechanische Modelle und ihre Bewegungsgleichungen	46
4.2.1.2	Lösung der Bewegungsgleichungen; Eigenfrequenzen, Eigenvektoren und Eigenformen	52
4.2.1.3	Eigenschaften von Eigenfrequenzen und Eigenvektoren	55
4.2.1.4	Anfangsbedingungen	58
4.2.2	Erzwungene, ungedämpfte Schwingungen	59
4.2.2.1	Bewegungsgleichungen	60
4.2.2.2	Allgemeine Lösung der Bewegungsgleichung	61
4.2.2.2.1	Faltungsintegral und Fundamentalmatrix	62
4.2.2.2.2	Modaltransformation	65
4.2.2.3	Gleichfrequente, harmonische Anregung	69

4.2.2.4	Multifrequente, harmonische Anregung	78
4.2.2.5	Periodische Anregung	82
4.2.2.6	Nichtperiodische Anregung	84
4.2.3	Einbeziehung von Dämpfung	86
4.2.3.1	Freie Schwingungen	87
4.2.3.1.1	(Allgemeine) Viskose Dämpfung	87
4.2.3.1.2	Proportionale (viskose) Dämpfung	90
4.2.3.2	Erzwungene Schwingungen	93
4.2.3.2.1	Proportionale (viskose) Dämpfung	93
4.2.3.2.2	(Allgemeine) Viskose Dämpfung	99
4.2.3.2.3	Strukturelle Dämpfung	99
4.2.4	Technische Anwendungen	100
4.2.4.1	Systeme mit wenigen Freiheitsgraden	101
4.2.4.2	Systeme mit vielen Freiheitsgraden	104
4.2.4.3	Weiterführende Anwendungen	108
5	Schwingungen linearer kontinuierlicher Systeme	111
5.1	Freie, ungedämpfte Schwingungen	113
5.1.1	Saite, Stab, Welle	113
5.1.1.1	Bewegungsgleichungen	113
5.1.1.2	Lösung der Bewegungsgleichungen	118
5.1.1.3	Randbedingungen	124
5.1.1.4	Eigenfrequenzen und Eigenformen	126
5.1.2	Balken	129
5.1.2.1	Bewegungsgleichung	129
5.1.2.2	Lösung der Bewegungsgleichung	132
5.1.2.3	Randbedingungen	135
5.1.2.4	Eigenfrequenzen und Eigenformen	138
5.1.2.5	Einfluss sekundärer Effekte	141
5.1.2.5.1	Schubverformung und Drehträgheit	142
5.1.2.5.2	Längsvorspannung	147
5.1.2.5.3	Elastische Einspannung und elastische Bettung	150
5.1.3	Platten und Schalen	155
5.1.3.1	Rechteckplatten	156
5.1.3.2	Kreis- und Kreisringplatten	168
5.1.3.3	Kreiszyinderschalen	185

5.1.4	Allgemeines Kontinuum	199
5.1.4.1	Bewegungsgleichung	200
5.1.4.2	Lösung der Bewegungsgleichung	202
5.1.4.3	Randbedingungen	204
5.1.4.4	Eigenfrequenzen und Eigenformen	205
5.1.4.5	Orthogonalität der Eigenfunktionen	206
5.1.4.6	Anfangsbedingungen	210
5.2	Erzwungene, ungedämpfte Schwingungen	213
5.2.1	Saite, Stab, Welle	213
5.2.2	Balken	214
5.2.3	Platten und Schalen	215
5.2.4	Allgemeines Kontinuum	216
5.2.4.1	Bewegungsgleichung	217
5.2.4.2	Allgemeine Lösung der Bewegungsgleichung	219
5.2.4.3	Harmonische Anregung	221
5.2.4.4	Periodische Anregung	224
5.2.4.5	Nichtperiodische Anregung	227
5.3	Einbeziehung von Dämpfung	229
5.3.1	Freie Schwingungen	229
5.3.1.1	(Allgemeine) Viskose Dämpfung	229
5.3.1.2	Proportionale (viskose) Dämpfung	231
5.3.2	Erzwungene Schwingungen	234
5.3.2.1	Proportionale (viskose) Dämpfung	234
5.3.2.2	(Allgemeine) Viskose Dämpfung	236
5.3.2.3	Strukturelle Dämpfung	236
5.4	Technische Anwendung	237
5.4.1	Eindimensionale Kontinua	237
5.4.2	Zweidimensionale Kontinua	243
Anhang A	Mathematische Umformungen	249
Anhang B	Beispiele	315
Literaturverzeichnis		371
Sachwortverzeichnis		375

Inhalt von Band 1

0	Einleitung	1
1	Kinematik von Schwingungen	5
1.1	Harmonische Schwingungen	6
1.2	Gedämpfte Schwingungen	14
1.2.1	Exponentiell gedämpfte Schwingungen	15
1.2.2	Linear gedämpfte Schwingungen	23
1.3	Modulierte Schwingungen	25
1.3.1	Amplitudenmodulation	25
1.3.2	Phasenmodulation	28
1.3.3	Amplituden- und Frequenzmodulation; Schwebung	29
1.4	Periodische Schwingungen	33
1.5	Nichtperiodische Schwingungen	39
2	Modellbildungen in der Schwingungstechnik	47
2.1	Elemente mechanischer Schwingungssysteme	50
2.1.1	Elemente diskreter Systeme	51
2.1.1.1	Die Feder	51
2.1.1.2	Die Masse	57
2.1.1.3	Der Dämpfer	59
2.1.2	Elemente kontinuierlicher Systeme	62
2.1.2.1	Eindimensionale Kontinua	62
2.1.2.1.1	Die Saite	63
2.1.2.1.2	Der Stab	64
2.1.2.1.3	Die Welle	65
2.1.2.1.4	Der Balken	66
2.1.2.2	Zweidimensionale Kontinua	66
2.1.2.2.1	Die Membran	67
2.1.2.2.2	Die Scheibe	67
2.1.2.2.3	Die Platte	68
2.1.2.2.4	Die Schale	70
2.1.2.3	Einbeziehung von Dämpfung	71

2.2	Aufstellen von Bewegungsgleichungen	75
2.2.1	Ausgangs-und Momentanzustand	75
2.2.2	Schnittprinzip und Freikörperbild	76
2.2.3	Impulssatz und Drallsatz	77
3	Schwingungen linearer Systeme mit einem Freiheitsgrad	83
3.1	Freie, ungedämpfte Schwingungen	85
3.1.1	Mechanische Modelle und ihre Bewegungsgleichungen	85
3.1.1.1	Feder-Masse-System	85
3.1.1.2	Drehfeder-Masse-System (Drehschwinger)	87
3.1.1.3	Physikalisches Pendel	87
3.1.1.4	Mathematisches Pendel	89
3.1.2	Lösung der Bewegungsgleichungen	90
3.1.3	Anfangsbedingungen	92
3.1.4	Energiebetrachtungen	93
3.2	Freie, gedämpfte Schwingungen	98
3.2.1	Viskose Dämpfung	98
3.2.1.1	Mechanische Modelle und ihre Bewegungsgleichungen	98
3.2.1.2	Lösung der Bewegungsgleichungen, Anfangs- bedingungen, Energiebetrachtungen	100
3.2.2	Dämpfung durch trockene Reibung	106
3.2.3	Strukturelle Dämpfung	110
3.3	Erzwungene Schwingungen	111
3.3.1	Mechanische Modelle und ihre Bewegungsgleichungen	112
3.3.1.1	Krafterregung	112
3.3.1.2	Federfußpunkterregung	113
3.3.1.3	Dämpferfußpunkterregung	114
3.3.1.4	Feder- und Dämpferfußpunkterregung	115
3.3.1.5	Erregung über Zusatzelemente	115
3.3.1.6	Massenkrafterregung	116
3.3.2	Allgemeine Lösung der Bewegungsgleichung	118
3.3.3	Sprung- und impulsförmige Anregung	119
3.3.3.1	Sprunganregung	121
3.3.3.2	Impulsanregung	125
3.3.4	Harmonische Anregung	131
3.3.4.1	Bewegungsgleichungen und deren Lösung	131
3.3.4.2	Einschwingvorgang und eingeschwungener Zustand ...	136

3.3.4.3	Der Frequenzgang	138
3.3.4.3.1	Betrag und Phase: Verzerrungs- und Phasenfunktion	140
3.3.4.3.2	Ortskurve	148
3.3.4.3.3	Real- und Imaginärteil	151
3.3.4.4	Leistungs- und Energiebetrachtungen	154
3.3.4.5	Resonanznähe und Resonanz	158
3.3.4.6	Resonanzdurchgang	160
3.3.4.7	Einfluss des Dämpfungsgesetzes; Strukturdämpfung ...	164
3.3.5	Periodische Anregung	167
3.3.5.1	Bewegungsgleichungen und deren Lösung	167
3.3.5.2	Erreger- und Antwortspektrum	170
3.3.6	Nichtperiodische Anregung	172
3.3.6.1	Lösung im Zeitbereich: Faltungsintegral	173
3.3.6.2	Lösung im Frequenzbereich: Erreger- und Antwortspektrum	175
3.3.7	Technische Anwendungen	180
3.3.7.1	Rotierende Körper und Wellen	180
3.3.7.2	Schwingungsisolierung von Maschinen	186
3.3.7.2.1	Aktive Isolierung	186
3.3.7.2.2	Passive Isolierung	191
3.3.7.3	Seismische Bewegungsaufnehmer	192
3.3.7.4	Geregelte Schwingungssysteme	196
Anhang A	Mathematische Umformungen	201
Anhang B	Beispiele	231
Literaturverzeichnis		273
Sachwortverzeichnis		279