

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Definition einer Schwingung	2
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	9
1.3.1	Definition	9
1.3.2	Manipulation periodischer Funktionen	10
1.3.3	Harmonische Synthese	11
1.3.4	Harmonische Analyse periodischer Schwingungen	11
1.3.5	Zeitliche Mittelwerte und besondere Bezeichnungen	18
1.4	Nichtperiodische Schwingung	19
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	32
2.2.4	Beschaffen der Systemparameter	33

XI

2.2.5	Rechnerprogramm	33
2.2.6	Rechenergebnis/Interpretation	33
2.2.7	Aufzeichnung	34
2.3	Aufgaben	34
3	Auswuchten starrer Rotoren	35
3.1	Aufgabenstellung	35
3.2	Modell	36
3.3	Gleichgewichtsbedingungen	37
3.3.1	Lageplan, Koordinaten, Kinematik	37
3.3.2	Schwerpunktbeschleunigung und Drall	38
3.3.3	Lagerkräfte	39
3.4	Diskussion der Lagerkräfte infolge Unwucht	40
3.5	Das Wuchten	42
3.6	Aufgaben	43
 Teil II Schwinger mit einem Freiheitsgrad		
4	Vertikalschwingungen eines Paares gekoppelter Exzenterpressen	49
4.1	Aufgabenstellung	49
4.2	Modell	50
4.2.1	Vereinfachende Annahmen	50
4.2.2	Die Stütz- oder Federelemente	51
4.2.3	Ersatzsystem	52
4.3	Massenkräfte	53
4.3.1	Allgemeine Bemerkungen zu den Massenkräften	53
4.3.2	Kinematik der Relativbewegungen	54
4.3.3	Kinetik der Relativbewegungen	55
4.4	Schwingungserregung durch bewegte Massen	56
4.4.1	Reduktion der Erregerkräfte	56
4.4.2	Zeitverlauf der Erregung; Fourier-Zerlegung	57
4.5	Gleichgewichtsbedingungen und Bewegungs-Differentialgleichung	59
4.5.1	Gleichgewicht	59
4.5.2	Die Bewegungs-(Differential-)Gleichung	60
4.6	Allgemeine Aussagen; Ergänzende Hinweise	61
4.6.1	Benennungen	61
4.6.2	Überlagerung von Lösungen	62
4.6.3	Schwinger mit negativer Dämpfung	62
4.6.4	Pendel als nichtlineare Schwinger	63
4.6.5	Allgemeine Bewegungsgleichung	64

4.7	Dimensionslose Schreibweise von Differentialgleichungen	65
4.7.1	Vorgabe von Bezugsgrößen	65
4.7.2	Systematische Bestimmung systemeigner Bezugsgrößen	66
4.8	Aufgaben	67
5	Freie Schwingungen	71
5.1	Bewegungsgleichung; Bemerkungen zur Nomenklatur	71
5.2	Lösen der Differentialgleichung	72
5.3	Ausdeuten der Lösung	73
5.3.1	Ungedämpfte Schwingung	73
5.3.2	Gedämpfte Schwingungen	75
5.4	Aufgaben	77
6	Erzwungene Schwingungen	79
6.1	Allgemeine Aussagen	79
6.2	Erzwungene harmonische Schwingungen	80
6.2.1	Komplexe Schreibweise der Bewegungsgleichung	80
6.2.2	Berechnen der erzwungenen Schwingung	81
6.2.3	Diagramme für Amplitudengang, Phasengang, Vergrößerungsfunktion	85
6.2.4	Der Frequenzgang der Übertragungsfunktion	88
6.2.5	Seismische Schwingungsaufnehmer	88
6.3	Das Arbeiten mit Stoßerregung und Stoßantwort	92
6.3.1	Die Delta-Funktion	92
6.3.2	Erregung durch einen Kraftstoß	93
6.3.3	Erregerkraft als Stoßfolge	95
6.4	Aufgaben	96
7	Erzwungene Schwingungen der Exzenterpressen	99
7.1	Wirkung der relativ bewegten Massen auf die Rahmenauslenkung	100
7.2	Wirkung der bewegten Bodenplatte	103
7.3	Wirkung der bewegten Massen auf den Boden	105
7.4	Aufgaben	106
8	Einschwing- und Anlaufvorgänge	109
8.1	Einschwingvorgänge	110
8.1.1	Allgemeine Lösung der Bewegungsgleichung; Anpassen an die Anfangsbedingungen	110
8.1.2	Einschwingvorgang	111
8.2	Anlauf einer Erregung	112
8.2.1	Vorüberlegungen	112
8.2.2	Berechnen einer Einhüllenden	113

8.2.3	Erregeranlauf mit Resonanzdurchfahrt	115
8.2.4	Anlauf bei Unwuchterregung	117
8.3	Aufgaben	119

Teil III Diskrete Schwinger mit zwei und mehr Freiheitsgraden

9	Schwinger mit zwei Freiheitsgraden	123
9.1	Beispiele für Schwinger mit zwei Freiheitsgraden	124
9.2	Freie Schwingungen	125
9.2.1	Aufstellen der Bewegungsgleichungen	125
9.2.2	Matrizenschreibweise der Bewegungsgleichungen	126
9.2.3	Koppelglieder in den Bewegungsgleichungen	127
9.3	Lösen der Bewegungsgleichungen	128
9.3.1	Formelmäßiges Vorgehen	128
9.3.2	Freie Schwingungen: Zweimassenschwinger	130
9.3.3	Zahlenbeispiel	132
9.3.4	Freie Schwingungen: Torsionsschwinger	133
9.4	Erzwungene Schwingungen	134
9.4.1	Aufstellen der Bewegungsgleichungen	134
9.4.2	Erzwungene Schwingungen bei harmonischer Erregung	135
9.4.3	Erzwungene Schwingungen: Zweimassenschwinger	136
9.4.4	Erzwungene Schwingungen: Torsionsschwinger	138
9.5	Aufgaben	140
10	Modaltransformation als Hilfsmittel zur Schwingungsanalyse	143
10.1	Orthogonalität der Eigenschwingungsformen	144
10.1.1	Orthogonalitätsnachweis	144
10.1.2	Die Modalmatrix	146
10.1.3	Normieren	146
10.1.4	Orthogonalisieren	147
10.2	Transformation der Schwingungsgleichung auf Modalkoordinaten	147
10.3	Anwendungsbeispiel: Dämpfungsfreie erzwungene harmonische Schwingung	148
10.4	Anwendungsbeispiel Rayleigh-Dämpfung	149
10.5	Aufgaben	149
11	Dreh- und Torsionsschwingungen	151
11.1	Aufgabenstellung, Symbole	152
11.2	Drehschwingungen eines Systems mit einer Übersetzung	153
11.2.1	Aufstellen der Bewegungsgleichungen nach Lagrange	154
11.2.2	Lösen des Eigenwertproblems	156
11.2.3	Darstellung der Schwingungsformen	157

11.3	Reduktion von Drehschwingern mit Übersetzungen auf eine Welle	158
11.3.1	Reduktion des Drehschwingers auf die Welle 1	158
11.4	Erzwungene Drehschwingungen	159
11.4.1	Bewegungsgleichungen (nach Lagrange)	160
11.4.2	Zahlenbeispiel	162
11.5	Aufgaben	166
12	Der starr gelagerte Rotor mit einfacher Durchbiegung	169
12.1	Aufgabenstellung	169
12.2	Modell	170
12.3	Bewegungsgleichungen	171
12.3.1	Rotormasse	172
12.3.2	Rotorsteifigkeit	174
12.3.3	Dämpfungen	178
12.3.4	Bewegungsgleichungen	182
12.4	Erzwungene Schwingungen	182
12.4.1	Gewichtseinfluss	182
12.4.2	Unwuchteinfluss	184
12.5	Freie Schwingungen	185
12.6	Schlüsse aus den Untersuchungen	187
12.7	Aufgaben	189
13	Anisotrope Lagerungen	193
13.1	Aufgabenstellung	194
13.2	Modell	194
13.3	Steifigkeit des Lagerbocks	195
13.3.1	Berechnen der Lagersteifigkeiten nach dem ersten Satz von Castigliano (vgl. Anhang, Abschn. B.4)	195
13.3.2	Einbau eines Versteifungselements – der zweite Satz von Castigliano	198
13.4	Eigenschwingungen des Lagerbocks mit angehängter Masse	200
13.4.1	Modell und Bewegungsgleichungen	201
13.4.2	Eigenschwingungen des Lagerbocks	202
13.4.3	Der Einfluss von Dämpfung auf die Eigenschwingungen – allgemein	204
13.4.4	Schwach gedämpfte Eigenschwingungen des Lagerbocks	206
13.5	Erzwungene Schwingungen des Lagerbocks	208
13.5.1	Experimente: Aufgabe	208
13.5.2	Bewegungsgleichungen	209
13.5.3	Erzwungene Schwingungen	209
13.6	Aufgaben	217

14 Rotorsysteme	221
14.1 Die einfach besetzte Welle auf nachgiebigen Lagern	222
14.1.1 Das System	222
14.1.2 Das Modell	222
14.1.3 Numerische Beispiele	225
14.2 Rotoren mit aufgesetztem Kreisel	236
14.2.1 Kreiselwirkungen	236
14.2.2 Anwendungsbeispiel	241
14.2.3 Reelle Form der Kreisel-Bewegungsgleichungen	249
14.3 Aufgaben	251

Teil IV Kontinua mit einem funktionalen Freiheitsgrad

15 Mitschwingen der Wellenmasse bei Drehschwingungen	257
15.1 Aufgabenstellung	258
15.2 Freie Schwingungen	258
15.2.1 Herleiten der partiellen Dgl für die Drehschwingungen der Welle	258
15.2.2 Untersuchung der freien Schwingungen	260
15.2.3 Eigenlösungen	264
15.3 Erzwungene Schwingungen	266
15.4 Aufgaben	269
16 Diskretisieren des Kontinuums	271
16.1 Allgemeines	271
16.2 Das Arbeiten mit globalen Ansatzfunktionen	272
16.2.1 Vorbereitung für Lagrange-Gleichungen	273
16.2.2 Lagrange-Formalismus	275
16.2.3 Eigenschwingungen (dimensionsloses Zahlenbeispiel)	276
16.3 Das Arbeiten mit lokalen Ansatzfunktionen	277
16.3.1 Die Ausgangsgleichungen	277
16.3.2 Ansatzfunktionen	277
16.3.3 Formales Auswerten der Integrale	279
16.3.4 Zahlenbeispiel	282
16.4 Aufgaben	283
17 Balken-Biegeschwingungen	287
17.1 Aufgabe: Schwingungen einer Kranbrücke	287
17.2 Die partiellen Differentialgleichungen der Balkenbiegung	288
17.2.1 Herleiten der Differentialgleichungen	288
17.2.2 Randbedingungen	290

17.3	Eigenschwingungen der Kranbrücke	291
17.3.1	Bereichsweise Wahl der Längskoordinate	291
17.3.2	Lösen der partiellen Differentialgleichung	293
17.3.3	Zwei kleine Orientierungsaufgaben	294
17.3.4	Rand- und Übergangsbedingungen bei der Kranbrücke	298
17.3.5	Das Eigenwertproblem	300
17.4	Diskretisieren des Kontinuums Balken	304
17.4.1	Das Arbeiten mit globalen Ansatzfunktionen	304
17.5	Schwingungen der Kranbrücke nach dem Lastabfall	309
17.5.1	Untersuchung des Lastabfalls mit globalen Ansatzfunktionen . . .	309
17.5.2	Untersuchungen des Lastabfalls mit den Eigenschwingungen des Balkens als Kontinuum	310
17.6	Aufgaben	314
A	Einige Grundlagen aus der Kinetik	317
B	Arbeitsaussagen aus der Elastostatik	345
C	Energieverfahren	359
D	Hinweise und Bezeichnungen	367
	Literatur	377
	Sachverzeichnis	381