Namensregister

Abraham, Max (1875-1922), 57
Aepinus, Franz Ulrich Theodor (1724-1802), 112
Airy, George B. (1801-1892), 109, 111
Alhazen (ibn al Haitham) (965-1038), 110
Ampère, André Marie (1775-1836), 114
Arago, Dominique François Jean (1786-1853), 111, 114

Bernoulli, Daniel (1700-1782), 112
Biot, Jean Baptiste (1774-1862), 38, 111, 113
Bose, George Matthias, 112
Bradley, James (1692-1762), 110
Brewster, David (1781-1868), 69, 111
Browne, Thomas, 111

Cabeo, Niccolo (1585-1650), 114
Canton, John (1718-1772), 112
Cavendish, Henry (1731-1810), 112
Clausius, Rudolf Julius Emmanuel (1822-1888), 26, 115
Coulomb, Charles Augustin de (1736-1806), 5, 112, 113, 116

d'Alembert, Jean Baptiste le Rond (1717-1783), 76
Davy, Humphrey (1778-1829), 114
Desaguliers, Jean Théophile (1683-1744), 112
Descartes, René (1596-1650), 109–111
Dirac, Paul Adrien Maurice (1902-1984), ix, 117
Doppler, Christian (1803-1853), 93
Dufay, Charles (1698-1739), 112

Einstein, Albert (1879-1955), 85, 95, 116, 117
Euler, Leonhard (1707-1783), 111

Faraday, Michael (1791-1867), 47, 114–116
Fermat, Pierre (1601-1665), 110, 111
Fitzgerald, George Francis (1851-1901), 84, 116
Fizeau, Armand Hippolyte (1819-1896), 111, 115
Foucault, Léon (1819-1868), 115
Fourier, Jean Baptiste Joseph (1768-1830), 60, 61
Franklin, Benjamin (1706-1790), 112
Freiberg, Dietrich von (1250-1310), 109, 110
Fresnel, Augustin Jean (1788-1827), 111

Galilei, Galileo (1564-1642), 111
Gassendi, Pierre (1592-1655), 111
Gauss, Carl Friedrich (1777-1855), vii, 6
Gilbert, William (1540-1603), 111, 113
Giorgi, Giovanni (1871-1950), i, 6
Gounelle, E., 115
Gray, Stephen (1666-1736), 112
Green, George (1793-1841), 29, 113
Guericke, Otto von (1602-1686), 112

Hagen, Gotthilf (1797-1884), 69
Heaviside, Oliver (1850-1925), 115, 116
Heisenberg, Werner (1901-1976), 117
Heitler, Walter (1904-1981), 117
Heron von Alexandrien (2. Jhdt. vor oder nach Chr.), 109, 110
Hertz, Heinrich Rudolf (1857-1894), 116
Hooke, Robert (1635-1703), 110
Huygens, Christian (1629-1695), 110, 111

Jeans, James Hopwood (1877-1946), 117
Jordan, Pascual (1902-1980), 117

Kamal, al-Din al Farisi (-1320), 109, 110
Kelvin, William Thomson (1824-1907), 113, 115
Kepler, Johannes (1571-1630), 110
Kirchhoff, Gustav Robert (1824-1887), 50, 114, 115
Kleist, Ewald Jürgen von (ca. 1700-1748), 112
Kohlrausch, Rudolf (1801-1858), 39, 115
Kopernikus, Nikolaus (1473-1543), 111
Kronecker, Leopold (1823-1891), iv

Lagrange, Joseph (1736-1813), 111
Lambert, Johann Heinrich (1728-1777), 113
Landau, Lev Davidovich (1908-1968), 57
Laplace, Pierre-Simon Marquise de (1749-1827), 111, 113
Larmor, Sir Joseph (1857-1942), 106, 116
Lenard, Philipp (1862-1947), 117
Lichtenberg, Georg Christoph (1744-1799), 112
Liénard, Alfred-Marie (1869-1958), 104, 116
Lifshitz, Eugenii Mikhailovich (1915-1985), 57
Lorentz, Hendrik Antoon (1853-1928), 5, 7, 76, 84, 115, 116
Lorenz, Ludvig Valentin (1829-1891), 76, 115

Malus, Étienne Luis (1775-1812), 111
Maupertuis, Pierre-Louis-Moreau (1698-1759), 111
Maxwell, James Clerk (1831-1879), 4, 35, 53, 115, 116
Mayer, Tobias (1723-1762), 113
Michell, John (1724-1793), 113
Michelson, Albert Abraham (1852-1931), 83, 84, 116
Minkowski, Hermann (1864-1909), 57, 84, 117
Mössbauer, Rudolf (1929-), 118
Morley, Edward Williams (1838-1923), 83, 84, 116

Mossotti, Ottaviano Fabrizio (1791-1863), 26, 113, 115
Musschenbroek, Pieter van (1692-1761), 112, 113

Neckam, Alexander (1157-1217), 113
Neumann, Franz Ernst (1798-1895), 115
Newton, Isaac (1643-1727), 110, 111, 113

Ørsted, Hans Christian (1777-1851), 113, 114
Ohm, Georg Simon (1787-1854), 50, 114

Pais, Abraham (1918-2000), 117
Pauli, Wolfgang (1900-1958), 117
Peregrinus, Petrus (Pierre de Maricourt) (13. Jhdt.), 113, 114
Planck, Max (1858-1947), 117
Poincaré, Henri (1854-1912), 116
Poisson, Siméon-Denis (1787-1840), 10, 111, 113
Poynting, John Henry (1852-1914), 55, 115
Priestley, Joseph (1733-1804), 112
Ptolemaios, Klaudius (2. Jhdt. n. Chr.), 110

Rayleigh, John William Strutt (1842-1919), 117
Riemann, Bernhard (1826-1866), 115
Robison, John (1739-1805), 112
Römer, Olaf (1644-1710), 110
Rubens, Heinrich (1865-1922), 69

Sanuto, Livio (etwa 1530-1580), 113
Savart, Félix (1791-1841), 38, 113
al-Schirazi, Mahmud ibn (1236-1311), 109, 110
Schwarzschild, Karl (1873-1916), 116
Snellius, Willibrord van Royen (1581-1626), 67, 110
Sommerfeld, Arnold Johannes Wilhelm (1868-1951), 57
Stokes, George Gabriel (1819-1903), vii, 111
Stoney, Johnstone (1826-1911), 114
Sturgeon, William (1783-1850), 114

Taylor, Brook (1685-1731), 113
Thales v. Milet (640-546), 109, 111
Thomson, Joseph John (1856-1940), 115, 116
Thomson, William (Lord Kelvin) (1824-1907), 113, 115, 116

Voigt, Woldemar (1850-1919), 116
Volta, Alessandro Graf (1745-1827), 113

Wall, 112
Watson, William (1715-1787), 112
Weber, Wilhelm (1804-1894), 39, 115
Wheatstone (1802-1875), 115
Wheeler, William, 114
Wideröe, Rolf (1902-), 48
Wiechert, Emil (1861-1928), 104, 116
Wien, Wilhelm (1864-1928), 117
Wiener, Otto Heinrich (1867-1927), 116
Wilcke, Johann Carl (1732-1796), 112, 114, 116
Wilson, Benjamin (1721-1788), 112
Winkler, Johann Heinrich, 112

Young, Thomas (1773-1829), 109–111

Sachregister

Aberration, 110, 111
Abstand, 87
  lichtartig, 88
  raumartig, 87
  zeitartig, 87
Additions-Theorem
  Geschwindigkeiten, 88
Amperegesetz, 37

Batterie, 113
Bernstein, 109, 111
Betatron, 48
Beugung, 111
Bewegungsgleichungen, 97
Biot-Savart Gesetz, 38
Blitz, 109
Bohrsches Magneton, 41
Brechung, 67–69
Brechzahl, 67
Brewsterscher Winkel, 69, 111
Brille, 110

Clausius-Mossotti-Beziehung, 26
Coulomb-Gesetz, 112
Coulomb-Kraft, 5, 11

d'Alembert-Operator, 76, 90
dielektrische Verschiebung, 23
Dielektrizitätskonstante, 24
  Clausius, Mossotti, 26
Dipol
  elektrischer
    Drehmoment, 15
    Energie, 15
    Feld, 13
    Kraft, 15
    Potential, 13
  magnetischer
    Drehmoment, 42
    Feld, 41
    Kraft, 41
Dipolmoment
  elektrisches, 13–14, 21
  magnetisches, 40
    Ringstrom, 41
    Spin, 41
Dipolstrahlung
  elektrische, 80
  magnetische, 81
Dirac delta, ix, 3
Divergenz, v
Doppelbrechung, 110, 111
Doppler-Effekt, 93
Doppler-Verschiebung, 94
Drehimpulserhaltung, 102
Drehmoment
  auf elektrischen Dipol, 16
  auf magnetischen Dipol, 42

Eichtransformation, 75
Eichung
  Coulomb, 76, 115
  Lorenz, 76, 115
Eigenzeit, 87
Einheiten, i–iii, 6–7
Elastizitätstheorie, 111
Elektromagnet, 114
elektromotorische Kraft, 49
Elektron, 114
Elektronenradius
  klassisch, 12
Elektrostatik, 9–35
  Geschichte, 111–113
Energie
  Dipol
    elektrischer, 16
    magnetischer, 52
  elektrostatische, 11, 32
  Induktivität, 50
  Quadrupol
    elektrischer, 16
Energie-, Impulserhaltung, 102
Energie-Impuls-Tensor, 100–103
Energiebilanz, 55–56
Energiedichte, 100
  ebene Welle, 60
  elektromagnetische, 55
  elektrostatische, 11
Energiestrom
  ebene Welle, 60
Energiestromdichte, 55, 100
Erhaltungssätze, 101–103

Feld
  Dipol
    elektrischer, 13
    magnetischer, 41
  einer Stromverteilung, 38
  Ladungsverteilung, 9
  magnetisches, divergenzfrei, 114
Felder
  Punktladung, 93
Feldlinien

Sichtbarmachung, 114
Feldstärke
elektrische, 9
magnetische, 43
Feldtensor, 91–92
dualer, 92
Flächen-Integrale, vii
Flächenladungsdichte, 3
Fluss
dielektrische Verschiebung, 23
elektrischer, 10
magnetischer, 37, 47
Fourier-Integral, 60–61
Fourier-Reihe, 60–61

Galilei-Invarianz, 83
Gaussscher Satz, vii
Gradient, v
Greenscher Satz, viii
Gruppengeschwindigkeit, 72

Hafele-Keating-Experiment, 118
Hagen und Rubens-Gesetz, 69
Hertzscher Dipol, 80
Hohlleiter, 70–73

Impuls
elektromagnetischer, 115
Impuls-Bilanz, 56–58
Impulsdichte, 100
Strahlungs-, 56
Induktion
magnetische, 37–39
Induktionsgesetz, 47, 114
Induktivität, 49–52
Influenz, 112
Influenzladung, 29
Integral-Sätze, vii

Kapazitäten, 28
Kirchhoffsche Regeln, 50
Knotenpunktsgesetz, 50
Komponenten
kontravariante, 84
kovariante, 84
Kondensator, 28
Kugel-, 28
Platten-, 29
Kontinuitätsgleichung, 4, 89
Korkenzieher-Regel, 37
Kraft
auf elektrischen Dipol, 16
auf magnetischen Dipol, 41
Coulomb-, 5
Lorentz-, 5
zwischen Strömen, 114
zwischen Stromkreisen, 39, 51
Kraftdichte, 5
Dielektrikum, 32
elektromagnetische, 55–58, 100
Kronecker delta, iv
Kugel
dielektrische, 25
Kugelflächenfunktionen, x, 18
Additionstheorem, 21
Kugelkoordinaten, 17
Divergenz, 18
Gradient, 17
Laplace-Operator, 18
Volumenelement, 17

Längenkontraktion, 86
Ladung
Influenz-, 29
Ladungsdichte, 3
freibewegliche, 23, 54
Polarisations-, 23, 54
Ladungserhaltung, 4, 53, 101, 112
Lagrange-Funktion, 98–99
Laplace-Operator, vi, viii
Legendre-Funktionen
zugeordnete, x
leitende Ebene, 30
leitende Kugel, 31
Leiter, 112
elektrische, 27
Kraft auf, 27
Levi-Civita-Symbol, iv
Liénard-Wiechert-Potential, 104
Lichtgeschwindigkeit, 5, 110, 115
Konstanz, 85
Vakuum, 60
Linien-Integrale, vii
Lochkamera, 110
Lorentz-Invarianz, 83
Lorentz-Kraft, 5, 114, 116
Lorentz-Kraftdichte, 95
Lorentz-Transformation, 83–86
eigentliche, 85

Maßsysteme, i–iii, 6–7
Magnetisierung, 43
Magnetit, 109
Magnetostatik, 9, 37–45
Geschichte, 113
Maschengesetz, 50
Maxwell-Gleichungen, 4, 53–54, 91
in Materie, 54
Mechanik
relativistische, 95–97

metallische Reflexion, 69
metrischer Tensor, 84
Michelson-Morley-Versuch, 83
Minkowski-Kraft, 95
Minkowski-Raum, 84
Monopol
  elektrischer, 21
  magnetischer, 40, 44, 113
Multipol
  elektrischer, 19–22
    Potential, 20

Nabla Operator, v

Optik, Geschichte, 111

Parabolspiegel, 110
Permeabilität, 43
Phasengeschwindigkeit, 72
Plasma-Schwingungen, 66
Plasmafrequenz, 65
Poisson-Gleichung, 10
Polarisation, 23
Polstärke, 44
Potential
  avanciertes, 78
  elektrisches, 9
  Ladungs-, Stromverteilung, 77–78
  Ladungsverteilung, 9
  magnetisches, 44, 113
  retardiertes, 78, 90, 115
  skalares, 75
Potentiale, 75–76
Poynting-Vektor, 55, 60, 100, 115
Punktladung, 3, 10
  Abstrahlung, 106
  Feld, 104

Quadrupol
  elektrischer
    Energie, 15
    Potential, 13
Quadrupolmoment
  elektrisches, 13–15, 21
Quadrupolstrahlung
  elektrische, 81

Randbedingung
  elektrisches Feld, 24
  magnetisches Feld, 43
Raumwinkelelement, 17
Reflexion, 67–69
Regenbogen, 109, 110
Relativitätstheorie
  allgemeine, 117
    Geschichte, 116–117
  spezielle, 83–103
Ringstrom, 40
Rotation, v
Ruheenergie, 96

Schwerpunktsbewegung, 102
Skalarprodukt, iv
Snelliussches Brechungsgesetz, 67, 110
Spannungsquelle, 49
Spannungstensor, 100, 115
  elektromagnetischer, 56
  elektrostatisch, 35
Spatprodukt, v
Spule
  lange, 49
  magnetische, 38, 44
Stokesscher Satz, vii
Strahlungsfeld, 79
Strahlungswiderstand, 81
Strom
  elektrischer, 4
Stromdichte
  elektrische, 4
  freibewegliche Ladungs-, 43, 54
  Magnetisierungs-, 43, 54
  Polarisations-, 54
Stromkreis, 49–50
Suszeptibilität
  elektrische, 24
  magnetische, 43

TE-Mode, 71
TEM-Mode, 71
TM-Mode, 71
Totalreflexion, 69
Transformation der Felder, 92
Transversalwelle, 111

Vektoralgebra, iv
Vektoranalysis, v
Vektorgradient, v
vektorielles Produkt, iv
Vektorpotential, 38–39, 75, 114, 115
Verschiebungsstrom, 115
Vierer-Impuls, 96
Vierer-Potential, 89
Viererskalar, 87–88
Viererstromdichte, 89
Vierertensor
  antisymmetrischer, 91
  symmetrischer, 100
Vierervektor, 88–90
Volumen-Integrale, vii

Welle
an Oberfläche, 69
ebene, 59–60
elektromagnetische, 59–63
im Leiter, 64–66
longitudinale, 66
Wellen
linear polarisiert, 62
zirkular polarisiert, 62
Wellengleichung, 59
Wellenleiter, 70–73
Wellenpaket, 72
Weltgeschwindigkeit, 88
Widerstand, 114
ohmscher, 50
Wirkung, 98, 111

Zeitdilatation, 86
Gravitation, 118
Zeitmittelwerte, 62–63

Inhalt Elektrodynamik

A Grundgleichungen **3**

1 Grundgleichungen der Elektrodynamik **3**
1.a Ladungen und Ströme . . . 3
1.a.α Ladungsdichte . . . 3
1.a.β Strom und Stromdichte . . . 4
1.a.γ Ladungserhaltung und Kontinuitätsgleichung . . . 4
1.b Maxwell-Gleichungen . . . 4
1.c Coulomb- und Lorentz-Kraft . . . 5

2 Dimensionen und Einheiten **6**
2.a Gausssches Maßsystem . . . 6
2.b Andere Einheitensysteme . . . 6
2.c Motivation für Gausssche Einheiten . . . 7

B Elektrostatik **9**

3 Elektrisches Feld, Potential, Energie des Feldes **9**
3.a Statik . . . 9
3.b Elektrisches Feld und Potential . . . 9
3.b.α Elektrisches Potential . . . 9
3.b.β Elektrischer Fluss und Ladung . . . 10
3.b.γ Potential einer Ladungsverteilung . . . 10
3.c Coulombkraft und Feldenergie . . . 11

4 Elektrischer Dipol und Quadrupol **13**
4.a Das Feld für $r > R$ . . . 13
4.b Transformationseigenschaften . . . 14
4.c Dipol . . . 14
4.d Quadrupol . . . 15
4.d.α Symmetrien . . . 15
4.d.β Symmetrischer Quadrupol . . . 15
4.e Energie, Kraft und Drehmoment auf einen Multipol im äußeren Feld . . . 15

5 Multipol-Entwicklung in Kugelkoordinaten **17**
5.a Poisson-Gleichung in Kugelkoordinaten . . . 17
5.a.α Der Gradient . . . 17
5.a.β Die Divergenz . . . 18
5.a.γ Der Laplace-Operator . . . 18
5.b Kugelflächenfunktionen . . . 18
5.c Radialgleichung und Multipol-Momente . . . 19
5.d Punktladung am Ort $\mathbf{r}'$, zylindersymmetrische Ladungsverteilung . . . 21

6 Elektrisches Feld in Materie **23**
6.a Polarisation und dielektrische Verschiebung . . . 23
6.b Grenzflächen zwischen Dielektrika . . . 24
6.c Dielektrische Kugel im homogenen elektrischen Feld . . . 25
6.d Dielektrizitätskonstante nach Clausius und Mossotti . . . 26

7 Elektrizität auf Leitern **27**
7.a Elektrische Leiter . . . 27
7.a.α Randbedingungen an der Leiteroberfläche . . . 27
7.a.β Kraft auf Leiter (im Vakuum) . . . 27
7.b Kapazitäten . . . 28
7.c Influenzladungen . . . 29
7.c.α Leiterfreier Raum . . . 30
7.c.β Leitende Ebene . . . 30
7.c.γ Leitende Kugel . . . 31

8 Energie, Kräfte und Spannungen im Dielektrikum **32**
8.a Elektrostatische Energie . . . 32
8.b Kraftdichte im isotropen Dielektrikum . . . 32
8.c Maxwellscher Spannungstensor . . . 35

C Magnetostatik **37**

9 Magnetische Induktion und Vektorpotential **37**
9.a Amperegesetz . . . 37
9.b Magnetischer Fluss . . . 37
9.c Feld einer Stromverteilung . . . 38
9.d Vektorpotential . . . 38
9.e Kraft zwischen zwei Stromkreisen . . . 39

10 Ringströme als magnetische Dipole **40**
10.a Lokalisierte Stromverteilung und magnetischer Dipol . . . 40
10.b Magnetisches Dipolmoment eines Ringstroms . . . 41
10.c Kraft und Drehmoment auf einen Dipol im äußeren magnetischen Feld . . . 41
10.c.α Kraft . . . 41
10.c.β Drehmoment . . . 42

11 Magnetismus in Materie. Feld einer Spule **43**
11.a Magnetismus in Materie . . . 43
11.b Feld einer Spule . . . 44

D Induktionsgesetz **47**

12 Faradaysches Induktionsgesetz **47**

13 Induktivitäten und Stromkreise **49**
13.a Induktivitäten . . . 49
13.b Stromkreis-Elemente . . . 49
13.c Kirchhoffsche Regeln . . . 50
13.d Energie von Induktivitäten . . . 50
13.d.α Konstante Induktivitäten . . . 51
13.d.β Gegeneinander bewegte Stromkreise . . . 51
13.d.γ Konstante magnetische Flüsse . . . 51
13.d.δ Kraft zwischen zwei Stromkreisen . . . 51
13.d.ϵ Energie eines magnetischen Dipols im äußeren Magnetfeld . . . 52
13.d.ζ Permanente magnetische Momente . . . 52

E Maxwell-Gleichungen **53**

14 Vollständige Maxwell-Gleichungen **53**
14.a Widerspruchsfreiheit der Maxwell-Gleichungen . . . 53
14.b Maxwell-Gleichungen für freibewegliche Ladungen und Ströme . . . 54

15 Energie- und Impuls-Bilanz **55**
15.a Energie . . . 55
15.b Impuls-Bilanz . . . 56

F Elektromagnetische Wellen **59**

16 Elektromagnetische Wellen im Vakuum und in homogenen isotropen Isolatoren **59**
16.a Wellengleichung . . . 59
16.b Ebene Wellen . . . 59
16.c Überlagerung ebener periodischer Wellen . . . 60
16.c.α Einschub über FOURIER-Reihen und Integrale . . . 60
16.c.β Zurück zu den MAXWELL-Gleichungen . . . 61
16.c.γ Zeitmittelwerte und Zeitintegrale . . . 62

17 Elektromagnetische Wellen in homogenen Leitern **64**
17.a Transversal-Schwingungen bei niedrigen Frequenzen . . . 64
17.b Transversal-Schwingungen bei hohen Frequenzen . . . 65
17.c Longitudinale = Plasma-Schwingungen . . . 66

18 Reflexion und Brechung an einer ebenen Grenzfläche **67**
18.a Problemstellung und Ausbreitungsrichtung . . . 67
18.b Grenzbedingungen, Amplituden . . . 67
18.c Diskussion für $\mu_1 = \mu_2$ . . . 68
18.c.α Isolator, $|\sin\alpha_2| < 1$: Brechung . . . 68
18.c.β Isolator, $|\sin\alpha_2| > 1$: Totalreflexion . . . 69
18.c.γ Metallische Reflexion, $\alpha = 0$ . . . 69
18.c.δ Oberflächenwellen am Leiter . . . 69

19 Hohlleiter **70**
19.a Hohlleiter . . . 70
19.b Lösung für rechteckigen Querschnitt . . . 72
19.c Wellenpakete . . . 72

G Elektrodynamische Potentiale **75**

20 Elektrodynamische Potentiale, Eichtransformationen **75**
20.a Potentiale . . . 75
20.b Eichtransformationen . . . 75

21 Die elektromagnetischen Potentiale einer allgemeinen Ladungs- und Stromverteilung **77**
21.a Berechnung der Potentiale . . . 77
21.b Eichbedingung . . . 78

22 Ausstrahlung harmonischer Schwingungen **79**
22.a Strahlungsfeld . . . 79
22.a.α Nahzone (Statische Zone) . . . 79
22.a.β Fernzone (Strahlungszone) . . . 79
22.b Elektrische Dipolstrahlung (HERTZscher Dipol) . . . 80
22.c Magnetische Dipolstrahlung und elektrische Quadrupolstrahlung . . . 81
22.c.α Magnetische Dipolstrahlung . . . 82
22.c.β Elektrische Quadrupolstrahlung . . . 82

H LORENTZ-Invarianz der Elektrodynamik **83**

23 Lorentz-Transformation **83**
23.a Galilei- und Lorentz-Transformation . . . 83
23.b Lorentz-Transformation . . . 84
23.b.α Zeitdilatation . . . 86
23.b.β Längenkontraktion . . . 86

24 Vierervektoren und Vierervektoren **87**
24.a Abstand und Eigenzeit als Vierervektoren . . . 87
24.a.α Raumartiger Abstand $s^2 < 0$ . . . 87
24.a.β Zeitartiger Abstand $s^2 > 0$ . . . 87
24.a.γ Lichtartiger Abstand $s^2 = 0$ . . . 88
24.b Weltgeschwindigkeit als Vierervektor . . . 88
24.c Vierervektordichte . . . 89
24.d Vierervektorpotential . . . 89

25 Elektromagnetischer Feldtensor **91**
25.a Feldtensor . . . 91
25.b Maxwell-Gleichungen . . . 91
25.b.α Die inhomogenen Gleichungen . . . 91
25.b.β Die homogenen Gleichungen . . . 92
25.c Transformation der elektrischen und magnetischen Felder . . . 92
25.d Felder einer gleichförmig bewegten Punktladung . . . 93
25.e Doppler-Effekt . . . 93

26 Relativistische Mechanik **95**
26.a Lorentz-Kraftdichte . . . 95
26.b Lorentz-Kraft auf eine Punktladung . . . 95
26.c Energie und Impuls eines Massenpunktes . . . 95
26.d Bewegungsgleichung . . . 97

27 Lagrange-Formulierung **98**
27.a Lagrange-Funktion einer massiven Ladung im elektromagnetischen Feld . . . 98
27.b Lagrangedichte des elektromagnetischen Feldes . . . 98

28 Energie-Impuls-Tensor und Erhaltungsgrößen **100**
28.a Der Tensor . . . 100
28.b Erhaltungssätze . . . 101
28.b.α Ladung . . . 101
28.b.β Energie und Impuls . . . 102
28.b.γ Drehimpuls und Schwerpunktsbewegung . . . 102

29 Feld einer beliebig bewegten Punktladung **104**
29.a Liénard-Wiechert-Potential . . . 104
29.b Die Felder . . . 104
29.c Gleichförmige Bewegung . . . 105
29.d Beschleunigte Ladung momentan in Ruhe . . . 106
29.e Abstrahlung, $\beta \neq 0$ . . . 106

I Rückblick und Ausblick **109**

30 Kurze Geschichte der Elektrodynamik **109**
30.a Theorie des Lichts bis Fresnel . . . 109
30.b Elektrostatik . . . 111
30.c Magnetostatik . . . 113
30.d Aufbruch zur Elektrodynamik . . . 113
30.e Elektrodynamik und Wellen . . . 114

30.f Relativitätstheorie . . . 116
30.g Von der klassischen zur Quanten-Elektrodynamik . . . 117

31 Gravitations-Zeitdilatation 118
31.a Lichtquant im Gravitationsfeld . . . 118
31.b Äquivalenz-Prinzip . . . 118

Anhänge i

A Umrechnung zwischen Maßsystemen der Elektrodynamik i

B Formeln zur Vektorrechnung iv
B.a Vektoralgebra . . . iv
B.a.α Summationskonvention und orthonormale Basis . . . iv
B.a.β Skalarprodukt . . . iv
B.a.γ Vektorielles Produkt . . . iv
B.a.δ Mehrfachprodukte . . . v
B.b Vektoranalysis . . . v
B.b.α Räumliche Differentiation, Nabla-Operator . . . v
B.b.β Zweifache Ableitung, Laplace-Operator . . . vi
B.b.γ Ableitung von Produkten . . . vi
B.c Spezielle Ausdrücke . . . vi
B.d Integral-Sätze . . . vii
B.d.α Linien-Integrale . . . vii
B.d.β Flächen-Integrale . . . vii
B.d.γ Volumen-Integrale . . . vii
B.d.δ Volumen-Integrale über Produkte . . . viii
B.e Der Laplace-Operator von $1/r$ und Verwandtes . . . viii
B.e.α Der Laplace-Operator von $1/r$ . . . viii
B.e.β Darstellung eines Vektorfeldes als Summe eines rotationsfreien und eines divergenzfreien Feldes . . . ix

C Kugelflächenfunktionen x
C.a Eigenwert-Problem und Separation der Variablen . . . x
C.b Zugeordnete Legendre-Funktionen . . . x
C.c Orthogonalität und Normierung . . . xii
C.d Bemerkung zur Vollständigkeit . . . xii

Namensregister xv

Sachregister xvii

Inhalt xxi