

Inhaltsverzeichnis

0	Aufgaben und Gliederung der Maschinendynamik	1
1	Modellbildung und Kennwertermittlung	5
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
2	Dynamik der starren Maschine	67
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 kardanisch 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	Fundamentierung und Schwingungsisolierung	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
4	Torsionsschwinger und Längsschwinger	225
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 Mathieuschen Differenzialgleichnung	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
5	Biegeschwinger	319
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
6	Lineare Schwinger mit mehreren Freiheitsgraden	363
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	Einfache nichtlineare und selbsterregte Schwinger	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