

# Inhaltsverzeichnis

## **Vorwort** XV

## **Vorwort der Vorauflage** XVII

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Experimentelle und Theoretische Physik	1
1.2	Ziel der Theoretischen Physik	1
1.3	Aufbau der Lehrbuchreihe Theoretische Physik	2
1.4	Stellung der klassischen Mechanik in der Theoretischen Physik	2
1.5	Gültigkeitsgrenzen der klassischen Mechanik	3
1.6	Struktur des Bandes Mechanik	4
1.7	Modellebenen der Theoretischen Mechanik	7
1.8	Lösung von Gleichungen	8
<b>2</b>	<b>Kinematik eines Massenpunktes</b>	<b>11</b>
2.1	Grundbegriffe der Kinematik	11
2.1.1	Bezugssystem und Räume	11
2.1.2	Weglänge, Verrückung, Geschwindigkeit	13
2.1.3	Beschleunigung	14
2.2	Dekomposition von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen	15
2.2.1	Kartesische Koordinaten	15
2.2.2	Zylinderkoordinaten, ebene Polarkoordinaten	16
2.2.3	Kugelkoordinaten	18
2.2.4	Begleitendes Dreibein	20
2.2.5	Allgemeine krummlinige Koordinaten	23
2.3	Rekonstruktion von Bewegungsgleichungen	26
	Kontrollfragen	28
	Aufgaben	29
<b>3</b>	<b>Newton'sche Mechanik des einzelnen Massenpunktes</b>	<b>33</b>
3.1	Newton'sche Axiome	33
3.1.1	Axiom I: Trägheitsgesetz	33
3.1.2	Axiom II: Grundgleichung der Dynamik	35

3.1.3	Axiom III: Wirkung und Gegenwirkung	40
3.2	Bewegung eines freien Massenpunktes	40
3.2.1	Bewegung eines Massenpunktes im Schwerefeld	42
3.2.2	Bewegung einer Ladung im elektromagnetischen Feld	44
3.3	Arbeit und kinetische Energie	45
3.4	Erhaltung der mechanischen Energie	49
3.4.1	Erste Integrale	49
3.4.2	Konservative Kräfte	49
3.4.3	Kraftfelder	50
3.4.4	Potentielle Energie und Arbeit	51
3.4.5	Darstellung von konservativen Kraftfeldern	55
3.4.6	Energiesatz der Mechanik	56
3.4.7	Beispiele für konservative Kraftfelder	57
3.4.8	Beispiele für nichtkonservative Kraftfelder	63
3.4.9	Nichtkonservative Kräfte mit zeitabhängigem Potential	66
3.5	Zentralkräfte. Drehmoment und Drehimpuls	68
3.5.1	Zentralkräfte	68
3.5.2	Drehmoment und Drehimpuls	71
3.6	Eingeschränkte Bewegung eines Massenpunktes, Reibung	72
3.6.1	Zwangsbedingungen	72
3.6.2	Zwangskräfte und Bewegungsgleichung	72
3.6.3	Bewegung eines Massenpunktes auf ruhender schiefer Ebene	75
3.6.4	Arbeit der Zwangskraft	78
3.6.5	Verallgemeinerung der Bedingungsgleichungen	79
3.6.6	Zweiseitige und einseitige Zwangsbedingungen	83
3.6.7	Freiheitsgrade	83
3.6.8	Reibung	84
3.7	Gleichgewicht des Massenpunktes. Das Prinzip der virtuellen Arbeit	88
3.7.1	Gleichgewicht eines Massenpunktes. Das Problem der Statik	88
3.7.2	Das Prinzip der virtuellen Arbeit	90
3.8	Das d'Alembert'sche Prinzip. Die formale Rückführung der Dynamik auf die Statik	96
3.8.1	Das d'Alembert'sche Prinzip	96
3.8.2	Die formale Rückführung der Dynamik auf die Statik	97
3.9	Bewegte Bezugssysteme (Relativbewegung). Trägheitskräfte	98
3.9.1	Beschreibung der Drehbewegung. Winkelgeschwindigkeit	99
3.9.2	Kinematik der Relativbewegung	99
3.9.3	Bewegungsgleichung des Massenpunktes	103
	Kontrollfragen	108
	Aufgaben	108
<b>4</b>	<b>Anwendung der Newton'schen Grundgleichung auf die Dynamik eines Massenpunktes</b>	<b>111</b>
4.1	Eindimensionale Bewegungen	111
4.1.1	Zeitabhängige Kraft	111

4.1.2	Ortsabhängige Kraft	113
4.1.3	Geschwindigkeitsabhängige Kraft	113
4.1.4	Freier Fall aus großer Höhe ohne Reibung	114
4.1.5	Freier Fall aus geringer Höhe mit Reibung	116
4.2	Schwingungen	119
4.2.1	Harmonische Schwingung in einer Dimension	119
4.2.2	Harmonische Schwingung in drei Dimensionen	127
4.2.3	Gedämpfte Schwingung	130
4.2.4	Resonanz bei erzwungener Schwingung	135
4.2.5	Methode der Green'schen Funktion	141
4.3	Kepler-Bahn im Schwerkraftfeld	151
4.3.1	Flächensatz und Energiesatz	152
4.3.2	Darstellung in ebenen Polarkoordinaten	153
4.3.3	Qualitative Diskussion der Bewegung	154
4.3.4	Berechnung der Bahnkurve	155
4.3.5	Umlaufdauer	157
4.3.6	Zeitabhängige periodische Bahnen	158
	Kontrollfragen	159
	Aufgaben	160
<b>5</b>	<b>Newton'sche Mechanik von Massenpunkten</b>	<b>165</b>
5.1	Krafteinwirkung auf Massenpunkte	165
5.1.1	Äußere und innere Kräfte	165
5.1.2	Eingeprägte und Zwangskräfte	168
5.2	Impuls von Massenpunkten	169
5.2.1	Impulssatz	169
5.2.2	Schwerpunktsatz	170
5.2.3	Erhaltung des Gesamtimpulses	172
5.2.4	Bewegung durch Rückstoß	173
5.3	Drehimpuls von Massenpunkten	175
5.3.1	Drehimpulssatz	175
5.3.2	Erhaltung des Gesamtdrehimpulses	176
5.3.3	Abhängigkeit des Drehimpulses vom Bezugssystem	178
5.4	Energie von Massenpunkten	180
5.4.1	Satz über die Änderung der kinetischen Energie	180
5.4.2	Erhaltung der Gesamtenergie	181
5.4.3	Zerlegung der potentiellen Energie	182
5.4.4	Zerlegung der kinetischen Energie	184
5.4.5	Zehn erste Integrale der Bewegung	184
5.5	Schwingungen von Systemen mit mehreren Freiheitsgraden	185
5.5.1	Auslenkungen vom Gleichgewicht	185
5.5.2	Verallgemeinertes Eigenwertproblem	189
5.5.3	Normalschwingungen	193
5.5.4	Gekoppelte Pendel	194
	Kontrollfragen	196
	Aufgaben	197

<b>6</b>	<b>Lagrange-Formulierung der Mechanik</b>	<b>203</b>
6.1	Das Prinzip der virtuellen Arbeit und das d'Alembert'sche Prinzip	203
6.1.1	Das d'Alembert'sche Prinzip für Punktsysteme	203
6.1.2	Gleichgewicht eines Systems von Massenpunkten	207
6.2	Klassifizierung der Zwangsbedingungen, Lagrange-Gleichungen erster Art	207
6.2.1	Einteilung der Zwangsbedingungen	207
6.2.2	Lagrange-Gleichungen erster Art	212
6.2.3	Energiesatz	213
6.3	Das Hamilton'sche Prinzip	214
6.3.1	Differential- und Integralprinzipien	214
6.3.2	Festlegung zulässiger Vergleichsbahnen	216
6.3.3	Ableitung des Hamilton'schen Prinzips aus dem d'Alembert'schen Prinzip	219
6.3.4	Hamilton'sches Prinzip bei Kräften mit Potential	220
6.4	Grundaufgabe der Variationsrechnung	222
6.4.1	Mathematische Beispiele für Extremalprobleme	222
6.4.2	Zurückführung des Variationsproblems auf die Euler'sche Differentialgleichung	226
6.4.3	Variationen und Variationsableitungen	230
6.4.4	Variationsprobleme mit Nebenbedingungen	231
6.4.5	Anwendungen der Euler-Lagrange-Gleichung	233
6.5	Lagrange'sche Bewegungsgleichung zweiter Art. Allgemeine Koordinaten, Geschwindigkeits-, Kraft- und Impulskomponenten	235
6.5.1	Euler-Lagrange-Gleichungen der Mechanik	235
6.5.2	Euler-Lagrange-Gleichungen mit holonomen Nebenbedingungen	236
6.5.3	Allgemeine Koordinaten und Geschwindigkeiten	237
6.5.4	Lagrange-Gleichungen zweiter Art für holonome Systeme mit Potential	239
6.5.5	Lagrange-Gleichungen zweiter Art für nichtkonservative holonome Systeme	242
6.5.6	Bewegung eines Teilchens in einem elektromagnetischen Feld	244
6.5.7	Integrale der Lagrange-Gleichungen. Allgemeine Impulskoordinaten. Erhaltungssätze	246
6.5.8	Anholonome Systeme. Zwangsbedingungen. Zwangskräfte	249
6.6	Symmetrien und Erhaltungssätze (Theorem von E. Noether)	255
	Kontrollfragen	262
	Aufgaben	262
<b>7</b>	<b>Der kanonische Formalismus der klassischen Mechanik</b>	<b>267</b>
7.1	Systeme mit einer Lagrange-Funktion	267
7.2	Hamilton-Funktion. Kanonische Gleichungen	268
7.3	Physikalische Bedeutung der Hamilton-Funktion	270
7.4	Beispiele	271

- 7.4.1 Massenpunkt mit konservativer Kraft. Kartesische Koordinaten 271
- 7.4.2 Massenpunkt mit konservativer Kraft. Kugelkoordinaten 271
- 7.4.3 Hamilton-Funktion für ein geladenes Teilchen im elektromagnetischen Feld 271
- 7.5 Poisson-Klammern 272
- 7.6 Erhaltungssätze. Zyklische Variable 273
  - 7.6.1 Energieerhaltungssatz 273
  - 7.6.2 Zyklische Variable 273
- 7.7 Kanonische Transformationen 274
  - 7.7.1 Punkttransformation und kanonische Transformation 274
  - 7.7.2 Kanonische Transformationen 275
  - 7.7.3 Beispiele für kanonische Transformationen 278
  - 7.7.4 Infinitesimale kanonische Transformation 280
  - 7.7.5 Invarianz der Poisson-Klammern 281
- 7.8 Liouville-Gleichung. Bewegung im Phasenraum 283
  - 7.8.1 Konfigurationsraum und Phasenraum 283
  - 7.8.2 Bewegungsgleichungen im Phasenraum 284
  - 7.8.3 Symplektische Matrizen 285
  - 7.8.4 Jacobi-Matrix für kanonische Transformationen 285
  - 7.8.5 Benachbarte Bahnkurven 288
  - 7.8.6 Liouville-Gleichung 290
  - 7.8.7 Liouville-Theorem 292
- 7.9 Hamilton-Jacobi'sche partielle Differentialgleichung 293
  - 7.9.1 Ableitung der Gleichung 293
  - 7.9.2 Bedeutung der Hamilton-Jacobi-Gleichung 294
  - 7.9.3 Zusammenhang mit der Wirkungsfunktion 294
  - 7.9.4 Wirkungsfunktion bei zeitunabhängiger Hamilton-Funktion 295
  - 7.9.5 Beispiel: freier Massenpunkt in der Ebene 296
  - 7.9.6 Geometrische Bedeutung der Wirkungsfunktion 298
- 7.10 Periodische Bewegung. Wirkungs- und Winkelvariable 298
  - 7.10.1 Systeme mit einem Freiheitsgrad 299
  - 7.10.2 Systeme mit mehreren Freiheitsgraden 303
  - 7.11 Reguläre und irreguläre Bewegung konservativer Systeme 305
    - 7.11.1 Charakterisierung der Dynamik im Phasenraum 305
    - 7.11.2 Integrale Systeme 306
    - 7.11.3 Störungstheorie 308
    - 7.11.4 Kolmogorov-Arnold-Moser-Theorem 310
    - 7.11.5 Das Poincaré-Birkhoff-Theorem 310
      - Kontrollfragen 313
      - Aufgaben 313
- 8 Mechanik des starren Körpers 315**
  - 8.1 Definition der Freiheitsgrade des starren Körpers 315
  - 8.2 Koordinatensysteme und Bewegung eines starren Körpers 316
    - 8.2.1 Koordinatensysteme 316

8.2.2	Euler'sche Winkel	317
8.2.3	Infinitesimale Verschiebung des Körpers	319
8.2.4	Wechsel des Bezugssystems	320
8.3	Kinetische Energie des starren Körpers. Trägheitstensor	321
8.3.1	Kinetische Energie des starren Körpers	321
8.3.2	Der Trägheitstensor	322
8.4	Drehimpuls und Drehmoment. Bewegungsgleichungen eines starren Körpers	331
8.5	Energie- und Drehimpulserhaltungssatz des kräftefreien Kreisels	332
8.6	Die Bewegungsgleichungen eines in einem Punkt festgehaltenen Körpers (Euler'sche Kreiselgleichungen)	333
8.7	Diskussion von Sonderfällen	335
8.7.1	Isotroper Trägheitstensor	335
8.7.2	Euler'sche Gleichungen im Hauptachsensystem für einen kräftefreien Kreisel	336
	Kontrollfragen	341
	Aufgaben	341
<b>9</b>	<b>Raum und Zeit</b>	<b>345</b>
9.1	Fundamentale Wechselwirkungen	345
9.2	Das Relativitätsprinzip	347
9.3	Abstände im Raum-Zeit-Kontinuum	351
9.4	Die Eigenzeit	356
9.5	Die Lorentz-Transformation	357
9.5.1	Zeitdilatation	360
9.5.2	Längenkontraktion	361
9.5.3	Geschwindigkeitsadditionstheorem	362
9.6	Tensorkalkül im pseudo-euklidischen Raum	363
9.6.1	Vierervektoren, ko- und kontravariante Basis	363
9.6.2	Geometrische Objekte im Minkowski-Raum	368
9.6.3	Differentialoperatoren	372
9.7	Relativistische Mechanik	373
9.7.1	Einleitung	373
9.7.2	Vierergrößen	374
9.7.3	Erweiterung der Newton'schen Bewegungsgleichung	377
9.7.4	Energie-Impulsvektor und Bewegungsgleichung	380
9.7.5	Masse und Energie in der relativistischen Mechanik	381
	Kontrollfragen	384
	Aufgaben	384

**Lösungen zu den Aufgaben** 387

**Anhang A Naturkonstanten** 463

**Anhang B Ellipsenparameter** 465

**Literatur** 467

**Stichwortverzeichnis** 471