

# Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Aufgaben und Gliederung der Maschinendynamik</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Modellbildung und Kennwertermittlung</b>	<b>5</b>
1.1	Einteilung der Berechnungsmodelle	5
1.1.1	Allgemeine Grundsätze	5
1.1.2	Beispiele	10
1.2	Bestimmung von Massenkennwerten	14
1.2.1	Übersicht	14
1.2.2	Masse und Schwerpunktlage	15
1.2.3	Trägheitsmoment bezüglich einer Achse	17
1.2.4	Trägheitstensor	22
1.3	Federkennwerte	26
1.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	26
1.3.2	Maschinenelemente, Baugruppen	30
1.3.3	Gummifedern	36
1.3.4	Aufgaben A1.1 bis A1.3	39
1.3.5	Lösungen L1.1 bis L1.3	40
1.4	Dämpfungskennwerte	42
1.4.1	Allgemeine Zusammenhänge	42
1.4.2	Bestimmungsmethoden für Dämpfungskennwerte	48
1.4.3	Erfahrungswerte zur Dämpfung	52
1.5	Erregerkennwerte	56
1.5.1	Periodische Erregung	56
1.5.2	Instationäre Erregung	59
1.5.3	Aufgaben A1.4 bis A1.6	63
1.5.4	Lösungen L1.4 bis L1.6	64
<b>2</b>	<b>Dynamik der starren Maschine</b>	<b>67</b>
2.1	Einleitung	67
2.2	Zur Kinematik eines starren Körpers	68
2.2.1	Koordinatentransformationen	68
2.2.2	Bewegungsgrößen	73
2.2.3	Kinematik des kardanisich gelagerten Kreisels	75
2.2.4	Aufgaben A2.1 und A2.2	76
2.2.5	Lösungen L2.1 und L2.2	77
2.3	Zur Kinetik des starren Körpers	81
2.3.1	Kinetische Energie und Trägheitstensor	81
2.3.2	Kräftesatz und Momentensatz	86

2.3.3	Zur Kinetik des Kollergangs .....	90
2.3.4	Aufgaben A2.3 und A2.4 .....	93
2.3.5	Lösungen L2.3 und L2.4 .....	95
2.4	Zur Kinetik der Mehrkörpersysteme .....	100
2.4.1	Mechanismen mit mehreren Antrieben .....	100
2.4.1.1	Zu räumlichen Starrkörper-Mechanismen .....	100
2.4.1.2	Bewegungsgleichungen eines Planetengetriebes .....	106
2.4.1.3	Kardanisch gelagerter Rotor .....	109
2.4.2	Ebene Mechanismen .....	112
2.4.2.1	Allgemeine Zusammenhänge .....	112
2.4.2.2	Hubwerksgetriebe .....	116
2.4.2.3	Viergelenkgetriebe .....	117
2.4.2.4	Großpresse .....	121
2.4.3	Bewegungszustände der starren Maschine .....	122
2.4.4	Lösung der Bewegungsgleichungen .....	124
2.4.5	Beispiel: Pressenantrieb .....	129
2.4.6	Aufgaben A2.5 bis A2.8 .....	133
2.4.7	Lösungen L2.5 bis L2.8 .....	136
2.5	Gelenkkräfte und Fundamentbelastung .....	141
2.5.1	Allgemeine Zusammenhänge .....	141
2.5.2	Berechnung der Gelenkkräfte .....	142
2.5.3	Berechnung der auf das Gestell wirkenden Kraftgrößen .....	145
2.5.4	Gelenkkräfte im Koppelgetriebe einer Verarbeitungsmaschine .....	148
2.5.5	Aufgaben A2.9 und A2.10 .....	150
2.5.6	Lösungen L2.9 und L2.10 .....	151
2.6	Methoden des Massenausgleichs .....	153
2.6.1	Aufgabenstellung .....	153
2.6.2	Auswuchten starrer Rotoren .....	153
2.6.3	Massenausgleich von ebenen Mechanismen .....	160
2.6.3.1	Vollständiger und harmonischer Ausgleich .....	160
2.6.3.2	Massenausgleich beim Schubkurbelgetriebe .....	163
2.6.3.3	Harmonischer Ausgleich bei Mehrzylindermaschinen .....	165
2.6.4	Aufgaben A2.11 bis A2.14 .....	167
2.6.5	Lösungen L2.11 bis L2.14 .....	170
3	<b>Fundamentierung und Schwingungsisolierung</b> .....	177
3.1	Vorbemerkungen .....	177
3.2	Fundamentbelastung bei periodischer Erregung .....	181
3.2.1	Minimalmodelle mit einem Freiheitsgrad .....	181
3.2.1.1	Modellbeschreibung .....	181
3.2.1.2	Harmonische Erregung .....	184
3.2.1.3	Periodische Erregung/Fourierreihe .....	188
3.2.2	Blockfundamente .....	191
3.2.2.1	Eigenfrequenzen und Eigenformen .....	191
3.2.2.2	Modellzerlegung bei Symmetrie .....	193
3.2.2.3	Ausführungsformen der Blockfundamente .....	196

3.2.3	Fundament mit zwei Freiheitsgraden – Schwingungstilgung	200
3.2.4	Beispiel: Schwingungen eines Motor-Generator-Aggregates	203
3.2.5	Aufgaben A3.1 bis A3.3	206
3.2.6	Lösungen der Aufgaben L3.1 bis L3.3	208
3.3	Fundamente unter Stoßbelastung	211
3.3.1	Zur Modellbildung von Schmiedehämmern	211
3.3.2	Berechnungsmodell mit zwei Freiheitsgraden	213
3.3.3	Aufgaben A3.4 bis A3.6	216
3.3.4	Lösungen L3.4 bis L3.6	218
<b>4</b>	<b>Torsionsschwinger und Längsschwinger</b>	<b>225</b>
4.1	Einleitung	225
4.2	Freie Schwingungen der Torsionsschwinger	230
4.2.1	Modelle mit zwei Freiheitsgraden	230
4.2.1.1	Lineare Torsionsschwinger mit zwei Freiheitsgraden	230
4.2.1.2	Antriebssystem mit Spiel	232
4.2.2	Schwingerkette mit mehreren Freiheitsgraden	236
4.2.3	Zur Bewertung von Eigenfrequenzen und Eigenformen	240
4.2.4	Beispiele	244
4.2.4.1	Vierzylindermotor	244
4.2.4.2	Torsionsschwingungen einer Druckmaschine	246
4.2.4.3	Fahrzeug-Antriebsstrang	249
4.2.5	Aufgaben A4.1 bis A4.3	252
4.2.6	Lösungen L4.1 bis L4.3	254
4.3	Erzwungene Schwingungen diskreter Torsionsschwinger	261
4.3.1	Periodische Erregung	261
4.3.2	Beispiele	265
4.3.2.1	Motorradmotor	265
4.3.2.2	Fahrzeugantrieb mit Zweimassenschwungrad	268
4.3.2.3	Schrittgetriebe mit HS-Kurvenprofil	270
4.3.3	Transiente Erregung	275
4.3.3.1	Sprungfunktion, Rechteckstoß	275
4.3.3.2	Anlauffunktionen	278
4.3.4	Aufgaben A4.4 bis A4.6	280
4.3.5	Lösungen L4.4 bis L4.6	282
4.4	Tilger und Dämpfer in Antriebssystemen	286
4.4.1	Einleitung	286
4.4.2	Auslegung eines gedämpften Tilgers	287
4.4.3	Auslegung eines federlosen Dämpfers	292
4.4.4	Bemerkungen zur aktiven Schwingungsisolierung	294
4.4.5	Beispiele	294
4.4.5.1	Besonderheiten des Viskositäts-Drehschwingungsdämpfers	294
4.4.5.2	Zum Tilgerpendel	296
4.5	Parametererregte Schwingungen	299
4.5.1	Allgemeine Problemstellungen	299

4.5.2	Typische Beispiele parametererregter Schwinger .....	301
4.5.3	Anfachung in einem Zeitintervall .....	302
4.5.4	Folgerungen aus der Mathieschen Differenzialgleichung ..	305
4.5.5	Analyse von Beispielen .....	307
4.5.5.1	Transfer-Manipulator .....	307
4.5.5.2	Veränderliche Zahnsteifigkeit als Schwingungserregung .....	310
4.5.6	Aufgaben A4.7 und A4.8 .....	314
4.5.7	Lösungen L4.7 und L4.8 .....	315
<b>5</b>	<b>Biegeschwinger .....</b>	<b>319</b>
5.1	Zur Entwicklung der Problemstellungen .....	319
5.2	Grundlegende Zusammenhänge .....	320
5.2.1	Selbstzentrierung beim symmetrischen Rotor .....	320
5.2.2	Durchfahren der Resonanzstelle .....	323
5.2.3	Rotierende Welle mit Scheibe (Kreiselwirkung) .....	324
5.2.4	Biegeschwinger mit endlich vielen Freiheitsgraden .....	333
5.2.5	Beispiele .....	338
5.2.5.1	Eigenfrequenzen einer Milchzentrifuge .....	338
5.2.5.2	Aufprallen eines bewegten Balkens .....	343
5.2.6	Aufgaben A5.1 bis A5.3 .....	344
5.2.7	Lösungen L5.1 bis L5.3 .....	346
5.3	Massebelegter Balken .....	347
5.3.1	Allgemeine Zusammenhänge .....	347
5.3.2	Gerader Balken auf zwei Stützen .....	350
5.3.3	Abschätzungen von Dunkerley und Neuber .....	351
5.4	Zur Modellbildung bei Rotoren .....	353
5.4.1	Allgemeine Bemerkungen .....	353
5.4.2	Beispiel: Schleifspindel .....	356
5.5	Aufgaben A5.4 bis A5.6 .....	357
5.6	Lösungen L5.4 bis L5.6 .....	358
<b>6</b>	<b>Lineare Schwinger mit mehreren Freiheitsgraden .....</b>	<b>363</b>
6.1	Einleitung .....	363
6.2	Bewegungsgleichungen .....	366
6.2.1	Massen-, Feder- und Nachgiebigkeitsmatrix .....	366
6.2.2	Beispiele .....	372
6.2.2.1	Gestell/Kraftgrößenmethode .....	372
6.2.2.2	Balkenelement/Deformationsmethode .....	374
6.2.2.3	Fahrzeug/Energiemethode .....	376
6.2.2.4	Tragwerk, bestehend aus Substrukturen .....	377
6.2.3	Aufgaben A6.1 bis A6.3 .....	381
6.2.4	Lösungen L6.1 bis L6.3 .....	382
6.3	Freie ungedämpfte Schwingungen .....	384
6.3.1	Eigenfrequenzen, Eigenformen, Eigenkräfte .....	384
6.3.2	Orthogonalität und modale Koordinaten .....	387
6.3.3	Anfangsbedingungen, Anfangsenergie, Abschätzungen .....	389

6.3.4	Beispiele .....	393
6.3.4.1	Zur Modalanalyse von Maschinen .....	393
6.3.4.2	Stoß auf ein Gestell .....	398
6.3.4.3	Eigenschwingungen eines Tragwerkes .....	403
6.3.5	Aufgaben A6.4 bis A6.6 .....	405
6.3.6	Lösung L6.4 bis L6.6 .....	406
6.4	Struktur- und Parameteränderungen .....	410
6.4.1	Rayleigh-Quotient .....	410
6.4.2	Sensitivität von Eigenfrequenzen und Eigenformen .....	411
6.4.3	Reduktion von Freiheitsgraden .....	416
6.4.4	Einfluss von Zwangsbedingungen auf Eigenfrequenzen und Eigenformen .....	418*
6.4.5	Beispiele zur Reduktion von Freiheitsgraden .....	422
6.4.5.1	Einfaches Gestell (von vier zu zwei) .....	422
6.4.5.2	Textilspindel (zur Sensitivität) .....	423
6.4.5.3	Tragwerk (Reduktion von zehn auf fünf) .....	427
6.4.6	Aufgaben A6.7 bis A6.9 .....	430
6.4.7	Lösungen L6.7 bis L6.9 .....	431
6.5	Erzwungene ungedämpfte Schwingungen .....	437
6.5.1	Allgemeine Lösung .....	437
6.5.2	Harmonische Erregung (Resonanz, Tilgung) .....	438
6.5.3	Instationäre Erregung (Rechteckstoß) .....	443
6.5.4	Beispiele .....	447
6.5.4.1	Gestell .....	447
6.5.4.2	Schwingförderer .....	449
6.5.5	Aufgaben A6.10 bis A6.12 .....	450
6.5.6	Lösungen L6.10 bis L6.12 .....	451
6.6	Gedämpfte Schwingungen .....	454
6.6.1	Zur Erfassung der Dämpfung .....	454
6.6.2	Modal gedämpfte freie Schwingungen .....	456
6.6.3	Erzwungene Schwingungen .....	458
6.6.3.1	Harmonische Erregung modal gedämpfter Schwinger .....	458
6.6.3.2	Harmonische Erregung viskos gedämpfter Schwinger .....	461
6.6.4	Periodische Erregung .....	466
6.6.5	Beispiele .....	469
6.6.5.1	Textilspindel .....	469
6.6.5.2	Riemengetriebe .....	472
6.6.6	Aufgaben A6.13 bis A6.16 .....	475
6.6.7	Lösungen L6.13 bis L6.16 .....	476
7	<b>Einfache nichtlineare und selbsterregte Schwinger</b> .....	481
7.1	Einführung .....	481
7.2	Nichtlineare Schwinger .....	483
7.2.1	Ungedämpfte freie nichtlineare Schwinger .....	483
7.2.2	Innere Resonanz .....	486

7.2.3	Erzwungene Schwingungen .....	488
7.2.3.1	Qualitative Besonderheiten nichtlinearer Schwinger .....	488
7.2.3.2	Erste Harmonische bei nichtlinearer Federung .....	489
7.2.4	Beispiele .....	492
7.2.4.1	Harmonisch erregter viskos gedämpfter Reibschwinger .....	492
7.2.4.2	Schwingförderer mit gestuften Federn .....	493
7.2.4.3	Selbstsynchronisation von Unwuchterregern .....	498
7.2.5	Aufgaben A7.1 und A7.2 .....	502
7.2.6	Lösungen L7.1 und L7.2 .....	503
7.3	Selbsterregte Schwinger .....	508
7.3.1	Allgemeine Zusammenhänge .....	508
7.3.2	Beispiele .....	509
7.3.2.1	Stick-Slip-Schwingungen .....	509
7.3.2.2	Flatterschwingungen einer angeströmten Platte ....	513
7.3.2.3	Rattern von Werkzeugmaschinen bei der Zerspanung .....	515
7.3.3	Aufgaben A7.3 und A7.4 .....	518
7.3.4	Lösungen L7.3 und L7.4 .....	520
8	Regeln für dynamisch günstige Konstruktionen .....	523
9	Beziehungen zur Systemdynamik und Mechatronik .....	529
9.1	Einführung .....	529
9.2	Geregelte Systeme .....	531
9.2.1	Allgemeine Zusammenhänge .....	531
9.2.2	Beispiel: Beeinflussung von Gestellschwingungen durch einen Regler .....	534
9.2.2.1	Analytische Zusammenhänge .....	534
9.2.2.2	Numerisches Beispiel .....	537
	Formelzeichen .....	543
	Literaturverzeichnis .....	547
	Sachverzeichnis .....	549