

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgaben und Gliederung der Maschinendynamik	1
2	Modellbildung und Kennwertermittlung	7
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
3	Dynamik der starren Maschine	77
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 Kreisels	86
3.1.4	Aufgaben A3.1 und A3.2	88

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
4	Fundamentierung und Schwingungsisolierung	199
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
5	Torsionsschwinger und Schwingerketten	251
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
6	Lineare Systeme mit mehreren Freiheitsgraden: Modellbildung und freie Schwingungen	337
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 Balkenschwiegung	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	Lineare Systeme mit mehreren Freiheitsgraden: Erzwungene Schwingungen	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
8	Rotordynamik	491
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
9	Nichtlineare, selbsterregte und parametererregte Schwingungsphänomene	517
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 Differenzialgleichnung	572
9.4.5	Analyse von Beispielen	573
10	Beziehungen zur Systemdynamik und Mechatronik	583
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
11	Regeln für dynamisch günstige Konstruktionen	599
Literatur		607
Stichwortverzeichnis		611