

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Definition einer Schwingung	1
1.2	Harmonische Schwingung, Sinusschwingung	2
1.2.1	Reelle Darstellung der harmonischen Schwingung	2
1.2.2	Dimensionslose Schreibweisen	4
1.2.3	Komplexe Darstellung harmonischer Schwingungen; Zeigerdiagramme	5
1.2.4	Zeiger und Zeigerdiagramme für Ableitungen	8
1.3	Allgemeine periodische Schwingung	8
1.3.1	Definition	9
1.3.2	Manipulation periodischer Funktionen	9
1.3.3	Harmonische Synthese	10
1.3.4	Harmonische Analyse periodischer Schwingungen	12
1.3.5	Zeitliche Mittelwerte und besondere Bezeichnungen	18
1.4	Nichtperiodische Schwingung	18
1.4.1	Fastperiodische Schwingung	19
1.4.2	Modulierte Schwingung	19
1.4.3	Schwebung	21
1.4.4	Exponentiell wachsende und schwindende Schwingung	22
1.5	Aufgaben	24

Teil I Starre Maschinen unter dynamischer Last (Freiheitsgrad Null)

2	Bodenkräfte einer Rüttelmaschine	29
2.1	Aufgabenstellung	29
2.2	Lösung	29
2.2.1	Allgemeines Lösungsvorgehen	29
2.2.2	Entwurf des Modells	30
2.2.3	Gleichgewichtsbedingungen	31
2.2.4	Beschaffen der Systemparameter	32

2.2.5	Rechnerprogramm	32
2.2.6	Rechenergebnis/Interpretation	32
2.2.7	Aufzeichnung	33
2.3	Aufgaben	33
3	Auswuchten starrer Rotoren	35
3.1	Aufgabenstellung	35
3.2	Modell	36
3.3	Gleichgewichtsbedingungen	36
3.3.1	Lageplan, Koordinaten, Kinematik	36
3.3.2	Schwerpunktbeschleunigung und Drall	37
3.3.3	Lagerkräfte	38
3.4	Diskussion der Lagerkräfte infolge Unwucht	39
3.5	Das Wuchten	41
3.6	Aufgaben	43
Teil II Schwinger mit einem Freiheitsgrad		
4	Vertikalschwingungen eines Paares gekoppelter Exzenterpressen	47
4.1	Aufgabenstellung	47
4.2	Modell	48
4.2.1	Vereinfachende Annahmen	48
4.2.2	Die Stütz- oder Federelemente	48
4.2.3	Ersatzsystem	50
4.3	Massenkräfte	50
4.3.1	Allgemeine Bemerkungen zu den Massenkräften	50
4.3.2	Kinematik der Relativbewegungen	52
4.3.3	Kinetik der Relativbewegungen	53
4.4	Schwingungserregung durch bewegte Massen	54
4.4.1	Reduktion der Erregerkräfte	54
4.4.2	Zeitverlauf der Erregung; Fourier-Zerlegung	55
4.5	Gleichgewichtsbedingungen und Bewegungs-Differentialgleichung	57
4.5.1	Gleichgewicht	57
4.5.2	Die Bewegungs-(Differential-)Gleichung	58
4.6	Allgemeine Aussagen; Ergänzende Hinweise	58
4.6.1	Benennungen	58
4.6.2	Überlagerung von Lösungen	59
4.6.3	Schwinger mit negativer Dämpfung	60
4.6.4	Pendel als nichtlineare Schwinger	61
4.6.5	Allgemeine Bewegungsgleichung	62
4.7	Dimensionslose Schreibweise von Differentialgleichungen	63

4.7.1	Vorgabe von Bezugsgrößen	63
4.7.2	Systematische Bestimmung systemeigner Bezugsgrößen . . .	64
4.8	Aufgaben	65
5	Freie Schwingungen	69
5.1	Bewegungsgleichung; Bemerkungen zur Nomenklatur	69
5.2	Lösen der Differentialgleichung	70
5.3	Ausdeuten der Lösung	71
5.3.1	Ungedämpfte Schwingung	71
5.3.2	Gedämpfte Schwingungen	73
5.4	Aufgaben	74
6	Erzwungene Schwingungen	77
6.1	Allgemeine Aussagen	77
6.2	Erzwungene harmonische Schwingungen	78
6.2.1	Komplexe Schreibweise der Bewegungsgleichung	78
6.2.2	Berechnen der erzwungenen Schwingung	79
6.2.3	Diagramme für Amplitudengang, Phasengang, Vergrößerungsfunktion	83
6.2.4	Der Frequenzgang der Übertragungsfunktion	85
6.2.5	Seismische Schwingungsaufnehmer	87
6.3	Das Arbeiten mit Stoßerregung und Stoßantwort	89
6.3.1	Die Delta-Funktion	90
6.3.2	Erregung durch einen Kraftstoß	91
6.3.3	Erregerkraft als Stoßfolge	93
6.4	Aufgaben	94
7	Erzwungene Schwingungen der Exzenterpressen	97
7.1	Wirkung der relativ bewegten Massen auf die Rahmenauslenkung . .	97
7.2	Wirkung der bewegten Bodenplatte	100
7.2.1	Passivisolierung	103
7.3	Wirkung der bewegten Massen auf den Boden	103
7.3.1	Aktivisolierung	104
7.4	Aufgaben	104
8	Einschwing- und Anlaufvorgänge	107
8.1	Einschwingvorgänge	108
8.1.1	Allgemeine Lösung der Bewegungsgleichung; Anpassen an die Anfangsbedingungen	108
8.1.2	Einschwingvorgang	109
8.2	Anlauf einer Erregung	110
8.2.1	Vorüberlegungen	110
8.2.2	Berechnen einer Einhüllenden	111

8.2.3	Erregeranlauf mit Resonanzdurchfahrt	112
8.2.4	Anlauf bei Unwucherregung	115
8.3	Aufgaben	117

Teil III Diskrete Schwinger mit zwei und mehr Freiheitsgraden

9	Schwinger mit zwei Freiheitsgraden	121
9.1	Beispiele für Schwinger mit zwei Freiheitsgraden	121
9.2	Freie Schwingungen	123
9.2.1	Aufstellen der Bewegungsgleichungen	123
9.2.2	Matrizenschreibweise der Bewegungsgleichungen	124
9.2.3	Koppelglieder in den Bewegungsgleichungen	125
9.3	Lösen der Bewegungsgleichungen	126
9.3.1	Formelmäßiges Vorgehen	126
9.3.2	Freie Schwingungen: Zweimassenschwinger	127
9.3.3	Zahlenbeispiel	130
9.3.4	Freie Schwingungen: Torsionsschwinger	131
9.4	Erzwungene Schwingungen	132
9.4.1	Aufstellen der Bewegungsgleichungen	132
9.4.2	Erzwungene Schwingungen bei harmonischer Erregung	133
9.4.3	Erzwungene Schwingungen: Zweimassenschwinger	135
9.4.4	Erzwungene Schwingungen: Torsionsschwinger	136
9.5	Aufgaben	138
10	Modaltransformation als Hilfsmittel zur Schwingungsanalyse	141
10.1	Orthogonalität der Eigenschwingungsformen	141
10.1.1	Orthogonalitätsnachweis	141
10.1.2	Die Modalmatrix	143
10.1.3	Normieren	144
10.1.4	Orthogonalisieren	144
10.2	Transformation der Schwingungsgleichung auf Modalkoordinaten	145
10.3	Anwendungsbeispiel: Dämpfungsfreie erzwungene harmonische Schwingung	145
10.4	Anwendungsbeispiel Rayleigh-Dämpfung	146
10.5	Aufgaben	147
11	Dreh- und Torsionsschwingungen	149
11.1	Aufgabenstellung, Symbole	149
11.2	Drehschwingungen eines Systems mit einer Übersetzung	151
11.2.1	Aufstellen der Bewegungsgleichungen nach Lagrange	151
11.2.2	Lösen des Eigenwertproblems	153
11.2.3	Darstellung der Schwingungsformen	154

11.3	Reduktion von Drehschwingern mit Übersetzungen auf eine Welle . . .	155
11.3.1	Reduktion des Drehschwingers auf die Welle 1	156
11.4	Erzwungene Drehschwingungen	157
11.4.1	Bewegungsgleichungen (nach Lagrange)	158
11.4.2	Zahlenbeispiel	160
11.5	Aufgaben	163
12	Der starr gelagerte Rotor mit einfacher Durchbiegung	167
12.1	Aufgabenstellung	167
12.2	Modell	167
12.3	Bewegungsgleichungen	169
12.3.1	Rotormasse	170
12.3.2	Rotorsteifigkeit	171
12.3.3	Dämpfungen	176
12.3.4	Bewegungsgleichungen	179
12.4	Erzwungene Schwingungen	180
12.4.1	Gewichtseinfluss	180
12.4.2	Unwuchteinfluss	181
12.5	Freie Schwingungen	182
12.6	Schlüsse aus den Untersuchungen	185
12.7	Aufgaben	187
13	Anisotrope Lagerungen	189
13.1	Aufgabenstellung	189
13.2	Modell	190
13.3	Steifigkeit des Lagerbocks	190
13.3.1	Berechnen der Lagersteifigkeiten nach dem ersten Satz von Castigliano (vgl. Anhang, Abschn. B.4)	191
13.3.2	Einbau eines Versteifungselements – der zweite Satz von Castigliano	193
13.4	Eigenschwingungen des Lagerbocks mit angehängter Masse	196
13.4.1	Modell und Bewegungsgleichungen	196
13.4.2	Eigenschwingungen des Lagerbocks	197
13.4.3	Der Einfluss von Dämpfung auf die Eigenschwingungen – allgemein	200
13.4.4	Schwach gedämpfte Eigenschwingungen des Lagerbocks	202
13.5	Erzwungene Schwingungen des Lagerbocks	203
13.5.1	Experimente: Aufgabe	204
13.5.2	Bewegungsgleichungen	204
13.5.3	Erzwungene Schwingungen	205
13.6	Aufgaben	213

14	Rotorsysteme	217
14.1	Die einfach besetzte Welle auf nachgiebigen Lagern	217
14.1.1	Das System	217
14.1.2	Das Modell	218
14.1.3	Numerische Beispiele	220
14.2	Rotoren mit aufgesetztem Kreisel	231
14.2.1	Kreiselwirkungen	231
14.2.2	Anwendungsbeispiel	236
14.2.3	Reelle Form der Kreisel-Bewegungsgleichungen	244
14.3	Aufgaben	246
Teil IV Kontinua mit einem funktionalen Freiheitsgrad		
15	Mitschwingen der Wellenmasse bei Drehschwingungen	251
15.1	Aufgabenstellung	251
15.2	Freie Schwingungen	251
15.2.1	Herleiten der partiellen Dgl für die Drehschwingungen der Welle	251
15.2.2	Untersuchung der freien Schwingungen	253
15.2.3	Eigenlösungen	257
15.3	Erzwungene Schwingungen	259
15.4	Aufgaben	262
16	Diskretisieren des Kontinuums	265
16.1	Allgemeines	265
16.2	Das Arbeiten mit globalen Ansatzfunktionen	266
16.2.1	Vorbereitung für Lagrange-Gleichungen	266
16.2.2	Lagrange-Formalismus	268
16.2.3	Eigenschwingungen (Zahlenbeispiel)	269
16.3	Das Arbeiten mit lokalen Ansatzfunktionen	270
16.3.1	Die Ausgangsgleichungen	270
16.3.2	Ansatzfunktionen	270
16.3.3	Formales Auswerten der Integrale	272
16.3.4	Zahlenbeispiel	276
16.4	Aufgaben	277
17	Balken-Biegeschwingungen	279
17.1	Aufgabe: Schwingungen einer Kranbrücke	279
17.2	Die partiellen Differentialgleichungen der Balkenbiegung	280
17.2.1	Herleiten der Differentialgleichungen	280
17.2.2	Randbedingungen	281
17.3	Eigenschwingungen der Kranbrücke	283

17.3.1	Bereichsweise Wahl der Längskoordinate	283
17.3.2	Lösen der partiellen Differentialgleichung	284
17.3.3	Zwei kleine Orientierungsaufgaben	286
17.3.4	Rand- und Übergangsbedingungen bei der Kranbrücke	290
17.3.5	Das Eigenwertproblem	292
17.4	Diskretisieren des Kontinuums Balken	296
17.4.1	Das Arbeiten mit globalen Ansatzfunktionen	296
17.5	Schwingungen der Kranbrücke nach dem Lastabfall	301
17.5.1	Untersuchung des Lastabfalls mit globalen Ansatzfunktionen	301
17.5.2	Untersuchungen des Lastabfalls mit den Eigenschwingungen des Balkens als Kontinuum	302
17.6	Aufgaben	306

Teil V Lösungen

18	Lösungen	311
18.1	Lösungen zu Kap. 1	311
18.2	Lösungen zu Kap. 2	326
18.3	Lösungen zu Kap. 3	329
18.4	Lösungen zu Kap. 4	336
18.5	Lösungen zu Kap. 5	351
18.6	Lösungen zu Kap. 6	362
18.7	Lösungen zu Kap. 7	381
18.8	Lösungen zu Kap. 8	387
18.9	Lösungen zu Kap. 9	398
18.10	Lösungen zu Kap. 10	410
18.11	Lösungen zu Kap. 11	418
18.12	Lösungen zu Kap. 12	440
18.13	Lösungen zu Kap. 13	449
18.14	Lösungen zu Kap. 14	476
18.15	Lösungen zu Kap. 15	484
18.16	Lösungen zu Kap. 16	491
18.17	Lösungen zu Kap. 17	501
A	Einige Grundlagen aus der Kinetik	513
B	Arbeitsaussagen aus der Elastostatik	555
C	Energieverfahren	577
D	Hinweise zu Schreibweisen	585
	Literatur	593
	Sachverzeichnis	597