

# Inhaltsverzeichnis

## 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 schießen 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

---

- 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 Polarisation 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 Photonquelle 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 Bohrschen 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: Kühlschrank 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 Myonenzerrfall 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