

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	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
2	Die Kinematik des Punktes	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
3	Kinetik des Massenpunktes	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	Der Arbeitssatz und der Energiesatz für den Massenpunkt	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 Potentialeigenschaften	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	Kinematik und Kinetik des Massenpunktsystems	155
5.1	Kinematik des Massenpunktsystems	155
5.1.1	Kinematische Größen des Schwerpunktes	155
5.1.2	<i>Die Winkelgeschwindigkeit des starren Massenpunktsystems</i>	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	Kinematik und Kinetik der ebenen Bewegung starrer Körper	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
7	Grundlagen der Rotordynamik	251
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
8	Kinematik und Kinetik der räumlichen Bewegung starrer Körper	281
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	Impuls, Drehimpuls und Stoß starrer Körper	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

10 Grundlagen der Schwingungslehre	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 Schwerfeld	383
10.4.5 Pendelschwingungen starrer Körper im Schwerfeld	384
10.4.6 Pendelschwingungen des federgelagerten starren Körpers im Schwerfeld	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
11 Anhang	425
A Grundlagen der Vektorrechnung	425
A.1 Rechenoperationen	426
A.2 Vektorbasis und Basisdarstellung von Vektoren	428
A.3 Basiswechsel in der Ebene und Koordinatentransformation	429
B Beweis der Gleichungen (4.51)	430
C Herleitungen zum Abschnitt 8.1	431
D Lösungen zu den Aufgaben	433
E Lehrprogramme mit verschiedenen Schwerpunkten	442
Literaturverzeichnis	445
Index	447