

Inhaltsverzeichnis

I Einleitende Orientierung

| | |
|--|----|
| § 1 Physikalische Größen | 1 |
| Größen als Mittel des quantitativen Vergleichens | 1 |
| Anwendung auf die Welt als ganze | 3 |
| Theorie und Wirklichkeit | 4 |
| § 2 Physik und Mathematik | 6 |
| Die physikalische Messung | 7 |
| Mittelwert und quadratische Streuung | 8 |
| Statistik der Einzelmessungen und Wahrscheinlichkeit | 9 |
| Bessere und schlechtere Meßverfahren | 12 |
| Der Fehler einer Messung | 13 |
| Streuung und Fehler in der klassischen Physik | 15 |
| Streuung und Fehler in der Quantenmechanik | 17 |
| Das Instrument „Mathematik“ | 19 |
| Richtig und Falsch in der Physik | 20 |
| Theorie und Mathematik | 21 |
| § 3 Kinematik und Dynamik | 22 |
| Die kinematische Beschreibung der Bewegung | 22 |
| Unphysikalische Bewegungen | 24 |
| Bewegung als Transport | 25 |
| § 4 Die Begriffe Impuls und Energie in ihrer historischen Entwicklung | 26 |
| Huygens' Untersuchungen zum elastischen Stoß | 27 |
| Newtons Bewegungsgleichungen | 29 |
| Newtons Prinzip der Gleichheit von actio und reactio | 31 |
| Kinetische und potentielle Energie | 32 |
| Ausdehnung des Energiebegriffs auf nicht-mechanische Vorgänge und Systeme | 35 |
| Ausdehnung des Impulsbegriffs auf nicht-mechanische Systeme | 36 |
| Bewegung als Energie-Impuls-Transport | 37 |
| Heisenbergs Unschärferelationen | 39 |

II Impuls und Energie

| | |
|--|----|
| § 5 Der Transport von Energie und Impuls | 41 |
| Transporte durch den leeren Raum | 41 |
| Innere Energie, Ruhenergie | 42 |
| Kinetische Energie | 43 |
| Grenzgeschwindigkeit von Transporten | 46 |
| § 6 Der Begriff des Teilchens | 49 |
| Energie-Impuls-Zusammenhang eines Transports | 49 |
| Die Funktion $E(P)$ für Transporte durch den leeren Raum bei beliebiger Geschwindigkeit | 51 |
| Newtonsc̄he Teilchen | 53 |
| Extrem relativistische Teilchen | 54 |
| § 7 Die Messung des Impulses | 55 |
| Impulsmessung als Operation des Vergleichens | 55 |
| Das Prinzip der Impulsmessung | 56 |
| Impulsmessung bei $v \ll c$ | 58 |
| Impulsaustausch eines Pendels | 59 |
| Impulsmessung bei $v = c$ | 61 |
| Einheiten des Impulses | 61 |
| § 8 Die Messung der Energie | 62 |
| Energiemessung als Operation des Vergleichens | 62 |
| Verschiebungen | 63 |
| Verschiebungsenergie im homogenen Gravitationsfeld | 64 |
| Freier Fall im homogenen Gravitationsfeld | 65 |
| Verschiebungsenergie beim Spannen einer elastischen Feder | 69 |
| Einheiten der Energie | 71 |

III Stoßprozesse

| | |
|--|----|
| § 9 Allgemeine Charakterisierung von Stoßprozessen | 73 |
| Wechselwirkung von Energie-Impuls-Transporten | 73 |
| Impuls- und Energiebilanz zwischen Anfangs- und Endzustand | 75 |
| § 10 Schwerpunktssystem | 76 |
| Schwerpunktssystem eines Teilchens | 76 |
| Schwerpunktssystem mehrerer Teilchen | 77 |
| Stoßinvarianten | 80 |
| § 11 Der elastische Stoß | 82 |
| Impuls- und Energiebilanz | 82 |
| Elastischer Stoß zwischen Newtonschen Teilchen | 83 |
| Zentral-elastischer Stoß | 84 |
| Beispiele elastischer Stoßprozesse | 87 |

| | |
|---|------------|
| Compton-Effekt | 88 |
| Weiche und harte Photonen beim Compton-Effekt | 89 |
| Beobachtung der Compton-Streuung an gebundenen Elektronen | 90 |
| Compton-Effekt am bewegten Elektron | 91 |
| Reflexion von Licht am ruhenden Spiegel | 92 |
| Reflexion von Licht am bewegten Spiegel | 92 |
| § 12 Der inelastische Stoß | 95 |
| Energiebilanz | 95 |
| Modell eines inelastischen Stoßes | 96 |
| Der total inelastische Stoß | 97 |
| Franck-Hertz-Versuch | 99 |
| Paarerzeugung und Paarzerstrahlung | 100 |
| Absorptionsprozesse für hochenergetische Photonen | 101 |
| Emission eines Photons. Mößbauer-Effekt | 103 |
| § 13 Teilchenreaktionen | 105 |
| Mikroskopische Reversibilität | 105 |
| Reaktionsenergie und Schwellenergie | 106 |
| Aktivierungsenergie | 107 |
| Beispiel einer chemischen Reaktion | 107 |
| Kernfusionsreaktionen | 109 |
| Proton-Proton-Stoß | 110 |
| § 14 Dissipative Energie-Impuls-Transporte | 112 |
| Energie-Impuls-Transport in Materie | 113 |
| Modell eines Stoßmechanismus mit Energiedissipation | 114 |
| Teilchen und Quasiteilchen | 116 |

IV Felder

| | |
|---|------------|
| § 15 Körper und Feld als Grenzfälle des Teilchenbegriffs | 119 |
| Das Problem der Lokalisierbarkeit eines Teilchens | 119 |
| Die klassische Einteilung der Transporte in korpuskulare und feldartige | 121 |
| § 16 Verschiebungsenergie | 122 |
| Energieänderungen und ihre mathematische Beschreibung. Kraft . . | 123 |
| Die Energieformen Bewegungs- und Verschiebungsenergie | 124 |
| Vorgänge mit Austausch allein von Bewegungs- und Verschiebungsenergie | 127 |
| Das Modell des statischen Feldes | 129 |
| § 17 Die mathematische Beschreibung statischer Felder | 130 |
| Einteilung der statischen Felder in zwei Typen | 130 |
| Statische Felder vom ersten Typ | 131 |

| | |
|--|------------|
| Statische Felder vom zweiten Typ | 132 |
| Physikalische Felder | 133 |
| Mathematische Felder | 134 |
| Gradientenfelder | 136 |
| Äquipotentialflächen | 139 |
| Konservative und nicht-konservative Kraftfelder | 140 |
| § 18 Beispiele statischer Felder | 142 |
| Das homogene Gravitationsfeld | 142 |
| Gravitationsfeld eines punktartigen Körpers | 143 |
| Coulomb-Feld | 144 |
| Die elastische Feder als Feld | 145 |
| § 19 Die Bewegung von Körpern in statischen Feldern | 146 |
| Bewegungen | 146 |
| Energiebilanz bei Bewegungen | 147 |
| Impulsbilanz bei Bewegungen | 148 |
| Bewegungsgleichungen | 149 |
| Hamiltonsche Gleichungen | 151 |
| § 20 Spezielle Bewegungsgleichungen und ihre Lösungen | 152 |
| Bewegungsgleichungen eines Newtonschen Körpers im homogenen Kraftfeld | 152 |
| Bahnen eines Newtonschen Körpers im homogenen Kraftfeld | 154 |
| Relativistische Bewegung im homogenen Kraftfeld | 157 |
| Kepler-Problem | 159 |
| Kreisbahnen des Kepler-Problems | 162 |
| Allgemeine Bahnkurven eines Newtonschen Körpers beim Kepler-Problem | 165 |
| Der lineare harmonische Oszillatator | 168 |
| Der 3-dimensionale harmonische Oszillatator | 171 |
| Anwendungen des harmonischen Oszillators | 174 |
| Allgemeine Bedeutung des harmonischen Oszillators | 176 |
| Beispiele harmonischer Oszillatoren | 179 |
| § 21 Bewegung eines elektrisch geladenen Körpers im Magnetfeld | 181 |
| Beschleunigung eines elektrisch geladenen Körpers in einem Magnetfeld | 181 |
| Die Funktion $E(P, r)$ eines geladenen Körpers im Magnetfeld | 182 |
| Bewegungsgleichungen | 184 |
| Das Vektorpotential als Beschreibung des Magnetfeldes | 185 |
| Bahnen eines geladenen Körpers im homogenen Magnetfeld | 186 |
| Relativistische Bewegung im Magnetfeld | 190 |
| § 22 Austausch und Transport von Energie und Impuls durch Felder | 191 |
| Energie- und Impulsbilanz eines statischen Feldes | 191 |
| Die elastische Feder als Modell für den Impulsaustausch und Impulstransport eines Feldes | 194 |

| | |
|--|------------|
| Die statische Näherung eines Feldes | 198 |
| Der leere Raum als Zustand eines Feldes. Trägheitsfeld | 199 |
| § 23 Zwei- und Mehrkörper-Probleme in statischer Näherung | 201 |
| Bewegungsgleichungen | 201 |
| Reduktion eines 2-Körper-Problems auf ein 1-Körper-Problem. | |
| Schwerpunkts- und Relativvariablen | 204 |
| 2-Körper-Probleme mit Feldern vom ersten Typ | 206 |
| Modell eines 2-atomigen Moleküls | 210 |
| Modell eines gestreckten 3-atomigen Moleküls | 211 |
| Hauptachsentransformation | 213 |
| Lösung des Hauptachsenproblems | 214 |
| Eigenschwingungen | 215 |
| Virial-Theorem | 221 |
| Einige Folgerungen aus dem Virial-Theorem | 223 |

V Drehimpuls

| | |
|---|------------|
| § 24 „Natürliche“ Bewegungen. Translation und Rotation | 225 |
| Kinematik der Translation und Rotation | 227 |
| Polare und axiale Vektoren | 229 |
| § 25 Der Drehimpuls | 232 |
| Allgemeine Eigenschaften des Drehimpulses | 232 |
| Bahndrehimpuls eines Körpers | 232 |
| Dynamische Auszeichnung eines Bezugspunkts. Rotations-symmetrische Felder | 238 |
| Bahndrehimpuls eines n-Körper-Systems | 241 |
| Bahndrehimpuls eines 2-Körper-Systems | 242 |
| Bahndrehimpuls eines n-Körper-Systems mit 2-Körper-Wechsel-wirkungen | 244 |
| Der gesamte Drehimpuls eines n-Körper-Systems | 246 |
| Austausch von Drehimpuls zwischen den Partnern eines 2-Körper-Systems | 247 |
| Der Spin | 249 |
| § 26 Energie und Drehimpuls | 251 |
| Zerlegung einer Bewegung in Rotation und 1-dimensionale Bewegung (Schwingung) | 251 |
| Energie als Funktion des Drehimpulses | 253 |
| Energie eines rotierenden starren n-Körper-Systems | 255 |
| Die Komponenten des Trägheitstensors | 256 |
| Steinerscher Satz | 260 |
| Hauptträgheitsachsen | 263 |
| § 27 Rotationsbewegungen eines starren Körpers | 267 |
| Rotation um eine vorgegebene Achse | 267 |

| | |
|--|-----|
| Rollende Bewegung | 268 |
| Gehemmte Rotation. Rotationsschwingungen | 269 |
| Freie Rotation eines starren Körpers. Kreisel | 273 |
| Der Kreisel unter dem Einfluß eines Drehmomentes | 276 |

VI Relativitätstheorie

| | |
|--|-----|
| § 28 Bezugssysteme und Geometrie | 279 |
| § 29 Der absolute Raum und die absolute Zeit Newtons | 280 |
| § 30 Inertialsysteme und Relativitätsprinzip | 281 |
| Inertialsysteme | 281 |
| Relativitätsprinzip | 282 |
| Galilei-Transformation | 283 |
| § 31 Nicht-inertiale Bezugssysteme | 284 |
| Newtons Unterscheidung zwischen „wahren“ Kräften und Trägheitskräften | 284 |
| Rotierende Bezugssysteme | 285 |
| Résumé der Newtonschen Auffassung | 289 |
| Historische Notitz zum Begriff des absoluten Raumes | 289 |
| Das Foucault-Pendel | 290 |
| Kreiselkompaß | 296 |
| Die Funktion $E(P, r)$ im rotierenden Bezugssystem | 296 |
| Larmor-Theorem | 298 |
| Atom im Magnetfeld. Zeeman-Effekt | 299 |
| § 32 Trägheitsfeld und Äquivalenzprinzip | 300 |
| Beschleunigungsfelder | 300 |
| Äquivalenzprinzip | 302 |
| Lichtablenkung im Gravitationsfeld | 304 |
| Rotverschiebung im Gravitationsfeld | 306 |
| § 33 Dynamische Beschreibung von Energietransporten in Beschleunigungsfeldern | 307 |
| Energiebilanz in Beschleunigungsfeldern | 307 |
| Der Newtonsche Grenzfall | 309 |
| Extrem relativistischer Grenzfall | 309 |
| § 34 Zeitablauf gleicher physikalischer Vorgänge an verschiedenen Stellen im Gravitationsfeld | 310 |
| Uhren im Gravitationsfeld | 310 |
| Uhren bei beschleunigten Bewegungen. Zwillingsparadoxon | 312 |
| § 35 Grenzgeschwindigkeit und Relativitätsprinzip | 317 |

| | |
|--|-----|
| § 36 Transformation von Energie, Impuls und Geschwindigkeit beim Übergang zwischen Inertialsystemen | 318 |
| § 37 Lorentz-Transformation | 321 |
| § 38 Relativität der Gleichzeitigkeit. Invariante und nicht-invariante Zeitordnung | 323 |
| § 39 Zeitdehnung und Gestaltsänderung durch Bewegung | 326 |
| Elimination der Retardierung. Transversaler Doppler-Effekt | 326 |
| Auswirkungen des transversalen Doppler-Effekts | 327 |
| Zeitdehnung infolge gradlinig-gleichförmiger Bewegung | 331 |
| Einfluß der Gleichzeitigkeit auf die geometrische Gestalt | 333 |
| Der Aufbau der Relativitätstheorie. Rückschau und Ausblick | 336 |
| § 40 Raum-Zeit-Geometrie der Inertialsysteme | 338 |
| Die Welt der Ereignisse | 339 |
| Die Metrik der Raum-Zeit-Welt | 343 |
| § 41 Wirkung eines Beschleunigungsfeldes auf die Raum-Zeit-Welt | 347 |
| Gleichförmig beschleunigte Bewegung im Inertialsystem | 348 |
| Trägheitsbewegungen in beliebigen Bezugssystemen | 351 |
| Die Weltlinien des Lichts in nicht-inertialen Bezugssystemen | 353 |
| § 42 Gravitationsfelder, die eine Krümmung der Raum-Zeit-Welt bewirken | 355 |
| Der lokale Charakter der Inertialsysteme | 355 |
| Die Krümmung der Raum-Zeit-Welt | 357 |
| Planetensbewegung als geodätische Weltlinie | 359 |
| § 43 Zusammenhang zwischen Krümmung und Verteilung von Energie und Impuls in der Welt | 360 |
| Die Feldgleichungen des Newtonschen Gravitationsfeldes | 361 |
| Die Einsteinschen Feldgleichungen | 361 |
| Kosmologische Weltmodelle | 362 |

VII Gravitation

| | |
|--|-----|
| § 44 Newtons Gravitationstheorie | 367 |
| Die Bewegung des Mondes als freier Fall | 368 |
| Die Keplerschen Gesetze | 370 |
| Kinematische Folgerungen aus den Keplerschen Gesetzen | 371 |
| Newtons Gravitationsgesetz | 371 |
| 2-Körper-Problem | 373 |
| Die potentielle Energie der Gravitationswechselwirkung | 375 |
| Bestimmung der Masse von Himmelskörpern | 377 |
| Hyperbelbewegungen | 378 |

| | |
|---|-----|
| § 45 Ausbau der Newtonschen Gravitationstheorie | 379 |
| Gravitationsfeld einer gegebenen Massenverteilung | 380 |
| Gravitationspotentiale einfacher Massenverteilungen | 381 |
| Die Gravitationsenergie einer Massenverteilung | 387 |
| Das n-Körper-Problem | 387 |
| § 46 Deformationswirkung von Gravitationsfeldern auf ausgedehnte Körper (Gezeiten) | 390 |
| Deformation eines Körpers im inhomogenen Gravitationsfeld | 391 |
| Drehmoment als Folge eines inhomogenen Gravitationsfeldes | 394 |
| Mathematische Beschreibung der Inhomogenität eines Gravitationsfeldes | 395 |
| Gezeiten-Effekte | 397 |
| § 47 Einsteins Theorie der Gravitation | 400 |
| Gravitation als Raum-Zeit-Struktur | 400 |
| Lichtablenkung im Gravitationsfeld | 401 |
| Rot- und Violettverschiebung im Gravitationsfeld | 403 |
| Periheldrehung des Merkur | 405 |
| Laufzeitverzögerung elektromagnetischer Signale im Gravitationsfeld | 405 |
| Gravitationsfeld eines rotierenden Körpers | 406 |
| Ereignishorizont | 407 |
| Endliche und unendliche Zeitintervalle zwischen Ereignispaaren | 409 |
| Der radiale freie Fall im Schwarzschild-Feld | 410 |
| Die Raum-Zeit-Welt eines frei fallenden Beobachters | 413 |
| Schwarzes Loch. Gravitationskollaps | 415 |
| § 48 Gravitationswellen | 417 |
| Erzeugung | 418 |
| Ausbreitung | 421 |
| Nachweis | 421 |
| § 49 Kosmologie | 422 |
| Kosmologische Postulate | 423 |
| Olbers' Paradoxon | 423 |
| Die Expansion des Weltalls | 426 |
| Die 3 K-Weltraumstrahlung | 428 |
| Astrophysikalische Daten | 430 |
| Sachverzeichnis | 432 |
| Naturkonstanten | |
| Wichtige Einheiten | |