Inhaltsverzeichnis

A Mechanik starrer Körper 1

1 Grundbegriffe der Kinematik 3
1.1 Zeit 3
1.2 Länge 6
1.3 Winkel 9

2 Abgeleitete Begriffe der Kinematik: Geschwindigkeit und Beschleunigung 11
2.1 Vorbemerkungen 11
2.2 Geradlinige Bewegung 12
2.3 Kreisbewegung 15
2.4 Überlagerung von Bewegungen 19
2.5 Zusammenstellung und Vergleich der wichtigsten Beziehungen 21

3 Grundbegriffe der Dynamik: Masse und Kraft 23
3.1 Eigenschaften von Masse und Kraft 23
3.2 Das statische Gleichgewicht: Kräfte und Drehmomente . . . 24
3.3 Verknüpfung zwischen Kraft und Masse (Einheiten und Meßmethoden) 25
3.4 Körpereigenschaften: Dichte und Massenmittelpunkt 27
3.5 Reibung zwischen festen Körpern 30
3.6 Zusammenfassung 32

4 Dynamisches Gleichgewicht 33
4.1 Die Trägheitskraft 33
4.2 Das d'Alembertsche Prinzip 34
4.3 Beispiele 35
4.4 Zusammenfassung 38

5 Übergeordnete Begriffe: Arbeit und Energie 39
5.1 Arbeit und Leistung 39
5.2 Beispiele für Arbeiten 40
5.3 Energie und Energiesatz 42
5.4 Beispiele 44
5.5 Lösung physikalischer Probleme mit dem Energiesatz 46
5.6 Zusammenfassung 49

6 Impuls 51
6.1 Kraftstoß und Impuls: Impulssatz 51
6.2 Der Impulserhaltungssatz 53
6.3 Schwerpunktsatz 54
6.4 Zusammenfassung 55

7 Anwendungen von Impuls- und Energiesatz: Stöße 57
7.1 Vorbemerkungen 57
7.2 Zentrischer inelastischer Stoß 58
7.3 Zentrischer elastischer Stoß 59
7.4 Dezentraler elastischer Stoß 61
7.5 Systeme mit veränderlicher Masse 63
7.6 Zusammenfassung 69

8 Drehbewegungen 71
8.1 Arbeit und Leistung bei Drehbewegungen 71
8.2 Rotationsenergie, Erweiterung des Energiesatzes 73
8.3 Drehimpuls: Momentenstoß und Drehimpulssatz 75
8.4 Bahndrehimpuls und Eigendrehimpuls 77
8.5 Drehschemelexperimente zum Drehimpuls 78
8.6 Gegenüberstellung der wichtigsten Beziehungen 80

9 Trägheitsmoment 81
9.1 Vorbemerkungen 81
9.2 Experimentelle Bestimmung von Trägheitsmomenten 81
9.3 Berechnung von Trägheitsmomenten 83
9.4 Trägheitsmoment als Tensor 87
9.5 Geometrische Darstellung des Trägheitstensors 92
9.6 Beispiel: Hantel, Bedeutung der Zentrifugalmomente 93
9.7 Zusammenfassung 95

10 Anwendungen des Drehimpulssatzes 97
10.1 Momentane Drehachse 97
10.2 Beispiele 99
10.2.1 Kugel oder Zylinder auf einer schiefen Ebene 99
10.2.2 Stoßprobleme 101
10.3 Nutation des symmetrischen momentenfreien Kreisels 103
10.4 Präzession des symmetrischen Kreisels 106
10.5 Beispiele zur Kreiselbewegung 107
10.6 Zusammenfassung 109

11 Bezugssysteme 111
11.1 Vorbemerkungen 111
11.2 Bezugssysteme mit konst. Relativgeschwindigkeit ($u \ll c$) . . 112
11.3 Linear beschleunigte Bezugssysteme 114
11.4 Rotierende Bezugssysteme 116
11.4.1 Die Zentrifugalkraft 116
11.4.2 Die Coriolis-Kraft 117
11.5 Die Erde als rotierendes Bezugssystem 120
11.5.1 Zentrifugalbeschleunigung 120

11.5.2 Coriolis-Beschleunigung . . . 121
11.5.3 Der Kreiselkompaß . . . 122
11.6 Zusammenfassung . . . 123

12 Relativistik (Systeme mit hoher Relativgeschwindigkeit) . 125
12.1 Vorbemerkungen: der Konflikt . . . 125
12.2 Geometrische Darstellung . . . 127
12.3 Der Bondische k-Faktor . . . 129
12.4 Messung von Entfernungen und Geschwindigkeiten . . . 129
12.5 Die Zeitdilatation und das Zwillingsparadoxon . . . 131
12.6 Die Längenkontraktion . . . 133
12.7 Die Lorentz-Transformationen . . . 135
12.8 Transformation von Geschwindigkeiten . . . 137
12.9 Absolut und relativ: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft 139
12.10 Masse, Impuls, Energie . . . 141
12.11 Zusammenfassung . . . 145

13 Gravitation . . . 147
13.1 Das Gravitationsgesetz . . . 147
13.1.1 Einleitende Bemerkungen . . . 147
13.1.2 Die Gravitationskonstante . . . 148
13.2 Die Gravitationsfeldstärke . . . 149
13.3 Potentielle Energie und Gravitationspotential . . . 151
13.4 Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung . . . 153
13.4.1 Formulierung der Gesetze . . . 153
13.4.2 Einfache Erklärung der Gesetze . . . 154
13.4.3 Physikalische Daten von Sonne und Planeten . . . 155
13.5 Ergänzungen . . . 156
13.5.1 Satellitenbahnen . . . 156
13.5.2 Zentralbewegungen . . . 158
13.6 Zusammenfassung . . . 160

B Mechanik deformierbarer Körper . . . 161

14 Aufbau der Körper . . . 163
14.1 Vorbemerkungen . . . 163
14.2 Feste Körper . . . 164
14.2.1 Allgemeines zur Bindung . . . 164
14.2.2 Bindungstypen . . . 165
14.2.3 Idealkristalle - Realkristalle . . . 167
14.3 Flüssige Körper . . . 169
14.4 Gasförmige Körper . . . 170

15 Körper unter äußeren Spannungen . . . 171
15.1 Definitionen . . . 171
15.2 Feste Körper unter äußeren Spannungen . . . 172
15.2.1 Normalspannung . . . 172
15.2.2 Tangentialspannung und allseitiger Zug/Druck . . . 173
15.2.3 Zusammenhang zwischen den elastischen Konstanten 175

15.3 Anwendungsbeispiele: Biegung und Torsion; Experimentelle Bestimmung der elastischen Konstanten . . . 177
15.3.1 Biegung eines Balkens . . . 177
15.3.2 Torsion eines zylindrischen Stabes . . . 180
15.4 Flüssigkeiten unter Druck . . . 182
15.4.1 Kolbendruck, Kompressibilität von Flüssigkeiten . . . 182
15.4.2 Schweredruck in Flüssigkeiten . . . 183
15.4.3 Auftrieb . . . 183
15.5 Gase unter Druck . . . 184
15.5.1 Kompressibilität von Gasen . . . 184
15.5.2 Schweredruck in Gasen . . . 185
15.6 Grundgleichungen der kinetischen Gastheorie . . . 187
15.6.1 Wirkungsquerschnitt und mittlere freie Weglänge . . . 187
15.6.2 Gaskinetische Deutung des Drucks . . . 188
15.7 Zusammenstellung der wichtigsten Beziehungen . . . 193

16 Oberflächen und Grenzflächen . . . 195
16.1 Vorbemerkungen . . . 195
16.2 Oberflächenspannung und Oberflächenenergie . . . 196
16.3 Spezifische Oberflächenenergie fester Körper . . . 200
16.4 Grenzflächen zwischen festen und flüssigen Körpern . . . 201
16.4.1 Benetzbarkeit und Randwinkel . . . 201
16.4.2 Kapillarität . . . 203
16.5 Zusammenfassung . . . 206

17 Strömungen in Flüssigkeiten und Gasen . . . 207
17.1 Vorbemerkungen und Definitionen . . . 207
17.2 Reibungsbehaftete Strömung – Innere Reibung und Grenzschicht . . . 209
17.3 Beispiele zur reibungsbehafteten Strömung . . . 211
17.3.1 Experimente mit dem Stromfädenapparat . . . 211
17.3.2 Schlichte Strömung zwischen parallelen Platten . . . 211
17.3.3 Schlichte Strömung durch ein Rohr . . . 213
17.3.4 Laminare Umströmung einer Kugel . . . 215
17.3.5 Zahlenwerte und Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit . . . 217
17.4 Laminare und turbulente Strömungen . . . 218
17.5 Die ideal reibungsfreie Flüssigkeitsströmung . . . 220
17.5.1 Bernoullische Gleichung . . . 220
17.5.2 Anwendungsbeispiele der Bernoullischen Gleichung . . . 223
17.6 Reale Strömungen . . . 227
17.7 Zusammenfassung . . . 230

C Elektrik . . . 231

18 Strom, Spannung, Ladung . . . 233
18.1 Vorbemerkungen . . . 233
18.2 Strom und Ladung . . . 234
18.2.1 Merkmale des elektrischen Stroms . . . 234

18.2.2 Einheit des elektrischen Stromes – Definition der Ladung . . . 235
18.2.3 Strommeßgeräte . . . 237
18.3 Die elektrische Spannung . . . 238
18.3.1 Merkmale der elektrischen Spannung . . . 238
18.3.2 Einheit der elektrischen Spannung . . . 238
18.3.3 Spannungsmeßgeräte . . . 240

19 Der elektrische Widerstand . . . 241
19.1 Definition und Einheit . . . 241
19.2 Charakterisierung von Leitertypen durch Strom-Spannungs-Kennlinien . . . 241
19.2.1 Ohmsche Leiter . . . 242
19.2.2 Nicht-ohmsche Leiter . . . 242
19.3 Klassifizierung ohmscher Leiter . . . 244
19.3.1 Klassifizierung nach Größe . . . 244
19.3.2 Klassifizierung nach Temperaturverhalten . . . 245
19.4 Gleichstromkreise – Kirchhoffsche Regeln . . . 246
19.4.1 Knoten- und Maschenregel . . . 246
19.4.2 Einfache Schaltkreise . . . 248
19.5 Der elektrodynamische Strom-Spannungsmesser – das Galvanometer . . . 250
19.5.1 Spannungs- und Stromfehlerschaltung . . . 250
19.5.2 Galvanometer als Strom-Spannungsmesser . . . 251
19.5.3 Das Galvanometer als Ladungsmeßgerät . . . 251
19.6 Zusammenfassung . . . 253

20 Das elektrische Feld . . . 255
20.1 Der Feldbegriff . . . 255
20.1.1 Skalare und vektorielle Felder . . . 255
20.1.2 Beispiele für elektrische Felder . . . 256
20.2 Das homogene elektrische Feld . . . 257
20.2.1 Beobachtungen und Messungen im homogenen Feld . . . 257
20.2.2 Definition der Feldgrößen E und D . . . 258
20.2.3 Influenz: die Verschiebungsdichte als Feldgröße . . . 259
20.3 Das inhomogene elektrische Feld . . . 261
20.3.1 Zusammenhang zwischen Spannung und Feldstärke . . . 261
20.3.2 Das elektrostatische Potential . . . 262
20.4 Zusammenfassung . . . 265

21 Beispiele: Potentiale und elektrische Felder . . . 267
21.1 Das homogene Feld zwischen zwei ebenen geladenen Platten . . . 267
21.2 Potential einer geladenen Kugel (Coulomb-Potential) . . . 269
21.3 Potential einer beliebigen Ladungsverteilung . . . 270
21.4 Potential und Feld eines elektrischen Dipols . . . 271
21.5 Feld und Potential eines unendlich langen geraden Drahtes . . . 273
21.6 Zusammenstellung der wichtigsten Beziehungen . . . 275

22 Der elektrische Fluß 277
22.1 Definition des elektrischen Flusses – Gaußscher Satz 277
22.2 Anwendungen des Gaußschen Satzes 279
22.2.1 Feld einer linearen Ladungsverteilung 280
22.2.2 Elektrisches Feld einer Punktladung 280
22.2.3 Feld einer kugelförmigen Ladungsverteilung 281
22.2.4 Feld einer ebenen Ladungsverteilung 282
22.3 Zusammenfassung 283

23 Materie im elektrischen Feld (I. Leiter) 285
23.1 Vorbemerkungen 285
23.2 Leiter als Ladungsträger 285
23.3 Der Kondensator 287
23.3.1 Definition der Kapazität 287
23.3.2 Der Plattenkondensator 288
23.3.3 Der Kugelkondensator 289
23.3.4 Der Zylinderkondensator 290
23.4 Schaltkreise 291
23.4.1 Knoten- und Maschenregel 291
23.4.2 Hintereinanderschaltung von Kondensatoren 292
23.4.3 Parallelschaltung von Kondensatoren 293
23.4.4 Ladevorgang eines Kondensators 293
23.5 Zusammenfassung 295

24 Kräfte und Drehmomente im elektrischen Feld 297
24.1 Kraft und Arbeit 297
24.2 Energie des elektrischen Feldes 299
24.3 Kraftwirkung zwischen Ladungen 300
24.4 Kraftwirkung zwischen Kondensatorplatten 301
24.5 Dipole in elektrischen Feldern 303
24.5.1 Dipol im homogenen Feld 303
24.5.2 Dipol im inhomogenen Feld 305
24.6 Zusammenfassung 306

25 Materie im elektrischen Feld (II. Isolatoren) 307
25.1 Polarisation – Plattenkondensator mit Dielektrikum (experimentelle Feststellungen) 307
25.2 Deutung des experimentellen Befunds (Dielektrika in der Form paralleler Platten) 310
25.3 Geometrische Gestalt des Dielektrikums 314
25.4 Mikroskopische Betrachtungen 315
25.4.1 Übersicht 315
25.4.2 Dielektrische Stoffe 316
25.4.3 Paraelektrische Stoffe 318
25.5 Zusammenfassung 321

26 Kräfte auf Dielektrika in elektrischen Feldern 323
26.1 Kraftwirkung in Richtung der Feldlinien 323
26.2 Kraftwirkung senkrecht zu den Feldlinien 325

26.3 Experimentelle Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten mit der Steighöhenmethode . . . 328
26.4 Drehmomente auf dielektrische Stäbchen im elektr. Feld . . 328
26.5 Brechungsgesetz für Feldlinien . . . 330
26.6 Kondensatoren mit mehreren Dielektrika . . . 333
26.6.1 Hintereinanderschaltung zweier Dielektrika . . . 333
26.6.2 Parallelschaltung zweier Dielektrika . . . 333
26.7 Zusammenfassung . . . 334

27 Magnetisches Feld und Induktion . . . 335
27.1 Beispiele für homogene und inhomogene magnetische Felder . 335
27.2 Das homogene Magnetfeld einer langen Spule . . . 336
27.3 Die elektromagnetische Induktion . . . 338
27.3.1 Qualitative Befunde zum Induktionsgesetz . . . 338
27.3.2 Eichung des ballistischen Galvanometers . . . 339
27.3.3 Quantitative Herleitung des Induktionsgesetzes . . . 339
27.4 Weitere Formen des Induktionsgesetzes Magnetischer Fluß und magnetische Flußdichte . . . 341
27.5 Das Induktionsgesetz in Feldgrößen . . . 344
27.6 Zusammenfassung . . . 347

28 Inhomogene Magnetfelder – das Durchflutungsgesetz . . . 349
28.1 Linienintegral der magnetischen Feldstärke . . . 349
28.1.1 Vorbemerkung . . . 349
28.1.2 Der magnetische Spannungsmesser . . . 349
28.1.3 Eichung des magnetischen Spannungsmessers . . . 351
28.2 Anwendungen des magnetischen Spannungsmessers . . . 352
28.2.1 Lange Spule . . . 352
28.2.2 Stromführender Draht . . . 353
28.3 Das Durchflutungsgesetz . . . 354
28.3.1 Leitungsströme . . . 354
28.3.2 Verschiebungsströme . . . 355
28.3.3 Durchflutungsgesetz als Verknüpfung zwischen Feldern . . . 356
28.4 Anwendungen des Durchflutungsgesetzes (Magnetische Felder einfacher Stromverteilungen) . . . 358
28.4.1 Magnetische Feldstärke eines geraden Leiters . . . 358
28.4.2 Magnetisches Feld im Innern eines dicken Kabels . . . 358
28.4.3 Magnetisches Feld eines Flächenstroms . . . 359
28.4.4 Magnetisches Feld einer langen Spule . . . 360
28.4.5 Magnetisches Feld einer Toroidspule . . . 360
28.5 Zusammenfassung . . . 362

29 Kräfte und Drehmomente im magnetischen Feld . . . 363
29.1 Kraft auf einen stromführenden Leiter im homogenen Feld . 363
29.2 Weitere Formen des Lorentz-Gesetzes . . . 365
29.2.1 Exakte vektorielle Formulierung . . . 365
29.2.2 Kraft auf eine bewegte Punktladung im magnetischen Feld . . . 365

29.3 Drehmoment auf eine stromdurchflossene Leiterschleife . . . 367
29.4 Potentielle Energie eines magnetischen Dipols im magnetischen Feld . . . 368
29.5 Dipol im inhomogenen Feld . . . 369
29.6 Kraft zwischen parallelen stromdurchflossenen Leitern . . . 370
29.7 Zusammenfassung . . . 371

30 Magnetfelder beliebiger Stromverteilungen . . . 373
30.1 Das Biot-Savartsche Gesetz . . . 373
30.2 Magnetfeld eines geraden Drahtes . . . 374
30.3 Magnetisches Feld auf der Achse einer kreisförmigen Stromschleife . . . 375
30.4 Magnetische Feldstärke auf der Achse eines Solenoids . . . 376
30.5 Helmholtz-Spulen . . . 379
30.6 Rayleighsche Stromwaage . . . 380
30.7 Zusammenfassung . . . 381

31 Ergänzungen zum Induktionsgesetz . . . 383
31.1 Selbstinduktion und Gegeninduktion . . . 383
31.1.1 Die Selbstinduktion . . . 383
31.1.2 Die Gegeninduktion . . . 384
31.2 Schaltkreis mit Spule: Wirkung der Selbstinduktion . . . 385
31.3 Energiedichte des magnetischen Feldes . . . 387
31.4 Erweiterung des Induktionsgesetzes . . . 388
31.5 Einige Induktionsexperimente . . . 390
31.5.1 Zur Lageänderung der Induktions-Leiterschleife . . . 390
31.5.2 Das Heringsche Paradoxon . . . 391
31.5.3 Bewegung eines Leiters im konstanten B-Feld . . . 391
31.5.4 Zur Relativbewegung zwischen Leiter und magnetischem Feld . . . 392
31.6 Wirbelströme: Experimente zur Lenzschen Regel . . . 393
31.6.1 Die fallende Münze im magnetischen Feld . . . 393
31.6.2 Die Induktionskanone . . . 394
31.7 Zusammenfassung . . . 395

32 Relativbewegungen – die elektromagnetische Kraft . . . 397
32.1 Die allgemeine Lorentz-Kraft . . . 397
32.2 Gedankenexperiment zur Lorentz-Kraft . . . 398
32.3 Transformation der Felder . . . 398
32.4 Zum Gesetz von Biot-Savart . . . 401
32.5 Zusammenfassung . . . 402

33 Materie im magnetischen Feld . . . 403
33.1 Vorbemerkungen . . . 403
33.2 Experimentelle Befunde: Spule mit Materie . . . 403
33.3 Magnetisierung . . . 405
33.4 Klassifikation der magnetischen Materialien . . . 407
33.4.1 Meßmethoden der Permeabilität . . . 407
33.4.2 Klassifikation der Materialien . . . 408

33.5 Mikroskopische Betrachtungen 411
33.5.1 Diamagnetismus 411
33.5.2 Paramagnetismus 411
33.5.3 Ferromagnetismus 412
33.6 Zusammenfassung und Gegenüberstellung 414

34 Wechselstrom und Wechselstrom-Widerstände 415
34.1 Wechselstromquellen Rotierende Spulen – Zeigerdarstellung . 415
34.2 Dreiphasenstrom 416
34.3 Wechselstromwiderstände: Qualitative Experimente 417
34.4 Wechselstromwiderstände: Quantitative Behandlung 418
34.4.1 Ohmscher Widerstand 418
34.4.2 Induktiver Widerstand 418
34.4.3 Kapazitiver Widerstand 420
34.5 Schaltungsbeispiel 421
34.6 Komplexe Wechselstromrechnung 422
34.7 Beispiele zur komplexen Wechselstromrechnung 425
34.7.1 Hintereinanderschaltung von Spule und ohmschem Widerstand 425
34.7.2 Hintereinanderschaltung von Spule, ohmschem Widerstand und Kondensator 426
34.7.3 Parallelschaltung von Spule und Kondensator 427
34.8 Effektivwerte von Strom und Spannung 429
34.9 Der Transformator 430
34.10 Zusammenfassung 432

35 Wechselströme: Ergänzungen 433
35.1 Messung von Wechselstromwiderständen 433
35.1.1 Prinzipielles 433
35.1.2 Wechselstrom-Meßbrücken 433
35.2 Quantitative Behandlung des Transformators 435
35.2.1 Schaltung und Grundgleichungen 435
35.2.2 Auflösung der Transformatorgleichungen und Diskussion von Spezialfällen 437
35.2.3 Leistungsübertragung 439
35.3 Zusammenfassung 441

36 Gleichstrom: Leitungsmechanismen 443
36.1 Experimentelle Befunde 443
36.2 Quantitative Behandlung ohmscher Leiter 444
36.2.1 Leitfähigkeit – Beweglichkeit der Ladungsträger . . . 445
36.2.2 Der Hall-Effekt 447
36.3 Diskussion der wichtigsten Leitertypen 448
36.3.1 Metallische Leiter 448
36.3.2 Halbleiter 453
36.3.3 Supraleiter 457
36.3.4 Elektrolytische Leiter 460
36.4 Zusammenfassung 465

37 Gleichstromquellen 467
37.1 Chemische Stromquellen (Umwandlung von chemischer in elektrische Energie) 467
37.1.1 Sekundäre Elemente (Akkumulatoren) 467
37.1.2 Primäre Elemente (galvanische Elemente, Batterien) . 469
37.2 Mechanische Stromquellen (Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie) 472
37.3 Thermische Stromquellen (Umwandlung von thermischer in elektrische Energie) 474
37.4 Optische Stromquellen (Umwandlung von optischer in elektrische Energie) 477
37.5 Zusammenfassung 479

D Kalorik 481

38 Temperatur und Nullter Hauptsatz 483
38.1 Vorbemerkungen 483
38.2 Thermodynamische Systeme 484
38.3 Der Druck 485
38.4 Die Stoffmenge 486
38.5 Die Temperatur 487
38.5.1 Empirische Temperaturskala 487
38.5.2 Die absolute Gastemperatur 490
38.5.3 Praktische Temperaturmessung 491
38.6 Zusammenfassung 493

39 Thermische Zustandsgleichungen 495
39.1 Das ideale Gasgesetz 495
39.2 Reale Gase: Experimentelle Befunde 498
39.2.1 Das (p,T)-Diagramm 498
39.2.2 Das (p,V)-Diagramm 500
39.3 Zustandsgleichungen realer Gase 503
39.4 Zusammenfassung 505

40 Der erste Hauptsatz 507
40.1 Die Wärme Q 507
40.1.1 Spezifische Wärmen 507
40.1.2 Experimentelle Bestimmung spezifischer Wärmen . . 509
40.1.3 Beispiele für spezifische Wärmen 509
40.2 Spezifische Umwandlungswärmen 512
40.3 Die Arbeit W 513
40.4 Die innere Energie U 514
40.5 Formulierung des ersten Hauptsatzes 516
40.6 Beispiele zum ersten Hauptsatz 517
40.6.1 Isochore Prozesse 517
40.6.2 Isobare Prozesse 518
40.6.3 Isotherme Prozesse 519
40.6.4 Adiabatische Prozesse 521
40.6.5 Experiment von Clément-Desormes 522

40.7 Der Gay-Lussacsche Drosselversuch . . . 523
40.8 Der Joule-Thomson-Effekt . . . 525
40.9 Zusammenfassung . . . 528

41 Wärmekraftmaschinen . . . 529
41.1 Vorbemerkungen . . . 529
41.2 Prinzip von Wärmekraftmaschinen und Wärmepumpen . . . 529
41.2.1 Wärmekraftmaschinen . . . 529
41.2.2 Wärmepumpen . . . 531
41.3 Praktische Beispiele für Wärmekraftmaschinen . . . 532
41.3.1 Der Otto-Motor . . . 532
41.3.2 Der Diesel-Motor . . . 534
41.4 Ideale Wärmekraftmaschinen . . . 535
41.4.1 Vorbemerkungen . . . 535
41.4.2 Der Heißluftmotor . . . 535
41.4.3 Experimente mit der Stirling-Maschine . . . 537
41.4.4 Die Carnot-Maschine . . . 538
41.5 Die thermodynamische Temperaturskala . . . 540
41.6 Zusammenfassung . . . 541

42 Die Entropie und der zweite Hauptsatz . . . 543
42.1 Reversible und irreversible Prozesse . . . 543
42.2 Hinführung zum Begriff der Entropie . . . 544
42.3 Die Entropie als Zustandsgröße . . . 546
42.4 Die Entropieänderung als quantitatives Maß für die Irreversibilität von Prozessen . . . 548
42.5 Beispiele . . . 552
42.5.1 Reversible adiabatische Prozesse . . . 552
42.5.2 Reversible isotherme Prozesse . . . 552
42.5.3 Isochore Prozesse . . . 553
42.5.4 Isobare Prozesse . . . 555
42.5.5 Die Entropiefläche des idealen Gases . . . 555
42.5.6 Entropieänderungen bei Zustandsänderungen realer Stoffe . . . 556
42.5.7 Der Gay-Lussacsche Drosselversuch . . . 558
42.5.8 Mischungsentropie von Gasen . . . 559
42.6 Zusammenfassung . . . 561

43 Statistisch-mikroskopische Betrachtungen . . . 563
43.1 Innere Energie eines idealen Gases . . . 563
43.2 Mikroskopische Deutung der spezifischen Wärmen idealer Gase . . . 566
43.3 Spezifische Wärme fester Körper . . . 567
43.4 Statistische Deutung der Entropie . . . 569
43.4.1 Ein erster Hinweis . . . 569
43.4.2 Entropieänderung beim Gay-Lussac-Versuch . . . 571
43.4.3 Mischungsentropie . . . 572
43.4.4 Thermische Entropie . . . 573
43.5 Zusammenfassung . . . 576

44 Transportvorgänge 577
44.1 Charakteristische Größen und Beziehungen 577
44.2 Diffusion – Transport von Materie 578
44.2.1 Diffusionsgesetze 578
44.2.2 Beziehung zu mikroskopischen Größen 579
44.3 Wärmeleitung – Transport von Energie 580
44.3.1 Wärmeleitungsgleichungen 580
44.3.2 Beziehung der Wärmeleitfähigkeit zu mikroskopischen Größen 582
44.4 Innere Reibung – Transport von Impuls 583
44.4.1 Newtonsches Gesetz der inneren Reibung 583
44.4.2 Mikroskopische Deutung der Zähigkeit 584
44.5 Elektrizitätsleitung – Transport von Ladung 585
44.5.1 Das Ohmsche Gesetz 585
44.5.2 Mikroskopische Interpretation der elektrischen Leitfähigkeit 586
44.6 Zusammenfassung 588

E Schwingungen und Wellen 589

45 Freie Schwingungen 591
45.1 Einleitende Bemerkungen 591
45.2 Beispiele für ungedämpfte Schwingungen 592
45.2.1 Federpendel 592
45.2.2 Torsionspendel 593
45.2.3 Schwerependel 593
45.2.4 Elektrischer Schwingkreis 594
45.3 Experimentelle Realisierung ungedämpfter Schwingungen . . 595
45.4 Mathematische Behandlung harmonischer Schwingungen . . 596
45.4.1 Bewegungsgleichungen 596
45.4.2 Lösung der Bewegungsgleichungen 599
45.4.3 Diskussion der Lösungen 603
45.5 Zusammenstellung der wichtigsten Beziehungen 605

46 Gekoppelte Schwingungen 607
46.1 Erzwungene Schwingungen 607
46.1.1 Aufstellung der Bewegungsgleichung 607
46.1.2 Lösung der Bewegungsgleichung 608
46.1.3 Diskussion der Lösungen 609
46.1.4 Beispiele und Experimente 610
46.1.5 Energieübertragung 611
46.2 Schwingungen gekoppelter Systeme 612
46.2.1 Gekoppelte Pendel: Beispiele und Experimente 612
46.2.2 Die Bewegungsgleichungen und ihre Lösungen 613
46.2.3 Diskussion der Lösungen 614
46.3 Systeme mit mehreren Freiheitsgraden 616
46.3.1 Ein schwingender Körper 616
46.3.2 Zwei schwingende Körper 617

46.3.3 Drei schwingende Körper . . . 617
46.4 Schwingende elastische Kontinua . . . 619
46.4.1 Lineares elastisches Kontinuum . . . 619
46.4.2 Ebenes und räumliches elastisches Kontinuum . . . 620
46.5 Harmonische Analyse . . . 621
46.5.1 Fourier-Reihen: periodische Vorgänge . . . 621
46.5.2 Fourier-Integrale: nicht periodische Vorgänge . . . 623
46.6 Zusammenfassung . . . 625

47 Wellen – allgemeine Eigenschaften . . . 627
47.1 Einleitung . . . 627
47.2 Wellenfunktion und Wellengleichung . . . 628
47.3 Intensität einer Welle . . . 631
47.4 Superposition von Wellen . . . 632
47.4.1 Die Gruppengeschwindigkeit . . . 632
47.4.2 Stehende Wellen . . . 634
47.4.3 Interferenz . . . 635
47.5 Modulation . . . 636
47.6 Zusammenfassung . . . 638

48 Mechanische und akustische Wellen . . . 639
48.1 Wellen auf einer Pendelkette . . . 639
48.2 Seilwellen . . . 641
48.2.1 Bewegungsgleichung . . . 641
48.2.2 Verhalten von Seilwellen am Seilende . . . 642
48.3 Elastische Wellen in festen Körpern . . . 643
48.4 Schallwellen in Flüssigkeiten und Gasen . . . 645
48.4.1 Phasengeschwindigkeiten . . . 645
48.4.2 Schallwellenfunktion . . . 646
48.4.3 Schallintensität . . . 647
48.4.4 Der Doppler-Effekt . . . 649
48.5 Wasserwellen . . . 652
48.5.1 Schwerewellen . . . 652
48.5.2 Kapillarwellen . . . 653
48.5.3 Experimente mit Wasserwellen . . . 654
48.6 Zusammenfassung . . . 656

49 Elektromagnetische Wellen . . . 657
49.1 Historische Bemerkungen und Übersicht . . . 657
49.2 Experimentelle Einführung . . . 658
49.3 Abstrahlung des Hertzschen Dipols . . . 661
49.4 Ebene elektromagnetische Wellen . . . 664
49.4.1 Die Wellengleichung . . . 665
49.4.2 Energiestrom . . . 668
49.5 Wechselwirkung von elektromagnetischen Wellen mit Leitern 669
49.5.1 Experimente mit Mikrowellen . . . 669
49.5.2 Reflexion von Mikrowellen . . . 670
49.5.3 Impulsstrom und Strahlungsdruck . . . 671

49.6 Wechselwirkung von elektromagnetischen Wellen mit Isolatoren . . . 674
49.7 Zusammenfassung . . . 676

F Wellenoptik . . . 677

50 Lichtwellen . . . 679
50.1 Allgemeine Bemerkungen zur Optik . . . 679
50.2 Lichterzeugung und Lichtdetektion . . . 680
50.2.1 Lichtquellen . . . 680
50.2.2 Lichtdetektoren . . . 681
50.3 Prinzipien der Wellenfeldkonstruktion . . . 682
50.4 Polarisiertes Licht . . . 683
50.5 Reflexion und Brechung . . . 684
50.5.1 Das Reflexionsgesetz . . . 684
50.5.2 Das Brechungsgesetz . . . 684
50.6 Experimente zum Reflexions- und Brechungsgesetz . . . 685
50.7 Die Fresnelschen Formeln . . . 688
50.7.1 Herleitung . . . 688
50.7.2 Diskussion . . . 690
50.8 Zusammenfassung . . . 692

51 Interferenz . . . 693
51.1 Monochromasie und Kohärenz . . . 693
51.2 Der Pohlsche Interferenzversuch . . . 694
51.3 Interferenzen an dünnen Schichten . . . 696
51.3.1 Dünne Filme . . . 696
51.3.2 Entspiegelung und Antireflexbeschichtung . . . 696
51.3.3 Interferenzfilter . . . 697
51.3.4 Keilinterferenz . . . 698
51.3.5 Newton-Ringe . . . 699
51.4 Interferometer . . . 699
51.4.1 Das Michelson-Interferometer . . . 699
51.4.2 Das Fabry-Pérot-Interferometer . . . 701
51.4.3 Fabry-Pérot-Interferometer als Spektrometer . . . 703
51.5 Zusammenfassung . . . 707

52 Beugung an einfachen Strukturen . . . 709
52.1 Beugung an runden Hindernissen . . . 709
52.1.1 Beugung an einer runden Scheibe . . . 709
52.1.2 Beugung an einer runden Lochblende . . . 710
52.2 Beugung am Spalt . . . 712
52.2.1 Experimenteller Befund . . . 712
52.2.2 Einfache Erklärung . . . 712
52.2.3 Quantitative Behandlung . . . 713
52.3 Beugung am Doppelspalt . . . 715
52.4 Beugung am Strichgitter . . . 716
52.4.1 Interferenzbedingung . . . 716
52.4.2 Die Gitterinterferenzfunktion . . . 717

52.4.3 Das Gitter als dispersives Element 718
52.4.4 Spektrales Auflösungsvermögen 719
52.4.5 Nutzbarer Wellenlängenbereich 719
52.4.6 Blaze 720
52.4.7 Abschlußbemerkung 721
52.5 Holographische Gitter 721
52.6 Zusammenfassung 725

53 Beugung und Streuung 727
53.1 Beugung am ebenen Flächengitter 727
53.2 Beugung am Raumgitter 728
53.2.1 Die Laue-Gleichungen 728
53.2.2 Röntgen-Strukturanalyse 729
53.3 Übersicht über Streuprozesse 731
53.3.2 Inelastische Streuprozesse 732
53.4 Die Rayleigh-Streuung 733
53.4.1 Streukonstante und Streuquerschnitt 733
53.4.2 Experimente zur Rayleigh-Streuung 735
53.5 Zusammenfassung 737

54 Dispersion und Absorption 739
54.1 Experimenteller Befund 739
54.2 Anschauliche Deutung der Dispersion 741
54.2.1 Grundgedanke 741
54.2.2 Ein einzelnes Atom im Lichtfeld 741
54.2.3 Ebene mit Atomen im Lichtfeld 742
54.2.4 Darstellung der Felder im Zeigerdiagramm 743
54.2.5 Wellenlänge der Lichtwelle im Medium 745
54.3 Quantitative Behandlung der Dispersion 746
54.4 Experimente zur Absorption und Dispersion 750
54.4.1 Absorption 750
54.4.2 Dispersion 750
54.5 Licht-Signalgeschwindigkeit 751
54.6 Zusammenfassung 752

55 Doppelbrechung 753
55.1 Experimentelle Feststellungen 753
55.2 Erklärung der Doppelbrechung 754
55.2.1 Phänomenologische Erklärung 754
55.2.2 Tiefergehende Betrachtungen 755
55.3 Anwendungen 757
55.3.1 Linear polarisiertes Licht 757
55.3.2 Zirkular polarisiertes Licht 758
55.3.3 Spannungsdoppelbrechung 760
55.4 Zirkulare Doppelbrechung 760
55.5 Schlußbemerkung 761
55.6 Zusammenfassung 762

G Strahlenoptik . . . 763

56 Bauelemente der geometrischen Optik . . . 765
56.1 Vorbemerkungen – Prinzip von Fermat . . . 765
56.2 Sphärische Spiegel . . . 767
56.3 Das Prisma . . . 769
56.4 Dünne Linsen . . . 770
56.4.1 Die Linsenmacher-Formel . . . 770
56.4.2 Bildkonstruktion bei einer Sammellinse . . . 772
56.4.3 Bildkonstruktion bei einer Zerstreuungslinse . . . 773
56.4.4 Linsenformen und Linsensysteme . . . 773
56.5 Abbildungsfehler . . . 775
56.5.1 Sphärische Aberration . . . 775
56.5.2 Koma . . . 775
56.5.3 Astigmatismus . . . 775
56.5.4 Verzeichnung . . . 776
56.5.5 Chromatische Aberration . . . 776
56.6 Dicke Linsen und Linsensysteme . . . 776
56.7 Zusammenfassung . . . 780

57 Optische Instrumente . . . 781
57.1 Das Auge . . . 781
57.1.1 Aufbau des Auges . . . 781
57.1.2 Sehschärfe und Sehfehler . . . 782
57.1.3 Strahlungsgrößen und photometrische Größen . . . 782
57.2 Die Lupe . . . 785
57.3 Photokamera . . . 786
57.4 Projektionsapparat . . . 787
57.5 Mikroskop . . . 787
57.5.1 Aufbau des Mikroskops . . . 787
57.5.2 Geometrisches Auflösungsvermögen des Mikroskops . . . 788
57.6 Fernrohr . . . 789
57.6.1 Bauformen . . . 789
57.6.2 Geometrisches Auflösungsvermögen . . . 791
57.7 Spektralapparat . . . 792
57.7.1 Aufbau . . . 792
57.7.2 Spektrales Auflösungsvermögen . . . 793
57.8 Zusammenfassung . . . 795

H Quantenoptik . . . 797

58 Die Quantennatur des Lichts . . . 799
58.1 Vorbemerkungen: Lichtquanten . . . 799
58.2 Photoeffekt . . . 800
58.2.1 Experimenteller Befund . . . 800
58.2.2 Deutung und Erklärung des Photoeffekts . . . 801
58.2.3 Anwendung des Photoeffekts . . . 802
58.3 Röntgen-Bremsstrahlung . . . 804

58.3.1 Aufbau einer Röntgenröhre . . . 804
58.3.2 Experimenteller Befund . . . 804
58.3.3 Erklärung des Effekts . . . 805
58.4 Der Photonenimpuls . . . 806
58.5 Der Compton-Effekt . . . 807
58.5.1 Experimenteller Befund . . . 807
58.5.2 Deutung des Effekts . . . 808
58.6 Zusammenfassung . . . 810

59 Der Schwarze Strahler . . . 811
59.1 Absorptions- und Emissionsvermögen . . . 811
59.2 Experimentelle Ergebnisse . . . 812
59.3 Energiedichte der Strahlung im Hohlraum . . . 814
59.4 Strahlungsgesetze . . . 817
59.5 Vergleich mit dem Experiment . . . 819
59.6 Messung hoher Temperaturen . . . 820
59.7 Das Photonengas . . . 821
59.7.1 Gerichtete Bewegung der Photonen . . . 821
59.7.2 Ungerichtete Bewegung der Photonen . . . 822
59.8 Zusammenfassung . . . 825

60 Materiewellen . . . 827
60.1 Die de Broglie-Hypothese und ihre experimentelle Bestätigung . . . 827
60.2 Eigenschaften von Materiewellen . . . 830
60.3 Dualismus der Beschreibungen . . . 832
60.4 Wellenfunktion und Wellengleichung . . . 834
60.4.1 Wellenfunktion einer ebenen Welle . . . 834
60.4.2 Die Wellengleichung . . . 836
60.4.3 Die Schrödinger-Gleichung . . . 838
60.4.4 Ein Beispiel . . . 839
60.5 Zusammenfassung . . . 842

I Atomistik . . . 843

61 Bausteine der Atome . . . 845
61.1 Übersicht . . . 845
61.1.1 Größe der Atome . . . 845
61.1.2 Größe der Atomkerne . . . 846
61.1.3 Energien . . . 846
61.2 Das Elektron . . . 847
61.2.1 Ladung . . . 847
61.2.2 Masse . . . 848
61.2.3 Größe . . . 849
61.2.4 Spin und magnetisches Moment . . . 850
61.3 Der Kern . . . 852
61.4 Zusammenstellung der Zahlenwerte . . . 854

62 Atome: Spektren und Energieniveaus 855
62.1 Experimentelles 855
62.2 Deutung der Wasserstoff-Linien 856
62.3 Das Bohrsche Atommodell 857
62.4 Grenzen des Bohrschen Atommodells 860
62.5 Stehende Elektronenwellen 861
62.6 Experiment 865
62.7 Alkaliatome 867
62.7.1 Spektrum des Natriumatoms 867
62.7.2 Das Termschema 867
62.8 Physikalische Bedeutung der Quantenzahlen 868
62.9 Experimenteller Nachweis des Spin-Drehimpulses 870
62.9.1 Stern-Gerlach-Versuch 870
62.9.2 Feinstruktur 871
62.10 Zusammenfassung 873

63 Atome: Übergänge und Hüllenstruktur 875
63.1 Gebote und Verbote in der Atomistik 875
63.2 Erwartungswerte 876
63.2.1 Wellenfunktion und Wahrscheinlichkeitsverteilung . . 876
63.2.2 Symmetrie der Wellenfunktionen 877
63.2.3 Beispiele für Erwartungswerte 878
63.3 Übergangsmomente 879
63.4 Spontane Übergänge 881
63.5 Induzierte Übergänge 882
63.6 Prinzip des Lasers 883
63.7 Struktur der Atomhülle, Periodisches System der Elemente . 884
63.7.1 Übersicht 884
63.7.2 Aufbauprinzipien der Atomhülle 884
63.7.3 Aufbau der Hülle 886
63.8 Zusammenfassung 894

64 Der Atomkern 897
64.1 Masse der Kerne 897
64.1.1 Bezeichnungen 897
64.1.2 Relative Massen 898
64.1.3 Massenspektrometer 898
64.1.4 Atom- und Kernmassen 899
64.2 Größe und Ladung der Kerne 902
64.2.1 Streuung von α-Teilchen 902
64.2.2 Streuung von Neutronen 902
64.2.3 Streuung von Elektronen 905
64.3 Systematik der Nuklide 905
64.4 Kernmodelle 907
64.4.1 Tröpfchenmodell 907
64.4.2 Potentialtopfmodell 909
64.4.3 Schalenmodell 910
64.5 Zusammenfassung 911

65 Instabile Kerne . . . 913
65.1 Radioaktivität . . . 913
65.2 Das Zerfallsgesetz . . . 914
65.3 Der γ-Zerfall . . . 916
65.4 Der α-Zerfall . . . 917
65.4.1 Die natürlichen Zerfallsreihen . . . 917
65.4.2 Zahlenbeispiel zum α-Zerfall . . . 920
65.4.3 Erklärung des α-Zerfalls . . . 922
65.5 Der β-Zerfall . . . 923
65.5.1 Elektronen im Kern? . . . 923
65.5.2 β^--Zerfall . . . 923
65.5.3 β^--Zerfall des freien Neutrons . . . 925
65.5.4 β^+-Zerfall . . . 925
65.5.5 Der Elektronen-Einfang . . . 927
65.6 Zusammenfassung . . . 928

66 Wechselwirkungen, Meßgeräte, Energien . . . 929
66.1 Wechselwirkungen von Kernstrahlung mit Materie . . . 929
66.1.1 Allgemeine Bemerkungen . . . 929
66.1.2 α-Strahlen . . . 930
66.1.3 β-Strahlen . . . 931
66.1.4 γ-Strahlen . . . 931
66.1.5 Neutronen . . . 935
66.2 Detektoren und Spektrometer . . . 937
66.2.1 Gasionisationsdetektoren . . . 937
66.2.2 Szintillationszähler . . . 938
66.2.3 Halbleiterdetektoren . . . 939
66.2.4 Spektrometer . . . 939
66.2.5 Spurdetektoren . . . 941
66.3 Dosimetrie . . . 942
66.3.1 Dosismeßgrößen . . . 942
66.3.2 Dosis-Meßgeräte . . . 944
66.4 Kernenergie . . . 946
66.4.1 Energiegewinnung . . . 946
66.4.2 Kernspaltung . . . 947
66.4.3 Potentialmodell der Kernspaltung . . . 949
66.4.4 Kettenreaktion und Kernreaktor . . . 950
66.4.5 Kernfusion . . . 952
66.5 Zusammenfassung . . . 953

Mathematische Hilfsmittel . . . 955

1 Vektoren . . . 957
1.1 Der Vektorbegriff . . . 957
1.1.1 Multiplikation eines Vektors mit einem Skalar . . . 957
1.1.2 Addition und Subtraktion zweier Vektoren . . . 958
1.1.3 Komponentenzerlegung – Definition einer Basis . . . 958
1.1.4 Die Richtungskosinus . . . 959

1.2 Produkte von Vektoren mit Vektoren 959
1.2.1 Vorbemerkungen 959
1.2.2 Skalarprodukt zweier Vektoren 960
1.2.3 Vektorprodukt zweier Vektoren 962
1.2.4 Spatprodukt zwischen drei Vektoren 966
1.2.5 Das doppelte Vektorprodukt 967

2 Tensoren 969
2.1 Dyadisches Produkt zwischen zwei Vektoren 969
2.2 Summen, Differenzen und Produkte von Tensoren 969
2.3 Produkte von Tensoren mit Vektoren 971
2.4 Diagonalisierung symmetrischer Tensoren 974
2.4.1 Vorbemerkungen 974
2.4.2 Eigenwerte und Eigenvektoren 975
2.4.3 Zugehörige orthogonale Transformation 976
2.4.4 Zweidimensionales Beispiel 977

3 Ableitungen und Reihenentwicklungen 982
3.1 Ableitungen 982
3.2 Reihenentwicklungen 982

4 Koordinatensysteme 984
4.1 Vorbemerkungen 984
4.2 Kugelkoordinaten 984
4.3 Zylinderkoordinaten 988

5 Komplexe Zahlen 990
5.1 Definitionen – Rechenregeln 990
5.2 Die Gaußsche Zahlenebene 991

6 Wahrscheinlichkeiten, Permutationen, Kombinationen . . 994
6.1 Wahrscheinlichkeiten 994
6.2 Permutationen 994
6.3 Kombinationen 995
6.3.1 Beliebig viele Bälle pro Box 995
6.3.2 Nur ein Ball pro Box 996
6.4 Die Stirling-Formel 997

7 Vektor-Operatoren 998
7.1 Der Gradient 998
7.2 Die Divergenz 999
7.3 Die Rotation 1001

Ergänzende und weiterführende Literatur 1005

Fundamentalkonstanten 1013

Register 1017