

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	1
1.1 Aufgabenstellungen der Dynamik .....	1
1.2 Einige Meilensteine in der Geschichte der Dynamik .....	3
1.3 Einteilung und Inhalte des Buches .....	5
1.4 Ziele des Buches .....	6
<b>2 Die Kinematik des Punktes</b> .....	9
2.1 Die geradlinige Bewegung von Punkten .....	9
2.1.1 Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung .....	9
2.1.2 Integrationsaufgaben .....	14
2.1.3 Die sechs Grundaufgaben der Punktkinematik .....	16
2.1.4 Aufgaben zu Abschnitt 2.1 .....	21
2.2 Die räumliche Bewegung von Punkten .....	26
2.2.1 Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung .....	26
2.2.2 Raumfeste kartesische Koordinaten .....	28
2.2.3 Zylinderkoordinaten .....	31
2.2.4 Natürliche Koordinaten .....	37
2.2.5 Zusammenfassung zu den verschiedenen Koordinatensystemen .....	45
2.2.6 Aufgaben zu Abschnitt 2.2 .....	46
2.3 Kreisbewegungen von Punkten um feste und momentane Achsen .....	51
2.3.1 Kreisbewegungen um feste Achsen in mitrotierenden kartesischen Koordinaten .....	51
2.3.2 Kreisbewegungen um momentane richtungstreue Achsen .....	55
2.3.3 Kreisbewegungen um momentane Achsen mit Richtungsänderungen ..	59
2.3.4 Aufgaben zu Abschnitt 2.3 .....	64
<b>3 Kinetik des Massenpunktes</b> .....	69
3.1 Die drei Newtonschen Axiome der klassischen Mechanik .....	69
3.2 Das dynamische Grundgesetz für den Massenpunkt .....	71
3.2.1 Vektorielle Formulierung des dynamischen Grundgesetzes und Ersatzmodell .....	71
3.2.2 Das dynamische Grundgesetz in raumfesten kartesischen Koordinaten	73

3.2.3	Lösungsschritte für Aufgaben der Kinetik .....	74
3.2.4	Geführte Bewegungen .....	78
3.2.5	Das dynamische Grundgesetz in Zylinderkoordinaten .....	79
3.2.6	Das dynamische Grundgesetz in natürlichen Koordinaten .....	82
3.2.7	Das dynamische Grundgesetz in mitrotierenden kartesischen Koordinaten .....	84
3.2.8	Zusammenfassung zu den verschiedenen Koordinatensystemen .....	85
3.2.9	Aufgaben zu Abschnitt 3.2 .....	85
3.3	Kraftgesetze der Kinetik .....	89
3.3.1	Einteilung von Kräften .....	89
3.3.2	Das lineare Kraftgesetz für Federn .....	90
3.3.3	Das lineare Kraftgesetz für Dämpfer .....	90
3.3.4	Das Reibungsgesetz nach Coulomb .....	91
3.3.5	Der Rollwiderstand am Rad .....	92
3.3.6	Kraftgesetze für Bewegungen in einem fluiden Medium .....	94
3.3.7	Lösungen für geschwindigkeitsabhängige Beschleunigungen .....	97
3.3.8	Das Gravitationsgesetz .....	100
3.3.9	Die Keplerschen Gesetze .....	103
3.3.10	Aufgaben zu Abschnitt 3.3 .....	106
3.4	Das Prinzip von d'Alembert .....	110
3.4.1	Kräfte- und Momentengleichgewichtsbedingungen .....	110
3.4.2	Zentrifugalkräfte .....	111
3.4.3	Aufgaben zu Abschnitt 3.4 .....	113
4	<b>Der Arbeitssatz und der Energiesatz für den Massenpunkt .....</b>	115
4.1	Die Arbeit einer Kraft entlang einer Bahn .....	115
4.1.1	Vorbetrachtungen zum Arbeitsbegriff .....	115
4.1.2	Berechnung der Arbeit im allgemeinen Fall .....	116
4.1.3	Das Arbeitsdifferenzial in raumfesten kartesischen Koordinaten .....	118
4.1.4	Das Arbeitsdifferenzial in Zylinderkoordinaten .....	118
4.1.5	Das Arbeitsdifferenzial in natürlichen Koordinaten .....	118
4.1.6	Das Arbeitsdifferenzial in mitrotierenden kartesischen Koordinaten ..	119
4.1.7	Leistung und Wirkungsgrad .....	125
4.1.8	Arbeit und Leistung bei einer Kreisbewegung .....	127
4.1.9	Aufgaben zu Abschnitt 4.1 .....	128
4.2	Der Arbeitssatz für den Massenpunkt .....	132
4.2.1	Herleitung des Arbeitssatzes .....	132
4.2.2	Aufgaben zu Abschnitt 4.2 .....	133
4.3	Der Energiesatz für Gewichts- und Federkräfte .....	134
4.3.1	Kräfte mit und ohne Potenzialeigenschaften .....	134
4.3.2	Potenzialfunktionen für Gewichts- und Federkräfte .....	135
4.3.3	Herleitung des Energiesatzes für Gewichts- und Federkräfte .....	137
4.3.4	Der Energiesatz für beliebige Systeme .....	138
4.3.5	Aufgaben zu Abschnitt 4.3 .....	141

4.4	Vektoranalysis der Potenzialkräfte .....	147
4.4.1	Eigenschaften von Potenzialkräften .....	148
4.4.2	Der Energiesatz für Potenzialkräfte .....	151
4.4.3	Aufgaben zu Abschnitt 4.4 .....	152
5	<b>Kinematik und Kinetik des Massenpunktsystems .....</b>	155
5.1	Kinematik des Massenpunktsystems .....	155
5.1.1	Kinematische Größen des Schwerpunktes .....	155
5.1.2	<i>Die</i> Winkelgeschwindigkeit des starren Massenpunktsystems .....	158
5.1.3	Aufgaben zu Abschnitt 5.1 .....	162
5.2	Grundlagen der Kinetik für das Massenpunktsystem .....	163
5.3	Der Schwerpunktsatz für das Massenpunktsystem .....	165
5.3.1	Vektorielle Formulierung des Schwerpunktsatzes .....	165
5.3.2	Der Schwerpunktsatz in verschiedenen Koordinatensystemen .....	166
5.3.3	Aufgaben zu Abschnitt 5.3 .....	168
5.4	Der Momentensatz für das Massenpunktsystem .....	169
5.4.1	Der Momentensatz mit dem Beschleunigungsvektor .....	169
5.4.2	Der Momentensatz mit dem Drehimpulsvektor .....	170
5.5	Der Momentensatz für das starre Massenpunktsystem in der Ebene .....	172
5.5.1	Herleitung der skalaren Gleichungen .....	172
5.5.2	Lösungsschritte bei Verwendung des Momentensatzes .....	176
5.5.3	Aufgaben zu Abschnitt 5.5 .....	179
5.6	Der Momentensatz für die Rotation des starren Massenpunktsystems um eine feste Achse .....	182
5.6.1	Herleitung der skalaren Gleichungen .....	182
5.6.2	Bedingungen für einen idealen Rotor und Auswuchten .....	186
5.6.3	Aufgaben zu Abschnitt 5.6 .....	189
5.7	Der Arbeitssatz und der Energiesatz für das Massenpunktsystem .....	191
5.7.1	Herleitung des Arbeitssatzes und des Energiesatzes .....	191
5.7.2	Der Energiesatz für das starre Massenpunktsystem .....	194
5.7.3	Die kinetische Energie für das starre Massenpunktsystem .....	195
5.7.4	Aufgaben zu Abschnitt 5.7 .....	198
6	<b>Kinematik und Kinetik der ebenen Bewegung starrer Körper .....</b>	201
6.1	Der starre Körper .....	201
6.2	Die ebene Bewegung, Translation und Rotation .....	202
6.3	Kinematik der ebenen Bewegung starrer Körper .....	205
6.3.1	Translation und Rotation .....	205
6.3.2	Rollen und Gleiten .....	209
6.3.3	Der momentane Geschwindigkeitspol .....	211
6.3.4	Regeln zur Bestimmung von Geschwindigkeiten und des Geschwindigkeitspols .....	212
6.3.5	Rastpolbahn und Gangpolbahn .....	214
6.3.6	Der momentane Beschleunigungspol .....	217

6.3.7 Relativbewegungen in rotierenden Bezugssystemen .....	217
6.3.8 Aufgaben zu Abschnitt 6.3 .....	220
6.4 Kinetik der ebenen Bewegung starrer Körper .....	225
6.5 Massenträgheitsmomente .....	228
6.5.1 Massenträgheitsmomente für einfache Körper bezüglich der Schwerpunkte .....	228
6.5.2 Massenträgheitsmomente bei Verschiebung der Achsen: Der Satz von Steiner .....	231
6.5.3 Aufgaben zu den Abschnitten 6.4 und 6.5 .....	236
6.6 Rollen und Gleiten .....	238
6.6.1 Grundgleichungen .....	238
6.6.2 Aufgaben zu Abschnitt 6.6 .....	240
6.7 Der Energiesatz für den starren Körper in der ebenen Bewegung .....	243
6.7.1 Formulierung des Energiesatzes .....	243
6.7.2 Aufgaben zu Abschnitt 6.7 .....	246
6.8 Schnittgrößen in bewegten Systemen .....	247
6.8.1 Aufgaben zu Abschnitt 6.8 .....	249
<b>7 Grundlagen der Rotordynamik .....</b>	<b>251</b>
7.1 Der Schwerpunktsatz und der Momentensatz .....	251
7.2 Massenträgheitsmomente und Massenträgheitsmatrix .....	253
7.2.1 Definitionen .....	253
7.2.2 Auffinden von Hauptachsen .....	254
7.2.3 Massenträgheitsmomente für einfache Körper bezüglich der Schwerpunkte .....	256
7.2.4 Massenträgheitsmomente bei Parallelverschiebung der Koordinatenachsen: Der Satz von Steiner .....	260
7.2.5 Massenträgheitsmomente bei Verdrehung der Koordinatenachsen .....	262
7.2.6 Bedingungen für einen idealen Rotor und Auswuchten .....	266
7.3 Arbeit, Energie, Leistung, Drehimpuls und Energiesatz .....	269
7.4 Aufgaben zu den Abschnitten 7.1 bis 7.3 .....	271
7.5 Die kritische Drehzahl von Rotoren mit biegeelastischer Welle .....	277
7.5.1 Der Laval-Läufer .....	277
7.5.2 Aufgaben zu Abschnitt 7.5 .....	279
<b>8 Kinematik und Kinetik der räumlichen Bewegung starrer Körper .....</b>	<b>281</b>
8.1 Kinematik der Relativbewegungen .....	282
8.1.1 Zeitableitungen im bewegten Bezugssystem .....	282
8.1.2 Der Winkelgeschwindigkeits- und der Winkelbeschleunigungsvektor .....	285
8.1.3 Aufgaben zu Abschnitt 8.1 .....	288
8.2 Kinematik im Raum mit Euler Winkeln .....	291
8.2.1 Erklärung der Euler Winkel an einem Beispiel .....	291
8.2.2 Beschreibung rotierender Bezugssysteme mit Euler Winkeln .....	292
8.2.3 Aufgaben zu Abschnitt 8.2 .....	296

8.3	Kinetik starrer Körper im Inertialsystem .....	297
8.3.1	Der Schwerpunktsatz für den starren Körper .....	297
8.3.2	Der Momentensatz für den starren Körper .....	298
8.3.3	Alternative Herleitung des Momentensatzes für ebene Bewegungen ..	299
8.4	Kinetik starrer Körper in bewegten Bezugssystemen .....	300
8.4.1	Der Schwerpunktsatz in bewegten Bezugssystemen .....	300
8.4.2	Der Momentensatz in bewegten Bezugssystemen .....	304
8.4.3	Koordinatendarstellungen des Momentensatzes .....	305
8.4.4	Die permanente, stabile Verdrehung des momentenfreien Kreisels....	311
8.4.5	Aufgaben zu Abschnitt 8.4 .....	313
8.5	Der Momentensatz mit Euler Winkeln .....	318
8.5.1	Der Fall $\Omega = \dot{\psi} + \dot{\theta}$ .....	318
8.5.2	Der Fall $\Omega = \omega$ .....	320
8.5.3	Aufgaben zu Abschnitt 8.5 .....	323
9	<b>Impuls, Drehimpuls und Stoß starrer Körper .....</b>	329
9.1	Impuls- und Impulserhaltungssatz .....	329
9.1.1	Impuls- und Impulserhaltungssatz für den starren Körper .....	329
9.1.2	Impuls- und Impulserhaltungssatz für das System starrer Körper ..	331
9.1.3	Aufgaben zu Abschnitt 9.1 .....	333
9.2	Drehimpuls- und Drehimpulserhaltungssatz .....	336
9.2.1	Drehimpuls- und Drehimpulserhaltungssatz für den starren Körper ..	336
9.2.2	Der Drehimpulssatz für den starren Körper mit Drehung um eine Hauptachse .....	337
9.2.3	Der Drehimpulssatz für ebene Bewegungen des starren Körpers .....	337
9.2.4	Drehimpuls- und Drehimpulserhaltungssatz für das System starrer Körper .....	339
9.2.5	Aufgaben zu Abschnitt 9.2 .....	341
9.3	Der Stoß starrer Körper .....	344
9.3.1	Begriffe zum Stoß und Einteilung des Stoßes .....	344
9.3.2	Annahmen zum Stoß .....	346
9.4	Der gerade zentrische Stoß .....	347
9.4.1	Voraussetzungen zum geraden zentrischen Stoß .....	347
9.4.2	Erster Sonderfall: Der elastische Stoß .....	348
9.4.3	Zweiter Sonderfall: Der plastische Stoß .....	348
9.4.4	Allgemeiner Fall: Der elastisch-plastische Stoß .....	349
9.4.5	Aufgaben zu Abschnitt 9.4 .....	356
9.5	Der exzentrische Stoß .....	359
9.5.1	Formulierung des Impuls- und des Drehimpulssatzes .....	359
9.5.2	Aufgaben zu Abschnitt 9.5 .....	364

<b>10 Grundlagen der Schwingungslehre</b>	369
10.1 Einteilung von Schwingungen nach verschiedenen Merkmalen	370
10.2 Einteilung von Schwingungen nach dem zeitlichen Verlauf	372
10.3 Die Zeigerdarstellung und die Überlagerung von Schwingungen	374
10.4 Freie ungedämpfte Schwingungen	376
10.4.1 Schwingungsbewegungen starrer Körper	376
10.4.2 Ersatzsysteme elastischer Systeme	378
10.4.3 Ersatzfedern bei Federschaltungen	380
10.4.4 Vertikale Schwingungen starrer Körper im Schwerefeld	383
10.4.5 Pendelschwingungen starrer Körper im Schwerefeld	384
10.4.6 Pendelschwingungen des federgelagerten starren Körpers im Schwerefeld	385
10.4.7 Energiebetrachtungen	387
10.4.8 Aufgaben zu Abschnitt 10.4	388
10.5 Freie gedämpfte Schwingungen	393
10.5.1 Die Normalform für freie gedämpfte Schwingungen	393
10.5.2 Starke Dämpfung mit $D > 1$	394
10.5.3 Grenzdämpfung mit $D = 1$	395
10.5.4 Schwache Dämpfung mit $D < 1$	396
10.5.5 Dämpfung durch trockene Reibung	401
10.5.6 Schwingungen des feder- und dämpfergelagerten Körperpendels	403
10.5.7 Aufgaben zu Abschnitt 10.5	404
10.6 Erzwungene gedämpfte Schwingungen	406
10.6.1 Vier Fälle mit periodischen Anregungen	406
10.6.2 Vereinheitlichte Lösung für die gedämpfte Schwingung mit Anregung	408
10.6.3 Schwingungen um die statische Ruhelage	410
10.6.4 Tabellarische Zusammenfassung der Lösungen	411
10.6.5 Erzwungene ungedämpfte Schwingungen	413
10.6.6 Ergebnisse für die Beispiele aus Abschnitt 10.6.1	415
10.6.7 Aufgaben zu Abschnitt 10.6	420
<b>A Anhang</b>	425
A.1 Grundlagen der Vektorrechnung	425
A.1.1 Rechenoperationen	426
A.1.2 Vektorbasis und Basisdarstellung von Vektoren	428
A.1.3 Basiswechsel in der Ebene und Koordinatentransformation	429
A.2 Beweis der Gleichungen (4.51)	430
A.3 Herleitungen zum Abschnitt 8.1	431
A.4 Lösungen zu den Aufgaben	433
A.5 Lehrprogramme mit verschiedenen Schwerpunkten	441
<b>Literaturverzeichnis</b>	443
<b>Index</b>	445