Physik für Ingenieure

Prof. Dr. Dr. Ekbert Hering
Prof. Dr. Rolf Martin
Prof. Dr. Martin Stohrer

Dritte, verbesserte Auflage

VDI-Verlag GmbH
Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure · Düsseldorf

Inhalt

Verwendete physikalische Symbole XIX

1. Einführung 1

1.1. Physikalischer Erkenntnisprozeß 1

1.2. Bereiche der physikalischen Erkenntnis 2

1.3. Physikalische Größen 5
1.3.1. Definition und Maßeinheit 5
1.3.2. Meßgenauigkeit 9
1.3.3. Fehlerfortpflanzung 13
1.3.4. Kurvenanpassung 13
1.3.5. Ausgleichsgeradenkonstruktion 15
1.3.6. Korrelationsanalyse 16

2. Mechanik 19

2.1. Einführung 19
2.2. Kinematik des Punktes 19
2.2.1. Eindimensionale Kinematik 19
2.2.1.1. Geschwindigkeit 19
2.2.1.2. Beschleunigung 22
2.2.1.3. Einfache Spezialfälle 24
2.2.2. Dreidimensionale Kinematik 25
2.2.2.1. Ortsvektor und Bahnkurve 25
2.2.2.2. Geschwindigkeitsvektor 25
2.2.2.3. Beschleunigungsvektor 26
2.2.3. Kreisbewegungen 28

2.3. Grundgesetze der klassischen Mechanik 31
2.3.1. Konzept der klassischen Dynamik 31
2.3.2. Die Newtonschen Axiome 31
2.3.3. Masse 32
2.3.4. Kraft 33

2.4. Dynamik in bewegten Bezugssystemen 37
2.4.1. Relativ zueinander geradlinig bewegte Bezugssysteme 37
2.4.2. Gleichförmig rotierende Bezugssysteme 39

2.5. Impuls 42
2.5.1. Impuls eines materiellen Punktes 42
2.5.2. Impuls eines Systems materieller Punkte 43
2.5.2.1. Impulssatz 44
2.5.2.2. Massenmittelpunkt und Schwerpunktsatz 44
2.5.2.3. Impulserhaltungssatz 45
2.5.3. Raketengleichung 45

2.6. Arbeit und Energie . . . 47
2.6.1. Arbeit . . . 47
2.6.2. Leistung, Wirkungsgrad . . . 50
2.6.3. Energie . . . 51
2.6.4. Energieerhaltungssatz . . . 51

2.7. Stoßprozesse . . . 52
2.7.1. Übersicht und Grundbegriffe . . . 52
2.7.2. Gerader, zentraler, elastischer Stoß . . . 53
2.7.3. Gerader, zentraler, inelastischer Stoß . . . 55
2.7.4. Schiefe, zentrale Stöße . . . 56
2.7.4.1. Elastische Stöße . . . 56
2.7.4.2. Inelastische Stöße . . . 57

2.8. Drehbewegungen . . . 58
2.8.1. Drehmoment . . . 58
2.8.2. Newtonsches Aktionsgesetz der Drehbewegung . . . 59
2.8.2.1. Drehimpuls eines materiellen Punktes . . . 59
2.8.2.2. Dynamisches Grundgesetz der Rotation . . . 59
2.8.3. Arbeit, Leistung und Energie bei der Drehbewegung . . . 60
2.8.4. Drehbewegungen von Systemen materieller Punkte . . . 61
2.8.4.1. Drehimpulssatz . . . 61
2.8.4.2. Drehimpulserhaltungssatz . . . 61
2.8.4.3. Energieerhaltungssatz . . . 63
2.8.5. Analogie Translation und Rotation . . . 63

2.9. Mechanik starrer Körper . . . 63
2.9.1. Freiheitsgrade und Kinematik . . . 64
2.9.2. Kräfte am starren Körper . . . 65
2.9.3. Schwerpunkte und potentielle Energie eines starren Körpers . . . 67
2.9.4. Kinetische Energie eines starren Körpers . . . 68
2.9.5. Massenträgheitsmomente starrer Körper . . . 70
2.9.6. Kreisel . . . 74

2.10. Gravitation . . . 79
2.10.1. Beobachtungen . . . 79
2.10.2. Newtonsches Gravitationsgesetz . . . 81
2.10.3. Hubarbeit und potentielle Energie . . . 83

2.11. Mechanik deformierbarer Körper . . . 84
2.11.1. Deformierbarer fester Körper . . . 84
2.11.1.1. Elastische Verformung . . . 85
2.11.1.2. Plastische Verformung . . . 92
2.11.1.3. Härte fester Körper . . . 94
2.11.2. Ruhende Flüssigkeiten (Hydrostatik) und Gase (Aerostatik) . . . 96
2.11.2.1. Druck . . . 96
2.11.2.2. Kompressibilität . . . 98
2.11.2.3. Raumausdehnungskoeffizient . . . 99
2.11.2.4. Schweredruck . . . 100
2.11.2.5. Auftrieb . . . 102
2.11.2.6. Grenzflächeneffekte . . . 104
2.11.3. Strömende Flüssigkeiten (Hydrodynamik) und Gase (Aerodynamik) . . . 107
2.11.3.1. Strömungsfeld . . . 107

2.11.3.2. Grundgleichungen idealer (reibungsfreier) Strömungen 109
2.11.3.3. Strömungen realer Flüssigkeiten und Gase 120
2.11.3.4. Anwendungen 133

3. Thermodynamik 140

3.1. Grundlagen 140
3.1.1. Einführung 140
3.1.2. Thermodynamische Grundbegriffe 140
3.1.3. Temperatur 143
3.1.4. Thermische Ausdehnung 147
3.1.5. Allgemeine Zustandsgleichung idealer Gase 149

3.2. Kinetische Gastheorie 151
3.2.1. Gasdruck 151
3.2.2. Thermische Energie und Temperatur 153
3.2.3. Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle 154

3.3. Hauptsätze der Thermodynamik 156
3.3.1. Wärme 156
3.3.2. Erster Hauptsatz der Thermodynamik 159
3.3.3. Berechnung der Wärmekapazitäten 162
3.3.4. Spezielle Zustandsänderungen idealer Gase 165
3.3.4.1. Isotherme Zustandsänderung 165
3.3.4.2. Isochore Zustandsänderung 166
3.3.4.3. Isobare Zustandsänderung 167
3.3.4.4. Isentrope Zustandsänderung 167
3.3.4.5. Polytrope Zustandsänderung 169
3.3.5. Kreisprozesse 171
3.3.5.1. Carnotscher Kreisprozeß 172
3.3.5.2. Technische Kreisprozesse 176
3.3.6. Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 180
3.3.6.1. Reversible und irreversible Prozesse 180
3.3.6.2. Formulierungen des zweiten Hauptsatzes 181
3.3.6.3. Entropie 182
3.3.6.4. Statistische Deutung der Entropie 185
3.3.7. Thermodynamische Potentiale 187
3.3.8. Dritter Hauptsatz der Thermodynamik 188

3.4. Zustandsänderungen realer Gase 189
3.4.1. Van-der-Waalssche Zustandsgleichung 190
3.4.2. Gasverflüssigung (Joule-Thomson-Effekt) 192
3.4.3. Phasenumwandlungen 193
3.4.3.1. Thermodynamisches Gleichgewicht 195
3.4.3.2. Gleichgewicht zwischen flüssiger und gasförmiger Phase 196
3.4.3.3. Gleichgewicht zwischen fester und flüssiger Phase 198
3.4.3.4. Koexistenz dreier Phasen 198
3.4.4. Dämpfe und Luftfeuchtigkeit 199

3.5. Wärmeübertragung 203
3.5.1. Wärmeleitung 204
3.5.2. Konvektion 208

3.5.3. Wärmestrahlung . . . 214
3.5.4. Wärmedurchgang . . . 217

4. Elektrizität und Magnetismus . . . 220

4.1. Physikalische Gesetze und Definitionen . . . 221
4.1.1. Ladung . . . 221
4.1.2. Stromstärke . . . 223
4.1.3. Spannung . . . 224
4.1.4. Widerstand und Leitwert . . . 225
4.1.5. Ohmsches Gesetz . . . 228
4.1.6. Kirchhoffsche Regeln im verzweigten Stromkreis . . . 228
4.1.7. Schaltung von Widerständen . . . 230
4.1.8. Meßbereichserweiterung . . . 232
4.1.9. Ausgewählte Meßanordnungen . . . 234
4.1.10. Klemmenspannung und innerer Widerstand . . . 235
4.1.11. Schaltung von Spannungsquellen . . . 236
4.1.12. Elektrische Leistung und elektrische Arbeit . . . 238

4.2. Ladungstransport in Flüssigkeiten und Gasen . . . 240
4.2.1. Ladungstransport in Flüssigkeiten . . . 240
4.2.1.1. Dissoziation und Elektrolyse . . . 240
4.2.1.2. Faradaysche Gesetze . . . 241
4.2.1.3. Elektrochemische Spannungsquellen . . . 243
4.2.1.4. Elektrokinetische Vorgänge . . . 248
4.2.2. Ladungstransport im Vakuum und in Gasen . . . 250
4.2.2.1. Ladungstransport im Vakuum . . . 250
4.2.2.2. Ladungstransport in Gasen . . . 251
4.2.3. Plasmaströme . . . 256

4.3. Elektrisches Feld . . . 257
4.3.1. Allgemeiner Feldbegriff . . . 257
4.3.2. Beschreibung des elektrischen Feldes . . . 258
4.3.3. Elektrische Feldstärke und Kraft . . . 259
4.3.4. Elektrische Feldstärke und elektrostatisches Potential . . . 260
4.3.5. Bewegung geladener Teilchen im elektrischen Feld . . . 264
4.3.5.1. Grundlegende Betrachtungen . . . 264
4.3.5.2. Bewegung eines geladenen Teilchens quer zum elektrischen Feld . . . 266
4.3.5.3. Bewegung eines geladenen Teilchens parallel zum elektrischen Feld . . . 267
4.3.5.4. Elektronenstrahl-Oszilloskop . . . 267
4.3.5.5. Bewegung elektrisch geladener Körper in einer Flüssigkeit und im elektrischen Feld . . . 268
4.3.6. Leiter im elektrischen Feld . . . 269
4.3.6.1. Elektrische Influenz, elektrische Verschiebungsdichte und elektrische Feldstärke . . . 269
4.3.6.2. Kondensator und Kapazität . . . 272
4.3.7. Nichtleiter im elektrischen Feld, elektrische Polarisation und Permittivitätszahl . . . 276
4.3.8. Energieinhalt des elektrischen Feldes . . . 285

4.4. Magnetisches Feld . . . 286
4.4.1. Beschreibung des magnetischen Feldes . . . 286

4.4.2. Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz . . . 287
4.4.3. Magnetische Flußdichte und Kraftwirkungen im Magnetfeld . . . 292
4.4.3.1. Magnetischer Fluß, magnetische Flußdichte und magnetisches Moment . 292
4.4.3.2. Kraftwirkungen im Magnetfeld . . . 293
4.4.4. Materie im Magnetfeld . . . 300
4.4.4.1. Grundbegriffe . . . 300
4.4.4.2. Stoffmagnetismus . . . 301
4.4.4.3. Magnetische Werkstoffe . . . 306

4.5. Instationäre Felder . . . 312
4.5.1. Elektromagnetische Induktion . . . 312
4.5.1.1. Induktionsgesetz . . . 312
4.5.1.2. Induktionsvorgänge . . . 313
4.5.1.3. Selbstinduktion . . . 316
4.5.1.4. Energie des magnetischen Feldes . . . 317
4.5.2. Periodische Felder (Wechselstromkreis) . . . 318
4.5.2.1. Grundlagen des Wechselstromkreises . . . 319
4.5.2.2. Bauelemente im Wechselstromkreis . . . 320
4.5.2.3. Reihenschaltung von Bauelementen im Wechselstromkreis . . . 320
4.5.2.4. Parallelschaltung von Bauelementen im Wechselstromkreis . . . 323
4.5.2.5. Leistung im Wechselstromkreis . . . 323
4.5.2.6. Drehstrom . . . 326
4.5.2.7. Transformation von Wechselströmen . . . 327
4.5.2.8. Elektrische Maschinen . . . 328
4.5.3. Ein- und Ausschaltvorgänge in Stromkreisen . . . 331
4.5.3.1. Ein- und Ausschalten mit einem Kondensator . . . 331
4.5.3.2. Ein- und Ausschalten mit einer Induktivität . . . 332
4.5.4. Meßgeräte . . . 334
4.5.5. Zusammenhang elektrischer und magnetischer Größen . . . 338
4.5.5.1. Vergleich elektrischer und magnetischer Größen . . . 338
4.5.5.2. Maxwellsche Gleichungen . . . 340

5. Schwingungen und Wellen . . . 343

5.1. Schwingungen . . . 343
5.1.1. Physikalische Grundlagen schwingungsfähiger Systeme . . . 343
5.1.2. Freie harmonische Schwingung . . . 347
5.1.2.1. Differentialgleichung des ungedämpften Feder-Masse-Systems . . . 347
5.1.2.2. Allgemeine Differentialgleichung der freien, ungedämpften harmonischen Schwingung . . . 349
5.1.2.3. Differentialgleichungen und Lösungen spezieller mechanischer Schwingungssysteme . . . 350
5.1.2.4. Gesamtenergie der freien, ungedämpften Schwingung . . . 354
5.1.2.5. Elektromagnetische Schwingung . . . 355
5.1.2.6. Freie gedämpfte Schwingung . . . 358
5.1.2.7. Gedämpfte elektromagnetische Schwingung . . . 363
5.1.3. Erzwungene Schwingung . . . 365
5.1.3.1. Differentialgleichung der erzwungenen Schwingung . . . 365
5.1.3.2. Lösung der Differentialgleichung der erzwungenen gedämpften Schwingung . . . 365
5.1.3.3. Amplitudenresonanzfunktion . . . 367
5.1.3.4. Phasenresonanzfunktion . . . 369

5.1.4. Überlagerung von Schwingungen . . . 370
5.1.4.1. Überlagerung harmonischer Schwingungen gleicher Raumrichtung und gleicher Frequenz . . . 370
5.1.4.2. Überlagerung harmonischer Schwingungen gleicher Raumrichtung mit geringen Frequenzunterschieden (Schwebung) . . . 372
5.1.4.3. Überlagerung harmonischer Schwingungen gleicher Raumrichtung mit ganzzahligen Frequenzverhältnissen (Fourier-Analyse) . . . 373
5.1.4.4. Überlagerung harmonischer Schwingungen mit ganzzahligem Frequenzverhältnis, die senkrecht zueinander stehen (Lissajous-Figuren) . 376
5.1.5. Schwingungen mit mehreren Freiheitsgraden (gekoppeltes Schwingungssystem) . . . 378
5.1.6. Nichtlineare Schwingungen . . . 381
5.1.7. Parametrisch erregte Schwingungen . . . 382

5.2. Wellen . . . 382
5.2.1. Physikalische Grundlagen der Wellenausbreitung . . . 382
5.2.2. Harmonische Wellen . . . 386
5.2.2.1. Mathematische Beschreibung harmonischer Wellen . . . 386
5.2.2.2. Energietransport . . . 386
5.2.2.3. Phasengeschwindigkeit . . . 387
5.2.3. Doppler-Effekt . . . 390
5.2.4. Interferenz . . . 392
5.2.4.1. Überlagerung von Wellen gleicher Frequenz . . . 392
5.2.4.2. Stehende Wellen . . . 394
5.2.4.3. Beugung . . . 397
5.2.4.4. Überlagerung von Wellen unterschiedlicher Frequenz . . . 399

6. Optik . . . 402

6.1. Einführung . . . 402

6.2. Geometrische Optik . . . 403
6.2.1. Lichtstrahlen . . . 403
6.2.2. Reflexion des Lichtes . . . 404
6.2.2.1. Reflexion an ebenen Flächen . . . 404
6.2.2.2. Reflexion an gekrümmten Flächen . . . 405
6.2.3. Brechung des Lichtes . . . 409
6.2.3.1. Brechung an ebenen Grenzflächen . . . 409
6.2.3.2. Brechung an einem Prisma . . . 413
6.2.3.3. Brechung an Kugelflächen . . . 416
6.2.4. Abbildung durch Linsen . . . 418
6.2.4.1. Dünne Linsen . . . 418
6.2.4.2. Dicke Linsen . . . 422
6.2.4.3. Linsensysteme . . . 424
6.2.5. Blenden im Strahlengang . . . 425
6.2.6. Abbildungsfehler . . . 426
6.2.7. Optische Instrumente . . . 426
6.2.7.1. Das menschliche Auge . . . 426
6.2.7.2. Lupe . . . 429
6.2.7.3. Mikroskop . . . 430
6.2.7.4. Fernrohr . . . 431
6.2.7.5. Photoapparat . . . 434

6.3. Photometrie 435
6.3.1. Einführung 435
6.3.2. Strahlungsphysikalische Größen 436
6.3.3. Lichttechnische Größen 441

6.4. Wellenoptik 444
6.4.1. Interferenz und Beugung 444
6.4.1.1. Kohärenz 444
6.4.1.2. Interferenzen an dünnen Schichten 446
6.4.1.3. Interferometer 450
6.4.1.4. Beugung am Spalt 452
6.4.1.5. Auflösungsvermögen optischer Instrumente 455
6.4.1.6. Beugung am Gitter 456
6.4.1.7. Spektralapparate 459
6.4.1.8. Röntgenbeugung an Kristallgittern 462
6.4.1.9. Holographie 465
6.4.2. Polarisation des Lichtes 468
6.4.2.1. Einführung 468
6.4.2.2. Erzeugung von polarisiertem Licht 470
6.4.2.3. Technische Anwendungen der Doppelbrechung 473
6.4.2.4. Optische Aktivität 475

6.5. Quantenoptik 477
6.5.1. Lichtquanten 477
6.5.1.1. Lichtelektrischer Effekt 477
6.5.1.2. Compton-Effekt 479
6.5.2. Dualismus Teilchen-Welle 481
6.5.3. Wärmestrahlung 482
6.5.4. Laser 483
6.5.5. Materiewellen 486
6.5.5.1. De-Broglie-Beziehung 486
6.5.5.2. Heisenbergsche Unschärferelation 488

7. Akustik 490

7.1. Einführung 490

7.2. Schallwellen 490
7.2.1. Schallausbreitung 490
7.2.2. Schallwandler 495
7.2.3. Schallwellen an Grenzflächen 499

7.3. Schallempfindung 504
7.3.1. Physiologische Akustik 504
7.3.2. Musikalische Akustik 507

7.4. Technische Akustik 510
7.4.1. Raumakustik 510
7.4.2. Luftschalldämmung 512
7.4.3. Körperschalldämmung 513
7.4.4. Strömungsgeräusche 516
7.4.5. Ultraschall 517

8. Atom- und Kernphysik 519

8.1. Bohrsches Atommodell 520
8.1.1. Optisches Spektrum des Wasserstoffatoms 520
8.1.2. Bohrsche Postulate 522
8.1.3. Quantenbedingungen nach Bohr/Sommerfeld 524

8.2. Quantentheorie 525
8.2.1. Hamilton-Operator 525
8.2.2. Schrödinger-Gleichung 528
8.2.3. Unschärferelation 533
8.2.4. Quantenmechanik des Wasserstoffatoms 537
8.2.5. Quanten-Hall-Effekt (Von-Klitzing-Effekt) 541
8.2.5.1. Freies Elektron im Magnetfeld (quantenmechanisch) 541
8.2.5.2. Quanten-Hall-Effekt 543
8.2.6. Tunnelmikroskop 546

8.3. Bahn- und Spinmagnetismus 548
8.3.1. Zeeman- und Stark-Effekt 549
8.3.2. Elektronen- und Kernspinresonanz 549

8.4. Systematik des Atombaus 553
8.4.1. Periodensystem der Elemente 553
8.4.2. Aufbau der Elektronenhülle 553

8.5. Röntgenstrahlung 555
8.5.1. Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung 555
8.5.2. Absorption von Röntgenstrahlung, Computertomographie 556

8.6. Molekülspektren 558
8.6.1. Potentialkurve 558
8.6.2. Rotations-Schwingungs-Spektrum 560
8.6.3. Raman-Effekt 562

8.7. Aufbau der Atomkerne 563
8.7.1. Größe und Ladungsverteilung 563
8.7.2. Kernmodelle 565
8.7.2.1. Tröpfchenmodell 567
8.7.2.2. Schalenmodell 570

8.8. Kernumwandlung 573
8.8.1. Radioaktiver Zerfall 573
8.8.1.1. Strahlenarten 573
8.8.1.2. Zerfallsreaktionen 573
8.8.1.3. Radioaktives Zerfallsgesetz 576
8.8.1.4. Messung ionisierender Strahlung 578
8.8.1.5. Anwendung radioaktiver Stoffe 581
8.8.2. Kernreaktionen 586
8.8.2.1. Energetik 587
8.8.2.2. Wirkungsquerschnitt 588
8.8.3. Kernspaltung und Kernreaktoren 590
8.8.3.1. Kernspaltung 590
8.8.3.2. Kernreaktoren 592

8.8.3.3. Reaktortypen . . . 594
8.8.4. Kernfusion . . . 596
8.8.4.1. Fusionsreaktion . . . 596
8.8.4.2. Experimente zur kontrollierten Kernfusion . . . 599

8.9. Elementarteilchen . . . 601
8.9.1. Einteilung . . . 603
8.9.2. Erhaltungssätze . . . 607
8.9.3. Fundamentale Wechselwirkungen . . . 608

8.10. Strahlenschutz . . . 610
8.10.1. Wechselwirkung der Strahlung mit Materie . . . 610
8.10.2. Dosisgrößen . . . 618
8.10.3. Biologische Wirkung der Strahlung . . . 622
8.10.4. Dosismessung . . . 625
8.10.5. Strahlenschutzmaßnahmen . . . 627

9. Festkörperphysik . . . 633

9.1. Struktur fester Körper . . . 633
9.1.1. Kristallbindungsarten . . . 633
9.1.1.1. Van-der-Waalssche Bindung . . . 633
9.1.1.2. Kovalente (homöopolare) Bindung . . . 634
9.1.1.3. Ionenbindung . . . 634
9.1.1.4. Metallische Bindung . . . 635
9.1.2. Kristalline Strukturen . . . 636
9.1.2.1. Kristallsysteme . . . 636
9.1.2.2. Dichteste Kugelpackungen . . . 637
9.1.2.3. Richtungen und Ebenen im Kristallgitter . . . 638
9.1.3. Gitterfehler . . . 639
9.1.3.1. Punktfehler . . . 639
9.1.3.2. Linienfehler . . . 639
9.1.3.3. Flächenfehler . . . 641
9.1.4. Amorphe Werkstoffe . . . 641
9.1.5. Makromolekulare Festkörper . . . 642
9.1.5.1. Struktur und Eigenschaften der Polymerwerkstoffe . . . 643
9.1.5.2. Spezielle Eigenschaften der Polymerwerkstoffe . . . 644
9.1.6. Ausgewählte Werkstoffe . . . 646
9.1.6.1. Verbundwerkstoffe . . . 646
9.1.6.2. Formgedächtnis-Legierungen . . . 650
9.1.7. Flüssigkristalle . . . 652
9.1.7.1. Aufbau und Struktur . . . 652
9.1.7.2. Eigenschaften . . . 653
9.1.7.3. Anwendungsbereiche . . . 653

9.2. Elektronen in Festkörpern . . . 654
9.2.1. Energiebänder-Modell . . . 654
9.2.2. Metalle . . . 657
9.2.3. Halbleiter . . . 662
9.2.3.1. Eigenleitung . . . 663
9.2.3.2. Störstellenleitung . . . 665
9.2.3.3. pn-Übergang . . . 667

9.2.3.4. Transistor . . . 671
9.2.4. Supraleitung . . . 674

9.3. Thermodynamik fester Körper . . . 678
9.3.1. Gitterschwingungen . . . 678
9.3.1.1. Schwingende Gitterbausteine und Phononen . . . 678
9.3.1.2. Molare und spezifische Wärmekapazität . . . 681
9.3.1.3. Wärmeleitfähigkeit . . . 683
9.3.2. Effekte im Zusammenhang mit Wärmefluß und elektrischem Strom . . . 685
9.3.2.1. Galvanomagnetische und thermomagnetische Effekte . . . 685
9.3.2.2. Thermoelektrische Effekte . . . 686
9.3.3. Piezoelektrizität . . . 688

9.4. Optoelektronische Halbleiter-Bauelemente . . . 690
9.4.1. Strahlungsquellen . . . 690
9.4.1.1. Lumineszenzdioden . . . 690
9.4.1.2. Halbleiterlaser . . . 691
9.4.2. Empfänger . . . 693
9.4.2.1. Absorption elektromagnetischer Strahlung . . . 693
9.4.2.2. Photowiderstand . . . 694
9.4.2.3. Photodioden . . . 695
9.4.2.4. Phototransistor . . . 698

10. Spezielle Relativitätstheorie . . . 699

10.1. Relativität des Bezugssystems . . . 699

10.2. Lorentz-Transformation . . . 701

10.3. Relativistische Effekte . . . 703
10.3.1. Längenkontraktion . . . 703
10.3.2. Zeitdilatation . . . 703
10.3.3. Relativistische Addition der Geschwindigkeiten . . . 705

10.4. Relativistische Dynamik . . . 705

10.5. Spezielle Relativitätstheorie in der Elektrodynamik . . . 708
10.5.1. Elektrodynamische Kraft . . . 708
10.5.2. Doppler-Effekt des Lichtes . . . 709

11. Anhang . . . 712

11.1. Lösungen der Übungsaufgaben . . . 712

11.2. Nobelpreisträger der Physik . . . 717

12. Sachwortverzeichnis . . . 723

13. Periodensystem der Elemente . . . 731