

Josef Honerkamp Hartmann Römer

---

# Klassische Theoretische Physik

## Eine Einführung

Dritte, durchgesehene und erweiterte Auflage  
mit 139 Abbildungen und 39 Übungen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo  
Hong Kong Barcelona  
Budapest

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1. Einleitung</b> .....                                                                                    | 1  |
| <b>2. Die Newtonsche Mechanik</b> .....                                                                       | 3  |
| 2.1 Zeit und Raum in der Klassischen Mechanik .....                                                           | 3  |
| 2.2 Die Newtonschen Gesetze .....                                                                             | 6  |
| 2.3 Einige wichtige Kraftgesetze .....                                                                        | 9  |
| 2.4 Der Energiesatz für einen Massenpunkt in einem Kraftfeld .....                                            | 12 |
| 2.4.1 Wegintegrale .....                                                                                      | 12 |
| 2.4.2 Arbeit und Energiesatz .....                                                                            | 15 |
| 2.5 Mehrere Punktteilchen in Wechselwirkung .....                                                             | 17 |
| 2.6 Der Impuls und die Impulsbilanz .....                                                                     | 20 |
| 2.7 Der Drehimpuls und die Drehimpulsbilanz .....                                                             | 24 |
| 2.8 Das Zwei-Körper-Problem .....                                                                             | 26 |
| 2.9 Das Kepler-Problem .....                                                                                  | 30 |
| 2.10 Die Streuung .....                                                                                       | 34 |
| 2.10.1 Die Relativbewegung bei der Streuung .....                                                             | 35 |
| 2.10.2 Schwerpunktsystem und Laborsystem .....                                                                | 37 |
| 2.11 Der Streuquerschnitt .....                                                                               | 41 |
| 2.12 Der Virialsatz .....                                                                                     | 43 |
| 2.13 Mechanische Ähnlichkeit .....                                                                            | 45 |
| 2.14 Einige allgemeine Betrachtungen zu Mehr-Körper-Problemen .....                                           | 46 |
| <b>3. Die Lagrangeschen Methoden in der Klassischen Mechanik</b> .....                                        | 49 |
| 3.1 Problemstellung und Lösungsskizze am Beispiel des Pendels .....                                           | 49 |
| 3.2 Die Lagrangesche Methode erster Art .....                                                                 | 50 |
| 3.3 Die Lagrangesche Methode zweiter Art .....                                                                | 54 |
| 3.4 Die Energiebilanz bei Bewegungen, die durch Zwangsbedingungen eingeschränkt sind .....                    | 58 |
| 3.5 Nichtholome Zwangsbedingungen .....                                                                       | 63 |
| 3.6 Invarianzen und Erhaltungssätze .....                                                                     | 66 |
| 3.7 Die Hamilton-Funktion .....                                                                               | 69 |
| 3.7.1 Hamiltonsche und Lagrangesche Bewegungsgleichungen .....                                                | 69 |
| 3.7.2 Ausblick auf weitere Entwicklungen der theoretischen Mechanik und die Theorie Dynamischer Systeme ..... | 72 |
| 3.8 Das Hamiltonsche Prinzip der stationären Wirkung .....                                                    | 75 |
| 3.8.1 Funktionale und Funktionalableitungen .....                                                             | 75 |
| 3.8.2 Das Hamiltonsche Prinzip .....                                                                          | 77 |
| 3.8.3 Das Hamiltonsche Prinzip für Systeme mit holonomen Zwangsbedingungen .....                              | 78 |

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>4. Der starre Körper</b> .....                                                       | 81  |
| 4.1 Die Kinematik des starren Körpers .....                                             | 81  |
| 4.2 Der Trägheitstensor und die kinetische Energie eines starren Körpers ..             | 84  |
| 4.2.1 Definition und einfache Eigenschaften des Trägheitstensors ..                     | 84  |
| 4.2.2 Berechnung von Trägheitstensoren .....                                            | 87  |
| 4.3 Der Drehimpuls eines starren Körpers, die Eulerschen Kreiselgleichungen .....       | 89  |
| 4.4 Die Bewegungsgleichungen für die Eulerschen Winkel .....                            | 93  |
| <b>5. Bewegungen in einem Nicht-Inertialsystem</b> .....                                | 99  |
| 5.1 Scheinkräfte in Nicht-Inertialsystemen .....                                        | 99  |
| 5.2 Das Foucaultsche Pendel .....                                                       | 102 |
| <b>6. Lineare Schwingungen</b> .....                                                    | 105 |
| 6.1 Linearisierung um Gleichgewichtspunkte .....                                        | 105 |
| 6.2 Einige allgemeine Bemerkungen zu linearen Differentialgleichungen .....             | 106 |
| 6.3 Homogene lineare Systeme mit einem Freiheitsgrad und konstanten Koeffizienten ..... | 108 |
| 6.4 Homogene lineare Systeme mit $n$ Freiheitsgraden und konstanten Koeffizienten ..... | 111 |
| 6.4.1 Eigenschwingungen und Eigenfrequenzen .....                                       | 111 |
| 6.4.2 Beispiele für die Berechnung von Eigenschwingungen .....                          | 113 |
| 6.5 Die Antwort eines linearen Systems auf äußere Kräfte .....                          | 117 |
| 6.5.1 Harmonische äußere Kräfte .....                                                   | 117 |
| 6.5.2 Überlagerung von harmonischen äußeren Kräften .....                               | 119 |
| 6.5.3 Periodische äußere Kräfte .....                                                   | 119 |
| 6.5.4 Beliebige äußere Kräfte .....                                                     | 120 |
| <b>7. Klassische Statistische Mechanik</b> .....                                        | 123 |
| 7.1 Thermodynamische Systeme und Verteilungsfunktionen .....                            | 123 |
| 7.2 Die Entropie .....                                                                  | 126 |
| 7.3 Temperatur, Druck und chemisches Potential .....                                    | 129 |
| 7.3.1 Systeme mit Austausch von Energie .....                                           | 129 |
| 7.3.2 Systeme mit Austausch von Volumen .....                                           | 132 |
| 7.3.3 Systeme mit Austausch von Energie und Teilchen .....                              | 133 |
| 7.4 Die Gibbsche Fundamentalform und die Formen des Energieaustausches .....            | 134 |
| 7.5 Die kanonische Gesamtheit und die freie Energie .....                               | 136 |
| 7.6 Thermodynamische Potentiale .....                                                   | 141 |
| 7.7 Materialgrößen .....                                                                | 143 |
| 7.8 Zustandsänderungen und ihre Realisierungen .....                                    | 145 |
| 7.8.1 Reversible und irreversible Realisierungen .....                                  | 145 |
| 7.8.2 Adiabatische und nicht-adiabatische Realisierungen .....                          | 147 |
| 7.8.3 Der Joule-Thomson Prozeß .....                                                    | 150 |
| 7.9 Umwandlung von Wärme in Arbeit, der Carnotsche Wirkungsgrad .....                   | 152 |
| 7.10 Die Hauptsätze der Wärmelehre .....                                                | 156 |
| 7.11 Der phänomenologische Ansatz in der Thermodynamik .....                            | 157 |
| 7.11.1 Thermodynamik und Statistische Mechanik .....                                    | 157 |
| 7.11.2 Zum ersten Hauptsatz der Thermodynamik .....                                     | 159 |

|                                                                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.11.3 Zum zweiten und dritten Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .                                                   | 160        |
| 7.11.4 Thermische und kalorische Zustandsgleichung . . . . .                                                           | 162        |
| 7.12 Gleichgewichts- und Stabilitätsbedingungen . . . . .                                                              | 164        |
| 7.12.1 Gleichgewicht und Stabilität bei Austauschprozessen . . . . .                                                   | 164        |
| 7.12.2 Gleichgewicht, Stabilität und thermodynamische Potentiale .                                                     | 166        |
| <b>8. Anwendungen der Thermodynamik . . . . .</b>                                                                      | <b>169</b> |
| 8.1 Phasenübergänge und Phasendiagramme . . . . .                                                                      | 170        |
| 8.2 Die Umwandlungswärme bei Phasenumwandlungen . . . . .                                                              | 172        |
| 8.3 Lösungen . . . . .                                                                                                 | 176        |
| 8.4 Das Henrysche Gesetz, die Osmose . . . . .                                                                         | 178        |
| 8.4.1 Das Henrysche Gesetz . . . . .                                                                                   | 178        |
| 8.4.2 Die Osmose . . . . .                                                                                             | 179        |
| 8.5 Phasenübergänge in Lösungen . . . . .                                                                              | 181        |
| 8.5.1 Mischbarkeit nur in einer Phase . . . . .                                                                        | 181        |
| 8.5.2 Mischbarkeit in zwei Phasen . . . . .                                                                            | 184        |
| <b>9. Elemente der Strömungslehre . . . . .</b>                                                                        | <b>185</b> |
| 9.1 Einige einführende Bemerkungen zur Strömungslehre . . . . .                                                        | 185        |
| 9.2 Die allgemeine Bilanzgleichung . . . . .                                                                           | 187        |
| 9.3 Die speziellen Bilanzgleichungen . . . . .                                                                         | 190        |
| 9.4 Entropieproduktion, verallgemeinerte Kräfte und Flüsse . . . . .                                                   | 194        |
| 9.5 Die Differentialgleichungen der Strömungslehre und<br>ihre Spezialfälle . . . . .                                  | 197        |
| 9.6 Einige elementare Anwendungen der Navier-Stokes Gleichungen .                                                      | 200        |
| <b>10. Die wichtigsten linearen partiellen Differentialgleichungen der Physik . .</b>                                  | <b>205</b> |
| 10.1 Allgemeines . . . . .                                                                                             | 205        |
| 10.1.1 Typen linearer partieller Differentialgleichungen,<br>Formulierung von Rand- und Anfangswertproblemen . . . . . | 205        |
| 10.1.2 Anfangswertprobleme im $\mathbb{R}^D$ . . . . .                                                                 | 207        |
| 10.1.3 Inhomogene Gleichungen und Greensche Funktionen . . . . .                                                       | 209        |
| 10.2 Lösungen der Wellengleichung . . . . .                                                                            | 210        |
| 10.3 Randwertprobleme . . . . .                                                                                        | 212        |
| 10.3.1 Vorbetrachtungen . . . . .                                                                                      | 212        |
| 10.3.2 Beispiele für Randwertprobleme . . . . .                                                                        | 213        |
| 10.3.3 Allgemeine Behandlung von Randwertproblemen . . . . .                                                           | 215        |
| 10.4 Die Helmholtz-Gleichung in Kugelkoordinaten, Kugelfunktionen<br>und Bessel-Funktionen . . . . .                   | 217        |
| 10.4.1 Der Separationsansatz . . . . .                                                                                 | 217        |
| 10.4.2 Die Gleichungen für die Winkelvariablen, Kugelfunktionen .                                                      | 218        |
| 10.4.3 Die Gleichung für die Radialvariable, Bessel-Funktionen .                                                       | 221        |
| 10.4.4 Lösungen der Helmholtz-Gleichung . . . . .                                                                      | 222        |
| 10.4.5 Ergänzende Betrachtungen . . . . .                                                                              | 223        |
| <b>11. Elektrostatik . . . . .</b>                                                                                     | <b>225</b> |
| 11.1 Die Grundgleichungen der Elektrostatik und erste Folgerungen .                                                    | 225        |
| 11.1.1 Coulombsches Gesetz und elektrisches Feld . . . . .                                                             | 225        |
| 11.1.2 Elektrostatisches Potential und Poisson-Gleichung . . . . .                                                     | 226        |

|                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.1.3 Beispiele und wichtige Eigenschaften elektrostatischer Felder                     | 228        |
| <b>11.2 Randwertprobleme in der Elektrostatik, Greensche Funktionen ..</b>               | <b>230</b> |
| 11.2.1 Dirichletsche und Neumannsche Greensche Funktionen .....                          | 230        |
| 11.2.2 Ergänzende Bemerkungen zu Randwertproblemen der<br>Elektrostatik .....            | 232        |
| 11.3 Berechnung Greenscher Funktionen, die Methode der Bildladungen                      | 233        |
| 11.4 Berechnung Greenscher Funktionen, Entwicklung nach<br>Kugelflächenfunktionen .....  | 237        |
| 11.5 Lokalisierte Ladungsverteilungen, die Multipol-Entwicklung .....                    | 239        |
| 11.6 Die elektrostatische potentielle Energie .....                                      | 241        |
| <b>12. Bewegte Ladungen, Magnetostatik .....</b>                                         | <b>243</b> |
| 12.1 Das Biot-Savartsche Gesetz, die Grundgleichungen<br>der Magnetostatik .....         | 243        |
| 12.1.1 Elektrische Stromdichte und Magnetfeld .....                                      | 243        |
| 12.1.2 Vektorpotential und Ampèresches Gesetz .....                                      | 245        |
| 12.1.3 Das SI-System der Maßeinheiten in der Elektrodynamik .....                        | 246        |
| 12.2 Lokalisierte Stromverteilungen .....                                                | 247        |
| 12.2.1 Das magnetische Dipolmoment .....                                                 | 247        |
| 12.2.2 Kraft, Potential und Drehmoment im<br>magnetostatischen Feld .....                | 249        |
| <b>13. Zeitabhängige elektromagnetische Felder .....</b>                                 | <b>253</b> |
| 13.1 Die Maxwell-Gleichungen .....                                                       | 253        |
| 13.2 Potentiale und Eichtransformationen .....                                           | 255        |
| 13.3 Elektromagnetische Wellen im Vakuum, die Polarisation<br>transversaler Wellen ..... | 256        |
| 13.4 Elektromagnetische Wellen, der Einfluß der Quellen .....                            | 258        |
| 13.5 Die Energie des elektromagnetischen Feldes .....                                    | 261        |
| 13.5.1 Energiebilanz und Poynting-Vektor .....                                           | 261        |
| 13.5.2 Energiefluß des Strahlungsfeldes .....                                            | 262        |
| 13.5.3 Energie des elektrischen Feldes .....                                             | 264        |
| 13.5.4 Energie des magnetischen Feldes .....                                             | 265        |
| 13.5.5 Selbstenergie und Wechselwirkungsenergie .....                                    | 266        |
| 13.6 Der Impuls des elektromagnetischen Feldes .....                                     | 267        |
| <b>14. Elemente der Elektrodynamik kontinuierlicher Medien .....</b>                     | <b>269</b> |
| 14.1 Die makroskopischen Maxwell-Gleichungen .....                                       | 269        |
| 14.1.1 Mikroskopische und makroskopische Felder .....                                    | 269        |
| 14.1.2 Gemittelte Ladungsdichte und elektrische Verschiebung .....                       | 270        |
| 14.1.3 Gemittelte Stromdichte und magnetische Feldstärke .....                           | 271        |
| 14.2 Elektrostatische Felder in kontinuierlichen Medien .....                            | 274        |
| 14.3 Magnetostatische Felder in kontinuierlichen Medien .....                            | 276        |
| 14.4 Ebene Wellen in Materie, Wellenpakete .....                                         | 277        |
| 14.4.1 Die Frequenzabhängigkeit der Suszeptibilität .....                                | 278        |
| 14.4.2 Wellenpakete, Phasen- und Gruppengeschwindigkeit .....                            | 280        |
| 14.5 Reflexion und Brechung an ebenen Grenzflächen .....                                 | 283        |
| 14.5.1 Grenzbedingungen, Reflexions- und Brechungsgesetz .....                           | 283        |
| 14.5.2 Die Fresnelschen Formeln .....                                                    | 284        |

|                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| 14.5.3 Spezielle Effekte bei Reflexion und Brechung . . . . .    | 285        |
| a) Der Brewstersche Winkel . . . . .                             | 285        |
| b) Totale Reflexion . . . . .                                    | 286        |
| c) Krümmung des Lichtweges in einem inhomogenen Medium . . . . . | 286        |
| <b>Anhang . . . . .</b>                                          | <b>289</b> |
| A. Die $\Gamma$ -Funktion . . . . .                              | 289        |
| B. Kegelschnitte . . . . .                                       | 290        |
| C. Tensoren . . . . .                                            | 291        |
| D. Fourier-Reihen und Fourier-Integrale . . . . .                | 293        |
| D.1 Fourier-Reihen . . . . .                                     | 293        |
| D.2 Fourier-Integrale und Fourier-Transformationen . . . . .     | 297        |
| E. Distributionen und Greensche Funktionen . . . . .             | 299        |
| E.1 Distributionen . . . . .                                     | 299        |
| E.2 Greensche Funktionen . . . . .                               | 301        |
| F. Vektoranalysis und krummlinige Koordinaten . . . . .          | 303        |
| F.1 Vektorfelder und skalare Felder . . . . .                    | 303        |
| F.2 Linien-, Flächen- und Volumenintegrale . . . . .             | 303        |
| F.3 Satz von Stokes . . . . .                                    | 305        |
| F.4 Satz von Gauß . . . . .                                      | 306        |
| F.5 Einige Anwendungen der Integralsätze . . . . .               | 307        |
| F.6 Krummlinige Koordinaten . . . . .                            | 307        |
| <b>Übungsaufgaben . . . . .</b>                                  | <b>311</b> |
| <b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>                            | <b>323</b> |
| <b>Namen- und Sachverzeichnis . . . . .</b>                      | <b>327</b> |