

Hans Dresig · Franz Holzweißig

# Maschinendynamik

8., neu bearbeitete Auflage

Unter Mitarbeit von L. Rockhausen

Mit 235 Abbildungen und 38 Tabellen

# Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Aufgaben und Gliederung der Maschinendynamik</b>	1
<b>1</b>	<b>Modellbildung und Kennwertermittlung</b>	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 um eine Achse	17
1.2.4	Trägheitstensor	21
1.3	Federkennwerte	25
1.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	25
1.3.2	Maschinenelemente, Baugruppen	29
1.3.3	Gummifedern	35
1.3.4	Aufgaben A1.1 bis A1.3	37
1.3.5	Lösungen L1.1 bis L1.3	39
1.4	Dämpfungskennwerte	41
1.4.1	Allgemeine Zusammenhänge	41
1.4.2	Bestimmungsmethoden für Dämpfungskennwerte	47
1.4.3	Erfahrungswerte zur Dämpfung	50
1.5	Erregerkennwerte	54
1.5.1	Periodische Erregung	54
1.5.2	Nichtperiodische Erregung	57
1.5.3	Aufgaben A1.4 bis A1.6	61
1.5.4	Lösungen L1.4 bis L1.6	62
<b>2</b>	<b>Dynamik der starren Maschine</b>	65
2.1	Einleitung	65
2.2	Zur Kinematik eines starren Körpers	66
2.2.1	Koordinatentransformationen	66
2.2.2	Bewegungsgrößen	71
2.2.3	Kinematik des kardanisch gelagerten Kreisels	73
2.2.4	Aufgaben A2.1 und A2.2	74
2.2.5	Lösungen L2.1 und L2.2	75
2.3	Zur Kinetik des starren Körpers	79
2.3.1	Kinetische Energie und Trägheitstensor	79
2.3.2	Kräftesatz und Momentensatz	84

2.3.3	Kollergang . . . . .	87
2.3.4	Aufgaben A2.3 und A2.4 . . . . .	92
2.3.5	Lösungen L2.3 und L2.4 . . . . .	93
2.4	Zur Kinetik der Mehrkörpersysteme . . . . .	98
2.4.1	Mechanismen mit mehreren Antrieben . . . . .	98
2.4.1.1	Zu räumlichen Starrkörper-Mechanismen . . . . .	98
2.4.1.2	Bewegungsgleichungen eines Planetengetriebes . . . . .	104
2.4.1.3	Kardanisch gelagerter Rotor . . . . .	107
2.4.2	Ebene Mechanismen . . . . .	110
2.4.2.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	110
2.4.2.2	Hubwerksgetriebe . . . . .	114
2.4.2.3	Viergelenkgetriebe . . . . .	115
2.4.2.4	Großpresse . . . . .	118
2.4.3	Bewegungszustände der starren Maschine . . . . .	119
2.4.4	Lösung der Bewegungsgleichungen . . . . .	121
2.4.5	Beispiel: Pressenantrieb . . . . .	126
2.4.6	Aufgaben A2.5 bis A2.8 . . . . .	130
2.4.7	Lösungen L2.5 bis L2.8 . . . . .	133
2.5	Gelenkkräfte und Fundamentbelastung . . . . .	139
2.5.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	139
2.5.2	Berechnung der Gelenkkräfte . . . . .	140
2.5.3	Berechnung der auf das Gestell wirkenden Kraftgrößen . . . . .	143
2.5.4	Gelenkkräfte im Koppelgetriebe einer Verarbeitungsmaschine . . . . .	146
2.5.5	Aufgaben A2.9 und A2.10 . . . . .	148
2.5.6	Lösungen L2.9 und L2.10 . . . . .	149
2.6	Methoden des Massenausgleichs . . . . .	151
2.6.1	Aufgabenstellung . . . . .	151
2.6.2	Auswuchten starrer Rotoren . . . . .	151
2.6.3	Massenausgleich von ebenen Koppelgetrieben . . . . .	158
2.6.3.1	Vollständiger und harmonischer Ausgleich . . . . .	158
2.6.3.2	Massenausgleich beim Schubkurbelgetriebe . . . . .	162
2.6.3.3	Harmonischer Ausgleich bei Mehrzylindermaschinen . . . . .	163
2.6.3.4	Optimaler Massenausgleich . . . . .	165
2.6.4	Aufgaben A2.11 bis A2.14 . . . . .	166
2.6.5	Lösungen L2.11 bis L2.14 . . . . .	168
3	<b>Fundamentierung und Schwingungsisolierung</b> . . . . .	175
3.1	Vorbemerkungen . . . . .	175
3.2	Fundamentbelastung bei periodischer Erregung . . . . .	179
3.2.1	Minimalmodelle mit einem Freiheitsgrad . . . . .	179
3.2.1.1	Modellbeschreibung . . . . .	179
3.2.1.2	Harmonische Erregung . . . . .	182
3.2.1.3	Periodische Erregung/Fourierreihe . . . . .	186
3.2.2	Blockfundamente . . . . .	189
3.2.2.1	Eigenfrequenzen und Eigenformen . . . . .	189
3.2.2.2	Modellzerlegung bei Symmetrie . . . . .	191
3.2.2.3	Ausführungsformen der Blockfundamente . . . . .	194

3.2.3	Fundament mit zwei Freiheitsgraden – Schwingungstilgung . . . . .	197
3.2.4	Beispiel: Schwingungen eines Motor-Generator-Aggregates . . . . .	201
3.2.5	Aufgaben A3.1 bis A3.3 . . . . .	204
3.2.6	Lösungen der Aufgaben L3.1 bis L3.3 . . . . .	206
3.3	Fundamente unter Stoßbelastung . . . . .	208
3.3.1	Zur Modellierung von Schmiedehämmern . . . . .	208
3.3.2	Berechnungsmodell mit zwei Freiheitsgraden . . . . .	210
3.3.3	Periodische Erregung – Kumulationsfaktor . . . . .	213
3.3.4	Aufgaben A3.4 bis A3.6 . . . . .	217
3.3.5	Lösungen L3.4 bis L3.6 . . . . .	218
4	<b>Torsionsschwinger und Schwingerketten . . . . .</b>	223
4.1	Einleitung . . . . .	223
4.2	Freie Schwingungen der Torsionsschwinger . . . . .	228
4.2.1	Modelle mit zwei Freiheitsgraden . . . . .	228
4.2.1.1	Lineare Torsionsschwinger mit zwei Freiheitsgraden . . . . .	228
4.2.1.2	Antriebssystem mit Spiel . . . . .	230
4.2.2	Torsionsschwingerkette mit mehreren Freiheitsgraden . . . . .	234
4.2.3	Zur Bewertung von Eigenfrequenzen und Eigenformen . . . . .	238
4.2.4	Beispiele . . . . .	241
4.2.4.1	Vierzylindermotor . . . . .	241
4.2.4.2	Torsionsschwingungen einer Druckmaschine . . . . .	242
4.2.4.3	Fahrzeug-Antriebsstrang . . . . .	245
4.2.5	Aufgaben A4.1 bis A4.3 . . . . .	248
4.2.6	Lösungen L4.1 bis L4.3 . . . . .	250
4.3	Erzwungene Schwingungen diskreter Torsionsschwinger . . . . .	257
4.3.1	Periodische Erregung . . . . .	257
4.3.2	Beispiele . . . . .	260
4.3.2.1	Motorradmotor . . . . .	260
4.3.2.2	Fahrzeugantrieb mit Zweimassenschwungrad . . . . .	263
4.3.2.3	Schrittgetriebe mit HS-Kurvenprofil . . . . .	266
4.3.3	Transiente Erregung . . . . .	270
4.3.3.1	Mehrere Momentensprünge . . . . .	270
4.3.3.2	Anlauffunktionen . . . . .	273
4.3.4	Aufgaben A4.4 bis A4.6 . . . . .	275
4.3.5	Lösungen L4.4 bis L4.6 . . . . .	277
4.4	Tilger und Dämpfer in Antriebssystemen . . . . .	280
4.4.1	Einleitung . . . . .	280
4.4.2	Auslegung eines ungedämpften Tilgers . . . . .	281
4.4.3	Auslegung eines federgefesselten Dämpfers . . . . .	283
4.4.4	Auslegung eines federlosen Dämpfers . . . . .	287
4.4.5	Beispiele . . . . .	288
4.4.5.1	Besonderheiten des Viskositätsdrehschwingungs-dämpfers . . . . .	288
4.4.5.2	Zum Tilgerpendel . . . . .	289

---

<b>4.5</b>	<b>Parametererregte Schwingungen durch ungleichmäßig übersetzende Getriebe</b>	292
4.5.1	Problemstellung/Bewegungsgleichung	292
4.5.2	Zur Lösung der Bewegungsgleichung, Stabilitätsverhalten	294
4.5.3	Beispiele	296
4.5.3.1	Transfer-Manipulator	296
4.5.3.2	Veränderliche Zahnsteifigkeit als Schwingungserregung	300
4.5.4	Aufgaben A4.7 und A4.8	303
4.5.5	Lösungen L4.7 und L4.8	304
<b>5</b>	<b>Biegeschwinger</b>	307
5.1	Zur Entwicklung der Problemstellungen	307
5.2	Grundlegende Zusammenhänge	308
5.2.1	Selbstzentrierung beim symmetrischen Rotor	308
5.2.2	Durchfahren der Resonanzstelle	311
5.2.3	Rotierende Welle mit Scheibe (Kreiselwirkung)	312
5.2.4	Biegeschwinger mit endlich vielen Freiheitsgraden	321
5.2.5	Beispiele	323
5.2.5.1	Eigenfrequenzen einer Milchzentrifuge	323
5.2.5.2	Aufprallen eines bewegten Balkens	328
5.2.6	Aufgaben A5.1 bis A5.3	329
5.2.7	Lösungen L5.1 bis L5.3	331
5.3	Massebelegter Balken	332
5.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	332
5.3.2	Gerader Balken auf zwei Stützen	339
5.3.3	Abschätzungen von Dunkerley und Neuber	340
5.4	Zur Modellbildung bei Rotoren	341
5.4.1	Allgemeine Bemerkungen	341
5.4.2	Beispiel: Schleifspindel	344
5.5	Aufgaben A5.4 bis A5.6	345
5.6	Lösungen L5.4 bis L5.6	346
<b>6</b>	<b>Lineare Schwinger mit mehreren Freiheitsgraden</b>	349
6.1	Einleitung	349
6.2	Bewegungsgleichungen	352
6.2.1	Massen-, Feder- und Nachgiebigkeitsmatrix	352
6.2.2	Beispiele	357
6.2.2.1	Gestell/Kraftgrößenmethode	357
6.2.2.2	Balkenelement/Deformationsmethode	359
6.2.2.3	Fahrzeug/Energiemethode	361
6.2.2.4	Tragwerk, bestehend aus Substrukturen	362
6.2.3	Aufgaben A6.1 bis A6.3	365
6.2.4	Lösungen L6.1 bis L6.3	366
6.3	Freie ungedämpfte Schwingungen	369
6.3.1	Eigenfrequenzen, Eigenformen, Eigenkräfte	369
6.3.2	Orthogonalität und Hauptkoordinaten	372
6.3.3	Anfangsbedingungen	374

---

6.3.4	Beispiele . . . . .	377
6.3.4.1	Zur Modalanalyse von Maschinen . . . . .	377
6.3.4.2	Stoßauf ein Gestell . . . . .	382
6.3.4.3	Eigenschwingungen eines Tragwerkes . . . . .	387
6.3.5	Aufgaben A6.4 bis A6.6 . . . . .	389
6.3.6	Lösung L6.4 bis L6.6 . . . . .	390
6.4	Struktur- und Parameteränderungen . . . . .	393
6.4.1	Rayleigh-Quotient . . . . .	393
6.4.2	Sensitivität von Eigenfrequenzen und Eigenformen . . . . .	394
6.4.3	Reduktion von Freiheitsgraden . . . . .	398
6.4.4	Einfluss von Zwangsbedingungen auf Eigenfrequenzen und Eigenformen . . . . .	400
6.4.5	Beispiele zur Reduktion von Freiheitsgraden . . . . .	403
6.4.5.1	Einfaches Gestell (von vier zu zwei) . . . . .	403
6.4.5.2	Textilspindel (zur Sensitivität) . . . . .	404
6.4.5.3	Tragwerk (Reduktion von zehn auf fünf) . . . . .	408
6.4.6	Aufgaben A6.7 bis A6.9 . . . . .	411
6.4.7	Lösungen L6.7 bis L6.9 . . . . .	412
6.5	Erzwungene ungedämpfte Schwingungen . . . . .	418
6.5.1	Allgemeine Lösung . . . . .	418
6.5.2	Harmonische Erregung (Resonanz, Tilgung) . . . . .	419
6.5.3	Instationäre Erregung (Rechteckstoß) . . . . .	425
6.5.4	Beispiele . . . . .	429
6.5.4.1	Gestell . . . . .	429
6.5.4.2	Schwingförderer . . . . .	430
6.5.5	Aufgaben A6.10 bis A6.12 . . . . .	431
6.5.6	Lösungen L6.10 bis L6.12 . . . . .	433
6.6	Gedämpfte Schwingungen . . . . .	435
6.6.1	Zur Erfassung der Dämpfung . . . . .	435
6.6.2	Freie gedämpfte Schwingungen . . . . .	436
6.6.3	Harmonische Erregung . . . . .	438
6.6.4	Periodische Erregung . . . . .	444
6.6.5	Beispiele . . . . .	447
6.6.5.1	Textilspindel . . . . .	447
6.6.5.2	Riemengetriebe . . . . .	448
6.6.6	Aufgaben A6.13 bis A6.16 . . . . .	452
6.6.7	Lösungen L6.13 bis L6.16 . . . . .	454
6.7	Beziehungen zur Systemdynamik . . . . .	459
6.7.1	Einige Grundbegriffe . . . . .	459
6.7.2	Zum Superpositionsprinzip . . . . .	461
7	<b>Einfache nichtlineare und selbsterregte Schwinger . . . . .</b>	463
7.1	Einführung . . . . .	463
7.2	Nichtlineare Schwinger . . . . .	465
7.2.1	Ungedämpfte freie nichtlineare Schwinger . . . . .	465
7.2.2	Erzwungene Schwingungen bei harmonischer Erregung . . . . .	468
7.2.2.1	Erste Harmonische bei nichtlinearer Federung . . . . .	468

7.2.2.2	Superharmonische und Subharmonische beim ungedämpften Duffing-Schwinger . . . . .	470
7.2.2.3	Erste Harmonische bei nichtlinearer Dämpfung . . . . .	473
7.2.3	Beispiele . . . . .	476
7.2.3.1	Schwingförderer mit gestuften Federn . . . . .	476
7.2.3.2	Hochlauf und Bremsen einer Verarbeitungsmaschine mit nichtlinearer Kupplung . . . . .	479
7.2.3.3	Selbstsynchronisation von Unwuchterregern . . . . .	482
7.2.4	Aufgaben A7.1 und A7.2 . . . . .	486
7.2.5	Lösungen L7.1 und L7.2 . . . . .	486
7.3	Selbsterregte Schwinger . . . . .	488
7.3.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	488
7.3.2	Beispiele . . . . .	489
7.3.2.1	Stick-Slip-Schwingungen . . . . .	489
7.3.2.2	Flatterschwingungen einer angeströmten Platte . . . . .	493
7.3.2.3	Rattern von Werkzeugmaschinen bei der Zerspanung . . . . .	495
7.3.3	Aufgaben A7.3 und A7.4 . . . . .	498
7.3.4	Lösungen L7.3 und L7.4 . . . . .	499
<b>8</b>	<b>Regeln für dynamisch günstige Konstruktionen</b> . . . . .	503
<b>Formelzeichen</b> . . . . .	509	
<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	513	
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	515	