

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgaben und Gliederung der Maschinendynamik</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Modellbildung und Kennwertermittlung</b>	<b>7</b>
2.1	Einteilung der Berechnungsmodelle	7
2.1.1	Allgemeine Grundsätze	7
2.1.2	Beispiele	13
2.2	Bestimmung von Masse und Trägheitskennwerten	17
2.2.1	Masse und Schwerpunktlage	18
2.2.2	Trägheitsmoment bezüglich einer Achse	20
2.2.3	Trägheitstensor	26
2.3	Federkennwerte	29
2.3.1	Maschinenelemente, Baugruppen	32
2.3.2	Gummifedern	40
2.3.3	Aufgaben A2.1 bis A2.3	43
2.3.4	Lösungen L2.1 bis L2.3	44
2.4	Dämpfungskennwerte	47
2.4.1	Bestimmungsmethoden für Dämpfungskennwerte	54
2.4.2	Erfahrungswerte zur Dämpfung	57
2.5	Erregerkennwerte	61
2.5.1	Periodische Erregung	61
2.5.2	Instationäre Erregung	65
2.5.3	Stochastische Erregung	69
2.5.4	Aufgaben A2.4 bis A2.6	72
2.5.5	Lösungen L2.4 bis L2.6	73
<b>3</b>	<b>Dynamik der starren Maschine</b>	<b>77</b>
3.1	Zur Kinematik eines starren Körpers	78
3.1.1	Koordinatentransformationen	78
3.1.2	Bewegungsgrößen	83
3.1.3	Kinematik des kardanisch gelagerten Kreisel	86
3.1.4	Aufgaben A3.1 und A3.2	88

IX

3.1.5	Lösungen L3.1 und L3.2 .....	90
3.2	Kinetik des starren Körpers .....	94
3.2.1	Schwerpunkt, Kinetische Energie und Trägheitstensor .....	94
3.2.2	Kräftesatz und Momentensatz .....	99
3.2.3	Zur Kinetik des Kollergangs .....	103
3.2.4	Aufgaben A3.3 und A3.4 .....	107
3.2.5	Lösungen L3.3 und L3.4 .....	109
3.3	Zur Kinetik der Mehrkörpersysteme .....	115
3.3.1	Mechanismen mit mehreren Antrieben .....	115
3.3.2	Ebene Mechanismen .....	129
3.3.3	Bewegungszustände der starren Maschine .....	139
3.3.4	Lösung der Bewegungsgleichungen .....	141
3.3.5	Beispiel: Pressenantrieb .....	145
3.3.6	Aufgaben A3.5 bis A3.8 .....	149
3.3.7	Lösungen L3.5 bis L3.8 .....	153
3.4	Gelenkkräfte und Fundamentbelastung .....	159
3.4.1	Allgemeine Zusammenhänge .....	159
3.4.2	Berechnung der Gelenkkräfte .....	161
3.4.3	Berechnung der auf das Gestell wirkenden Kraftgrößen .....	164
3.4.4	Gelenkkräfte im Koppelgetriebe einer Verarbeitungsmaschine .....	166
3.4.5	Aufgaben A3.9 und A3.10 .....	168
3.4.6	Lösungen L3.9 und L3.10 .....	170
3.5	Methoden des Massenausgleichs .....	172
3.5.1	Auswuchten starrer Rotoren .....	173
3.5.2	Massenausgleich von ebenen Mechanismen .....	179
3.5.3	Aufgaben A3.11 bis A3.14 .....	188
3.5.4	Lösungen L3.11 bis L3.14 .....	191
<b>4</b>	<b>Fundamentierung und Schwingungsisolierung .....</b>	<b>199</b>
4.1	Vorbemerkungen .....	199
4.2	Fundamentbelastung bei periodischer Erregung .....	203
4.2.1	Minimalmodelle mit einem Freiheitsgrad .....	204
4.2.2	Blockfundamente .....	214
4.2.3	Fundament mit zwei Freiheitsgraden – Schwingungstilgung .....	223
4.2.4	Beispiel: Schwingungen eines Motor-Generator-Aggregates .....	228
4.2.5	Aufgaben A4.1 bis A4.3 .....	231
4.2.6	Lösungen der Aufgaben L4.1 bis L4.3 .....	233
4.3	Fundamente unter Stoßbelastung .....	237
4.3.1	Zur Modellbildung von Schmiedehämmern .....	237

4.3.2	Berechnungsmodell mit zwei Freiheitsgraden .....	239
4.3.3	Aufgaben A4.4 bis A4.6 .....	242
4.3.4	Lösungen L4.4 bis L4.6 .....	244
<b>5</b>	<b>Torsionsschwinger und Schwingerketten .....</b>	<b>251</b>
5.1	Kinetostatische Analyse .....	253
5.2	Bewegungsgleichungen von Torsionsschwingungssystemen .....	254
5.2.1	Reduktion eines Torsionsschwingers .....	255
5.2.2	Bildwelle .....	256
5.2.3	Schwingerkette mit mehreren Freiheitsgraden .....	257
5.3	Freie Schwingungen der Torsionsschwinger .....	258
5.3.1	Eigenfrequenzen und Eigenformen .....	259
5.3.2	Modelle mit zwei Freiheitsgraden .....	262
5.3.3	Umrechnung anderer Maschinensysteme auf eine Torsionsschwingerkette .....	268
5.3.4	Zur Bewertung von Eigenfrequenzen und Eigenformen .....	270
5.3.5	Torsionsschwinger mit kontinuierlichen Wellen .....	272
5.3.6	Beispiele .....	274
5.3.7	Aufgaben A5.1 bis A5.3 .....	282
5.3.8	Lösungen L5.1 bis L5.3 .....	285
5.4	Erzwungene Schwingungen von Torsionsschwingern .....	292
5.4.1	Periodische Erregung .....	293
5.4.2	Beispiele .....	296
5.4.3	Transiente Erregung .....	306
5.4.4	Aufgaben A5.4 bis A5.7 .....	312
5.4.5	Lösungen L5.4 bis L5.7 .....	315
5.5	Tilger und Dämpfer in Antriebssystemen .....	321
5.5.1	Einleitung .....	321
5.5.2	Auslegung eines gedämpften Tilgers .....	322
5.5.3	Auslegung eines federlosen Dämpfers .....	326
5.5.4	Bemerkungen zur aktiven Schwingungsisolierung .....	329
5.5.5	Beispiele .....	330
5.5.6	Aufgabe A5.8 und Lösung L5.8 .....	334
<b>6</b>	<b>Lineare Systeme mit mehreren Freiheitsgraden: Modellbildung und freie Schwingungen .....</b>	<b>337</b>
6.1	Bewegungsgleichungen .....	340
6.1.1	Massen-, Feder- und Nachgiebigkeitsmatrix .....	340
6.1.2	Beispiele .....	348
6.1.3	Aufgaben A6.1 bis A6.3 .....	362
6.1.4	Lösungen L6.1 bis L6.3 .....	363
6.2	Ungedämpfte Schwingungen .....	366

6.2.1	Eigenfrequenzen, Eigenformen, Eigenkräfte .....	366
6.2.2	Orthogonalität und modale Koordinaten .....	369
6.2.3	Freie Schwingungen aus Anfangsbedingungen .....	371
6.2.4	Anfangsenergie und Abschätzungen .....	374
6.2.5	Beispiele .....	375
6.2.6	Aufgaben A6.4 bis A6.7 .....	391
6.2.7	Lösung L6.4 bis L6.7 .....	393
6.3	Gedämpfte Schwingungen .....	398
6.3.1	Zur Erfassung der Dämpfung .....	398
6.3.2	Allgemeine Dämpfung .....	399
6.3.3	Modal gedämpfte freie Schwingungen .....	401
6.3.4	Rayleigh Dämpfung .....	403
6.3.5	Aufgabe A6.8 und Lösung L6.8 .....	404
6.4	Kontinuumsschwingungen des massebelegten Balkens .....	407
6.4.1	Allgemeine Zusammenhänge .....	407
6.4.2	Gerader Balken auf zwei Stützen .....	409
6.4.3	Weitere Einflüsse auf die Balkenschwigung .....	409
6.4.4	Rayleigh-Quotient für kontinuierliche Schwinger .....	413
6.4.5	Aufgaben A6.9 bis A6.10 .....	414
6.4.6	Lösungen A6.9 bis A6.10 .....	415
6.5	Struktur- und Parameteränderungen .....	417
6.5.1	Rayleigh-Quotient für diskrete Systeme .....	417
6.5.2	Sensitivität von Eigenfrequenzen und Eigenformen .....	418
6.5.3	Reduktion von Freiheitsgraden .....	424
6.5.4	Einfluss von Zwangsbedingungen auf Eigenfrequenzen und Eigenformen .....	426
6.5.5	Beispiele zur Reduktion von Freiheitsgraden .....	430
6.5.6	Aufgaben A6.11 bis A6.13 .....	438
6.5.7	Lösungen L6.11 bis L6.13 .....	439
7	<b>Lineare Systeme mit mehreren Freiheitsgraden: Erzwungene Schwingungen</b> .....	447
7.1	Systeme ohne Dämpfung .....	447
7.1.1	Allgemeine Lösung .....	448
7.1.2	Harmonische Erregung (Resonanz, Tilgung) .....	449
7.1.3	Erzwungene Schwingungen des masselosen Balkens .....	451
7.1.4	Harmonische Erregung kontinuierlicher Balken .....	456
7.1.5	Instationäre Erregung (Rechteckstoß) .....	458
7.1.6	Beispiele .....	462
7.1.7	Aufgaben A7.1 bis A7.3 .....	464
7.1.8	Lösungen L7.1 bis L7.3 .....	466
7.2	Gedämpfte Systeme .....	469

7.2.1	Erzwungene Schwingungen bei harmonischer Erregung	469
7.2.2	Stationäre Lösung bei periodischer Erregung	478
7.2.3	Beispiele	481
7.2.4	Aufgaben A7.4 bis A7.6	486
7.2.5	Lösungen L7.4 bis L7.6	488
<b>8</b>	<b>Rotordynamik</b>	<b>491</b>
8.1	Zur Modellbildung von Rotoren	492
8.1.1	Allgemeine Bemerkungen	492
8.1.2	Beispiel: Schleifspindel	495
8.2	Symmetrischer Rotor ohne Kreiselwirkung	496
8.2.1	Modell und Bewegungsgleichung	496
8.2.2	Lösung der Bewegungsgleichung	497
8.2.3	Selbstzentrierung beim symmetrischen Rotor	498
8.2.4	Durchfahren der Resonanzstelle	499
8.3	Laval-Rotor mit Kreiselwirkung	500
8.3.1	Modell und Bewegungsgleichung	500
8.3.2	Bewegungsverhalten des Rotors	503
8.3.3	Beispiel: Eigenfrequenzen einer Milchzentrifuge	508
8.4	Aufgaben 8.1 bis 8.3	513
8.5	Lösungen L8.1 bis L8.3	514
<b>9</b>	<b>Nichtlineare, selbsterregte und parametererregte Schwingungsphänomene</b>	<b>517</b>
9.1	Numerische Integration	519
9.2	Schwinger mit nichtlinearen Rückstellfunktionen	521
9.2.1	Ungedämpfte freie nichtlineare Schwinger mit einem Freiheitsgrad	523
9.2.2	Innere Resonanz bei mehreren Freiheitsgraden	526
9.2.3	Erzwungene Schwingungen	528
9.2.4	Beispiele	532
9.2.5	Aufgaben A9.1 und A9.2	543
9.2.6	Lösungen L9.1 und L9.2	545
9.3	Selbsterregte Schwinger	549
9.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	549
9.3.2	Beispiele	551
9.3.3	Aufgaben A9.3 und A9.4	560
9.3.4	Lösungen L9.3 und L9.4	562
9.4	Parametererregte Schwingungen	565
9.4.1	Allgemeine Problemstellungen	565
9.4.2	Typische Beispiele parametererregter Schwinger	568
9.4.3	Anfachung in einem Zeitintervall	569

---

9.4.4	Die Mathieusche Differenzialgleichung .....	572
9.4.5	Analyse von Beispielen .....	573
<b>10</b>	<b>Beziehungen zur Systemdynamik und Mechatronik .....</b>	<b>583</b>
10.1	Beschreibung allgemeiner linearer Systeme im Zustandsraum .....	584
10.2	Geregelte Systeme .....	587
10.2.1	Allgemeine Zusammenhänge .....	587
10.2.2	Beispiel: Beeinflussung von Gestellschwingungen durch einen Regler .....	590
10.2.3	Verfahren zur Bestimmung der Reglerkonstanten .....	597
<b>11</b>	<b>Regeln für dynamisch günstige Konstruktionen .....</b>	<b>599</b>
<b>Literatur</b>	.....	<b>607</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	.....	<b>611</b>