

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	51
1.5	Erregerkennwerte	55
1.5.1	Periodische Erregung	55
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	Mehrere Momentensprünge	275
4.3.3.2	Anlauffunktionen	278
4.3.4	Aufgaben A4.4 bis A4.6	281
4.3.5	Lösungen L4.4 bis L4.6	282
4.4	Tilger und Dämpfer in Antriebssystemen	285
4.4.1	Einleitung	285
4.4.2	Auslegung eines federgefedelten Dämpfers	286
4.4.3	Auslegung eines federlosen Dämpfers	291
4.4.4	Bemerkungen zur aktiven Schwingungsisolierung	293
4.4.5	Beispiele	293
4.4.5.1	Besonderheiten des Viskositätsdrehungsdämpfers	293
4.4.5.2	Zum Tilgerpendel	295
4.5	Parametererregte Schwingungen	298
4.5.1	Allgemeine Problemstellungen	298
4.5.2	Typische Beispiele parametererregter Schwinger	300
4.5.3	Anfachung in einem Zeitintervall	301

4.5.4	Folgerungen aus der Mathieuschen Differenzialgleichung ..	304
4.5.5	Analyse von Beispielen	306
4.5.5.1	Transfer-Manipulator	306
4.5.5.2	Veränderliche Zahnsteifigkeit als Schwingungserregung	309
4.5.6	Aufgaben A4.7 und A4.8	313
4.5.7	Lösungen L4.7 und L4.8	314
5	Biegeschwinger	317
5.1	Zur Entwicklung der Problemstellungen	317
5.2	Grundlegende Zusammenhänge	318
5.2.1	Selbstzentrierung beim symmetrischen Rotor	318
5.2.2	Durchfahren der Resonanzstelle	321
5.2.3	Rotierende Welle mit Scheibe (Kreiselwirkung)	322
5.2.4	Biegeschwinger mit endlich vielen Freiheitsgraden	332
5.2.5	Beispiele	336
5.2.5.1	Eigenfrequenzen einer Milchzentrifuge	336
5.2.5.2	Aufprallen eines bewegten Balkens	340
5.2.6	Aufgaben A5.1 bis A5.3	342
5.2.7	Lösungen L5.1 bis L5.3	344
5.3	Massebelegter Balken	345
5.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	345
5.3.2	Gerader Balken auf zwei Stützen	346
5.3.3	Abschätzungen von Dunkerley und Neuber	350
5.4	Zur Modellbildung bei Rotoren	351
5.4.1	Allgemeine Bemerkungen	351
5.4.2	Beispiel: Schleifspindel	354
5.5	Aufgaben A5.4 bis A5.6	355
5.6	Lösungen L5.4 bis L5.6	356
6	Lineare Schwinger mit mehreren Freiheitsgraden	359
6.1	Einleitung	359
6.2	Bewegungsgleichungen	362
6.2.1	Massen-, Feder- und Nachgiebigkeitsmatrix	362
6.2.2	Beispiele	368
6.2.2.1	Gestell/Kraftgrößenmethode	368
6.2.2.2	Balkenelement/Deformationsmethode	370
6.2.2.3	Fahrzeug/Energiemethode	372
6.2.2.4	Tragwerk, bestehend aus Substrukturen	373
6.2.3	Aufgaben A6.1 bis A6.3	376
6.2.4	Lösungen L6.1 bis L6.3	377
6.3	Freie ungedämpfte Schwingungen	380
6.3.1	Eigenfrequenzen, Eigenformen, Eigenkräfte	380
6.3.2	Orthogonalität und modale Koordinaten	383
6.3.3	Anfangsbedingungen, Anfangsenergie, Abschätzungen	386
6.3.4	Beispiele	389
6.3.4.1	Zur Modalanalyse von Maschinen	389

6.3.4.2	Stoß auf ein Gestell	394
6.3.4.3	Eigenschwingungen eines Tragwerkes	399
6.3.5	Aufgaben A6.4 bis A6.6	401
6.3.6	Lösung L6.4 bis L6.6	402
6.4	Struktur- und Parameteränderungen	406
6.4.1	Rayleigh-Quotient	406
6.4.2	Sensitivität von Eigenfrequenzen und Eigenformen	407
6.4.3	Reduktion von Freiheitsgraden	412
6.4.4	Einfluss von Zwangsbedingungen auf Eigenfrequenzen und Eigenformen	414
6.4.5	Beispiele zur Reduktion von Freiheitsgraden	418
6.4.5.1	Einfaches Gestell (von vier zu zwei)	418
6.4.5.2	Textilspindel (zur Sensitivität)	419
6.4.5.3	Tragwerk (Reduktion von zehn auf fünf)	423
6.4.6	Aufgaben A6.7 bis A6.9	426
6.4.7	Lösungen L6.7 bis L6.9	427
6.5	Erzwungene ungedämpfte Schwingungen	433
6.5.1	Allgemeine Lösung	433
6.5.2	Harmonische Erregung (Resonanz, Tilgung)	434
6.5.3	Instationäre Erregung (Rechteckstoß)	440
6.5.4	Beispiele	444
6.5.4.1	Gestell	444
6.5.4.2	Schwingförderer	446
6.5.5	Aufgaben A6.10 bis A6.12	447
6.5.6	Lösungen L6.10 bis L6.12	448
6.6	Gedämpfte Schwingungen	450
6.6.1	Zur Erfassung der Dämpfung	450
6.6.2	Modal gedämpfte freie Schwingungen	452
6.6.3	Harmonische Erregung	454
6.6.3.1	Modal gedämpfte Schwingungen	454
6.6.3.2	Viskos gedämpfte Schwingungen	456
6.6.4	Periodische Erregung	461
6.6.5	Beispiele	464
6.6.5.1	Textilspindel	464
6.6.5.2	Riemengetriebe	466
6.6.6	Aufgaben A6.13 bis A6.16	469
6.6.7	Lösungen L6.13 bis L6.16	470
7	Einfache nichtlineare und selbsterregte Schwinger	475
7.1	Einführung	475
7.2	Nichtlineare Schwinger	478
7.2.1	Ungedämpfte freie nichtlineare Schwinger	478
7.2.2	Erzwungene Schwingungen bei harmonischer Erregung	481
7.2.2.1	Erste Harmonische bei nichtlinearer Federung	481
7.2.2.2	Superharmonische und Subharmonische beim ungedämpften Duffing-Schwinger	483

7.2.2.3	Harmonisch erregter viskos gedämpfter Reibschwinger	486
7.2.3	Beispiele	487
7.2.3.1	Schwingförderer mit gestuften Federn	487
7.2.3.2	Hochlauf und Bremsen einer Verarbeitungsmaschine mit nichtlinearer Kupplung	492
7.2.3.3	Selbstsynchronisation von Unwuchterregern	495
7.2.4	Aufgaben A7.1 und A7.2	498
7.2.5	Lösungen L7.1 und L7.2	499
7.3	Selbsterregte Schwinger	501
7.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	501
7.3.2	Beispiele	502
7.3.2.1	Stick-Slip-Schwingungen	502
7.3.2.2	Flatterschwingungen einer angeströmten Platte	506
7.3.2.3	Rattern von Werkzeugmaschinen bei der Zerspanung	508
7.3.3	Aufgaben A7.3 und A7.4	511
7.3.4	Lösungen L7.3 und L7.4	513
8	Regeln für dynamisch günstige Konstruktionen	517
9	Beziehungen zur Systemdynamik und Mechatronik	523
9.1	Einführung	523
9.2	Geregelte Systeme	525
9.2.1	Allgemeine Zusammenhänge	525
9.2.2	Beispiel: Beeinflussung von Gestellschwingungen durch einen Regler	528
9.2.2.1	Analytische Zusammenhänge	528
9.2.2.2	Numerisches Beispiel	531
	Formelzeichen	537
	Literaturverzeichnis	541
	Sachverzeichnis	543