

## 1 Bewegungen 11

---

- 1.1 Beschreiben von Bewegungen 12
  - › Methode: Umgang mit Messunsicherheiten 14
- 1.2 Geradlinige Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit 16
  - › Methode: Koordinatentransformation beim Wechsel des Bezugssystems 18
  - › Training: Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit 20
  - › Experiment: Untersuchung nicht gleichförmiger Bewegungen 22
- 1.3 Geradlinige Bewegungen mit veränderlicher Geschwindigkeit 23
  - › Methode: Auswerten von Beschleunigungsvorgängen 26
  - › Training: Bewegungen mit veränderlicher Geschwindigkeit 27
  - › Experiment: Untersuchung von Fallbewegungen 29
- 1.4 Fallbewegungen 30
  - › Methode: Die numerische Rechenmethode durch Schrittverfahren 32
  - › Methode: Videoanalyse 33
- 1.5 Bewegungen in zwei Dimensionen 35
  - › Methode: Regeln für den Umgang mit Vektoren 36
- 1.6 Wurfbewegungen 37
  - › Methode: Konstruktion von Bahnkurven beim schiefen Wurf 39
- 1.7 Die Kreisbewegung 40
- 1.8 Beschleunigung bei der Kreisbewegung 41
  - › Methode: Mathematische Herleitung der Zentripetalbeschleunigung 41
  - › Training: Freier Fall und Kreisbewegung 42
  - Rückblick: Zusammenfassung 44

## 2 Ursache von Bewegungen 45

---

- 2.1 Kräfte 46
- 2.2 Trägheit 48
  - › Experiment: Kräfte beschleunigen Körper 49
- 2.3 Kraft, Masse, Beschleunigung 50
  - › Experiment: Untersuchung der Wechselwirkung von Körpern 51
- 2.4 Kraft und Gegenkraft 52
  - › Exkurs: Die Newton'schen Axiome 53
  - › Training: Kräfte, Massen und Beschleunigung 54
  - › Experiment: Untersuchung von Kreisbewegungen 56
- 2.5 Kräfte bei der Kreisbewegung 57
  - › Experiment: Einsatz von Apps zur Messung physikalischer Größen 58
  - › Exkurs: Kreisbewegungen im Verkehr 59
  - › Exkurs: Scheinkräfte 60
- 2.6 Rotation von Körpern 61
- 2.7 Das Trägheitsmoment 62
  - › Training: Kreis- und Drehbewegungen 63
  - Rückblick: Zusammenfassung 64

## 3 Erhaltungsgrößen 65

---

- 3.1 Energieerhaltung 66
  - › Experiment: Die Bewegungsenergie 68
  - › Experiment: Die Spannenergie 69
- 3.2 Anwendung des Energiekonzepts 70
  - › Methode: Problemlösung mit dem Energiekonzept 71
  - › Training: Energieüberführung 72
- 3.3 Energieübertragung 74
- 3.4 Die Leistung 76
  - › Training: Energie, Arbeit und Leistung 77
- 3.5 Impuls 79
  - › Experiment: Untersuchung von Stoßvorgängen 81
- 3.6 Impuls und Kraft 82
  - › Exkurs: Kraftverlauf bei einem Unfall 83
- 3.7 Drehimpuls und Drehimpulserhaltung 84
  - › Exkurs: Rotation um freie Achsen 85
  - › Training: Impuls und Kraftübertragung 86
  - Rückblick: Zusammenfassung 88

## 4 Gravitationsfeld 89

---

- 4.1 Weltmodelle 90
- 4.2 Bewegungen am Himmel 93
- 4.3 Das Gravitationsgesetz 95
  - › Experiment: Bestimmung der Gravitationskonstanten nach Cavendish 96
  - › Exkurs: Das Entstehen der Gezeiten 98
  - › Methode: Punktweise Berechnung von Planetenbahnen 99
  - › Training: Gravitationsgesetz und Gravitationskräfte 100
- 4.4 Das Gravitationsfeld 102
  - › Training: Gravitationsfeld und Potenzial 104
  - › Exkurs: Felder 105
  - Rückblick: Zusammenfassung 106

## 5 Schwingungen 107

---

- › Experiment: Schwingung eines Federpendels 108
- 5.1 Merkmale von Schwingungen 109
  - › Methode: Die Ableitung in der Physik 111
  - › Methode: Schwingungen in der Zeigerdarstellung 112
  - › Experiment: Ermittlung von Periodendauern 113
- 5.2 Energie von Schwingungen 114
  - › Training: Harmonische Schwingungen 115
- 5.3 Das Fadenpendel 117
  - › Experiment: Resonanz 118
- 5.4 Erzwungene Schwingungen 119
  - › Training: Schwingungen von Faden- und Federpendeln 120
- 5.5 Überlagerung von Schwingungen 122
  - › Exkurs: Analoge und digitale Daten 124
  - › Training: Überlagerung von Schwingungen 125
  - Rückblick: Zusammenfassung 126

## **6** Wellen 127

---

- 6.1 Entstehung von Wellen 128
- 6.2 Harmonische Wellen 130
  - › Methode: Mathematische Beschreibung von Wellen 133
  - › Exkurs: Erdbeben und Tsunamis 134
- 6.3 Der Doppler-Effekt 135
  - › Training: Beschreibung und Ausbreitung von Wellen 136
- 6.4 Überlagerung von Wellen 137
  - › Methode: Wellen und Zeiger 139
  - › Methode: Interferenz im Zeigermodell 140
  - › Experiment: Erzeugung stehender Wellen an einem Gummiband 141
  - › Experiment: Erzeugung stehender Wellen im Resonanzrohr 141
- 6.5 Stehende Wellen 142
  - › Training: Überlagerung von Wellen 144
  - › Experiment: Ausbreitung von Wasserwellen 146
- 6.6 Das Huygens'sche Prinzip 148
  - › Experiment: Versuche mit Ultraschall 150
- 6.7 Ultraschall 151
  - Rückblick: Zusammenfassung 152

## **7** Elektrisches Feld 153

---

- 7.1 Die elektrische Ladung 154
  - › Experiment: Ladungsmessung 156
  - › Methode: Bestimmung der Fläche unter einer Kurve – Ermittlung einer Ladung 157
- 7.2 Das elektrische Feld 158
  - › Experiment: Die elektrische Feldstärke 160
- 7.3 Das Coulomb'sche Gesetz 161
  - › Exkurs: Elektrische Filter für die Rauchgasreinigung 161
  - › Methode: Bestimmung funktionaler Zusammenhänge durch Regression 162
  - › Exkurs: Drucken und Lackieren – mit Hilfe elektrischer Ladung 163
  - › Training: Elektrische Ladung und elektrisches Feld 164
- 7.4 Energie und Spannung im elektrischen Feld 166
  - › Training: Energie und Spannung 168
  - › Experiment: Eigenschaften des Kondensators 169
- 7.5 Der Kondensator, ein Ladungsspeicher 170
  - › Exkurs: Konstanten in der Physik 172
  - › Experiment: Aufladen und Entladen von Kondensatoren 173
- 7.6 Der Kondensator im Stromkreis 174
  - › Exkurs: Blitze und Gewitter 176
  - › Training: Kondensatoren 177
- 7.7 Ladungsträger im elektrischen Feld 179
  - › Exkurs: Ablenkung in einer Elektronenstrahlröhre 180
  - › Experiment: Die Ladung des Elektrons – der Millikanversuch 181
- 7.8 Nachweis der Elementarladung 182
  - › Exkurs: Der piezoelektrische Effekt 183
  - › Training: Ladungsträger im elektrischen Feld 184
  - Rückblick: Zusammenfassung 186

## 8 Magnetisches Feld 187

---

- 8.1 Das magnetische Feld 188
  - › Experiment: Die magnetische Feldstärke 190
- 8.2 Quantitative Beschreibung des Magnetfeldes 191
  - › Training: Magnetfeld und Lorentzkraft 193
- 8.3 Der Hall-Effekt 194
- 8.4 Magnetische Felder spezieller Leiteranordnungen 195
  - › Experiment: Untersuchung der Magnetfelder in Spulen 197
  - › Exkurs: Elektrizitätsleitung in festen Stoffen 199
  - › Training: Magnetfelder von Spulen und Hall-Effekt 200
  - › Experiment: Bestimmung der spezifischen Elektronenmasse 202
- 8.5 Elektronen haben eine Masse 203
  - › Exkurs: Geladene Teilchen in Feldern 204
  - › Training: Ladungsträger im Magnetfeld 206
  - Rückblick: Zusammenfassung 208

## 9 Induktion 209

---

- › Exkurs: Elektrodynamik 210
- › Experiment: Spannung wird erzeugt 211
- 9.1 Elektrische Spannung durch Magnetfelder 212
  - › Methode: Induktionsspannung und Differenzialrechnung 213
  - › Experiment: Der Thomson'sche Ringversuch 214
- 9.2 Die Lenz'sche Regel 215
  - › Exkurs: Wirbelströme 217
- 9.3 Selbstinduktion 218
- 9.4 Die Spule als Energiespeicher 219
  - › Training: Spannungserzeugung und Selbstinduktion 220
  - › Experiment: Leiterschleifen im Magnetfeld 222
- 9.5 Wechselspannung und Wechselstrom 223
- 9.6 Elektrische Energie, Leistung und Wirkungsgrad 224
  - › Methode: Mathematische Beschreibung der Wechselspannung 225
  - › Experiment: Kondensator oder Spule im Wechselstromkreis 226
- 9.7 Wechselstromkreis mit Kondensator oder Spule 227
  - › Methode: Mathematische Betrachtung des Wechselstromkreises 228
  - › Exkurs: Drehstrom 229
  - › Experiment: Messungen am Transformator 230
- 9.8 Der Transformator 231
  - › Training: Wechselstromkreis und Transformator 232
  - Rückblick: Zusammenfassung 234

## 10 Elektromagnetische Wellen 235

---

- 10.1 Der elektromagnetische Schwingkreis 236
  - › Methode: Herleitung der Thomson'schen Schwingungsgleichung 237
  - › Methode: Vergleich von mechanischen und elektromagnetischen Schwingungen 238
  - › Exkurs: RFID – Identifizierungs-Geräte 239
  - › Experiment: Versuche mit Mikrowellen 240

- 10.2 **Elektromagnetische Wellen** 241
  - › Exkurs: Elektromagnetische Wellen im Alltag 244
  - › Experiment: Untersuchung der Strahlung eines elektromagnetischen Schwingkreises 245
- 10.3 **Die Entstehung elektromagnetischer Wellen** 246
  - › Training: Elektromagnetische Schwingungen und Wellen 248
  - › Exkurs: Informationsübertragung mit elektromagnetischen Wellen 249
  - Rückblick: Zusammenfassung 250

## 11 Wellenmodell des Lichtes 251

---

- › Experiment: Untersuchung von Licht am Doppelspalt 252
- 11.1 **Interferenzen am Doppelspalt** 253
- 11.2 **Modelle des Lichtes** 255
- 11.3 **Die Geschwindigkeit des Lichtes** 257
  - › Experiment: Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach Foucault 258
- 11.4 **Übergang vom Doppelspalt zum optischen Gitter** 259
  - › Experiment: Bestimmung der Wellenlänge von Licht 260
  - › Training: Lichtgeschwindigkeit und Interferenz am Doppelspalt 261
  - › Methode: Licht und Zeigerdiagramme 263
- 11.5 **Interferometer** 264
  - › Exkurs: Farberscheinungen an dünnen Schichten 265
- 11.6 **Beugung von Licht** 267
  - › Training: Interferometer und Beugung am Spalt 269
  - › Experiment: Untersuchung der Polarisierung von Licht 270
- 11.7 **Polarisation des Lichtes** 271
- 11.8 **Röntgenstrahlung** 272
- 11.9 **Das Spektrum elektromagnetischer Strahlung** 274
  - › Training: Polarisation des Lichtes und Röntgenstrahlung 276
  - Rückblick: Zusammenfassung 278

## 12 Quantenobjekte 279

---

- 12.1 **Quantenobjekte** 280
  - › Experiment: Interferenz von Elektronen an einer Graphitpulverschicht 281
  - › Methode: Mathematische Beschreibung der Elektronenbeugung 282
- 12.2 **Interferenz von Elektronen** 283
- 12.3 **Wahrscheinlichkeitsinterpretation** 284
- 12.4 **Photonen – Quantenobjekte des Lichtes** 285
- 12.5 **Photonen im Interferometer** 286
  - › Exkurs: Präparation dynamischer Eigenschaften 288
  - › Methode: Zeiger in der Quantenphysik 289
  - › Training: Interferenz von Quantenobjekten 290
- 12.6 **Die Unbestimmtheitsrelation** 292
- 12.7 **Der Tunneleffekt** 294
  - › Experiment: Der Fotoeffekt 295
- 12.8 **Licht löst Elektronen aus** 296
  - › Exkurs: Geschichte des Fotoeffekts 298
  - › Experiment: Leuchtdioden als Photonenquelle 299
  - › Training: Fotoeffekt und Unbestimmtheitsrelation 300
  - › Experiment: Untersuchung von Röntgenstrahlung 302

- 12.9 Röntgenstrahlung 303
- 12.10 Verschränkung 305
  - › Training: Röntgenstrahlung und Compton-Effekt 307
  - › Exkurs: Deutungen 309
- 12.11 Delayed-Choice-Experimente 311
  - Rückblick: Zusammenfassung 312

## 13 Atomphysik 313

---

- 13.1 Atome 314
  - › Experiment: Der Franck-Hertz-Versuch 316
- 13.2 Anregung und Ionisation von Atomen 317
  - › Experiment: Untersuchung des Lichtes verschiedener Spektralröhren 318
  - › Experiment: Untersuchung des Sonnenlichtes 318
- 13.3 Spektraluntersuchungen 319
  - › Experiment: Flammenuntersuchungen 319
  - › Exkurs: Spektralanalyse in der Astronomie 321
- 13.4 Untersuchung von Wasserstoff 322
  - › Exkurs: Leistungen und Grenzen des Bohr'schen Atommodells 323
  - › Training: Atomvorstellung und Energiezustände 324
- 13.5 Das Modell des Potenzialtopfs 326
  - › Methode: Elektronen im eindimensionalen Potenzialtopf – Zeigerdarstellung 328
- 13.6 Farbstoffe 329
  - › Methode: Die Schrödingergleichung 330
- 13.7 Das Wasserstoff-Atom 331
  - › Exkurs: Atome mit mehreren Elektronen 333
  - › Exkurs: Ordnung im Periodensystem 334
  - › Training: Potenzialtopfmodell und Wasserstoff-Atom 335
  - › Experiment: Aufnahme von Röntgenspektren 337
- 13.8 Charakteristisches Röntgenspektrum 338
- 13.9 Laser 340
  - › Exkurs: Anwendungen von Lasern 341
  - › Training: Röntgenspektren und Laser 342
- 13.10 Vom Atom zur Materie 344
- 13.11 Halbleiter und Leiter 346
- 13.12 p-n-Übergang und Leuchtdioden 348
  - › Training: Halbleiter 349
  - Rückblick: Zusammenfassung 350

## 14 Kernphysik 351

---

- 14.1 Atomkerne 352
- 14.2 Strahlung radioaktiver Stoffe 353
- 14.3 Nachweis der Radioaktivität mit dem Geiger-Müller-Zählrohr 354
  - › Experiment: Das Geiger-Müller-Zählrohr 354
  - › Methode: Zählstatistik 355
  - › Exkurs: Detektoren 356
  - › Experiment: Nachweis der verschiedenen Strahlungsarten 357
- 14.4 Eigenschaften ionisierender Strahlung 358
  - › Experiment: Schwächung von  $\gamma$ -Strahlung 359

- 14.5 **Schwächung von  $\gamma$ -Strahlung** 360
  - › Methode: Theorie führt zu Gesetzen 360
  - › Training: Strahlung radioaktiver Stoffe und Strahlungsnachweis 361
- 14.6 **Die Entstehung ionisierender Strahlung** 363
  - › Exkurs: Die Energie der  $\gamma$ -Strahlung 365
  - › Exkurs: Die Entdeckung des Neutrons 365
- 14.7 **Radioaktiver Zerfall** 366
  - › Methode: Modellexperimente zur Radioaktivität 368
  - › Exkurs: Altersbestimmung mit radioaktiven Stoffen 369
  - › Training: Entstehung radioaktiver Strahlung und radioaktiver Zerfall 370
- 14.8 **Dosimetrische Größen** 372
- 14.9 **Strahlenbelastung des Menschen** 373
  - › Exkurs: Moderne Physik – moderne Medizin 375
- 14.10 **Energie aus dem Atomkern** 376
  - › Exkurs: Leichtwasser-Kernreaktoren 378
  - › Exkurs: Nutzen und Risiken der Kernenergietechnik 379
  - › Exkurs: Wissenschaft und Gesellschaft 381
  - › Training: Energie aus dem Atomkern und Kernenergietechnik 382
- 14.11 **Elementarteilchen** 384
  - Rückblick: Zusammenfassung 388

## 15 Astrophysik 389

---

- 15.1 **Unser Sonnensystem** 390
  - › Exkurs: Gezeitenkräfte im Sonnensystem 392
- 15.2 **Die Sonne** 393
- 15.3 **Kernfusion in der Sonne** 394
- 15.4 **Einteilung der Sterne** 396
- 15.5 **Sternentstehung** 398
- 15.6 **Wie Sterne enden** 400
  - › Training: Leben und Sterben der Sterne 403
- 15.7 **Struktur des Universums** 404
- 15.8 **Rotverschiebung und Urknall** 406
- 15.9 **Exoplaneten** 409
  - › Training: Entwicklung des Universums 411
  - Rückblick: Zusammenfassung 412

## 16 Thermodynamik 413

---

- › Experiment: Die Gasgesetze 414
- 16.1 **Das thermische Verhalten von Gasen** 415
- 16.2 **Druck und Temperatur im Teilchenmodell** 417
  - › Methode: Berechnung des Gasdrucks im Teilchenmodell 418
- 16.3 **Thermische Energie** 419
  - › Training: Gasgesetze und thermische Energie 422
- 16.4 **Entropie** 424
  - › Methode: Berechnung der Arbeit bei isothermer Expansion 426
- 16.5 **Erster und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik** 427
  - › Exkurs: Kühltisch und Wärmepumpe 429
- 16.6 **Die Umsetzung von Energie durch Motoren** 430
  - › Methode: Arbeitsdiagramm und Wirkungsgrad 431

- 16.7 Energieversorgung 432
- 16.8 Strahlungsgesetze 434
  - › Training: Kreisprozesse, Energieversorgung, Strahlungsgesetze 436
  - › Methode: Strahlungshaushalt im Modell 438
- 16.9 Der Treibhauseffekt 439
- 16.10 Anthropogener Treibhauseffekt 440
  - › Experiment: Absorption von Wärmestrahlung 443
  - Rückblick: Zusammenfassung 444

## 17 Relativitätstheorie 445

---

- 17.1 Ereignisse, Bezugssysteme und Beobachter 446
  - › Exkurs: Synchronisation von Uhren 447
- 17.2 Die Einstein'schen Postulate 448
  - › Experiment: Das Michelson-Morley-Experiment 450
- 17.3 Relativität der Gleichzeitigkeit 451
- 17.4 Zeitdilatation 452
  - › Exkurs: Das Hafele-Keating-Experiment 453
- 17.5 Längenkontraktion 454
  - › Methode: Gedankenexperimente 455
  - › Exkurs: Die Raumzeit 455
  - › Experiment: Thermoskannenversuch zum Myonenzerfall 456
  - › Exkurs: Transformationen 457
  - › Methode: Minkowski-Diagramme 458
- 17.6 Das Zwillingsparadoxon 459
  - › Methode: Relativistische Geschwindigkeitsaddition 460
  - › Exkurs: Vergangenheit und Zukunft 460
  - › Training: Relativität der Gleichzeitigkeit, Zeitdilatation und Längenkontraktion 461
  - › Experiment: Zyklotron-Experimente 463
- 17.7 Äquivalenz von Masse und Ruheenergie 464
  - › Exkurs: Relativistische Masse 465
  - › Methode: Masse, Energie und Impuls 466
  - › Training: Minkowski-Diagramme und Energie-Masse-Äquivalenz 467
- 17.8 Allgemeine Relativitätstheorie 468
  - › Exkurs: Orientierung und Positionsbestimmung mit Satellitennavigation 469
  - Rückblick: Zusammenfassung 470

---

### Übungsaufgaben 471

- Anhang
- Tabellen 482
- Stichwort- und Personenverzeichnis 491
- SI-Einheiten 498
- Grundregeln für das Experimentieren 499
- Bildquellen 500