

1 Einführung **1**

1.1 Kurzer historischer Überblick 2

1.1.1 Elektrizität und Magnetismus 3

1.1.2 Licht: der sichtbare Teil des Spektrums 6

1.1.3 Synthese: die Geburt des *Elektromagnetismus* 7

1.2 Die Dynamik der Felder 8

1.3 Die Maxwell-Gleichungen in Integralform 17

1.4 Elektromagnetische Potentiale 20

1.4.1 Die Coulomb-Eichung 22

1.4.2 Eine Wellengleichung für das Vektorpotential 25

1.5 Die Elektro- und Magnetostatik 29

1.5.1 Das Coulomb-Gesetz in Integralform 29

1.5.2 Das Biot-Savart-Gesetz in Integralform 29

1.5.3 *Langsam* oszillierende Quellen 30

1.6 Die Dynamik nicht-relativistischer Teilchen 31

1.7 Übungsaufgaben 35

2 Statik und Dynamik elektromagnetischer Felder **41**

2.1 *Zeitgemittelte* Felder erfüllen die Gleichungen der Statik! 41

2.2 Die *Multipolentwicklung* für das elektrostatische Potential 43

2.2.1 Multipolentwicklung in kartesischen Koordinaten 44

2.2.2 Multipolentwicklung in beliebiger Ordnung 46

2.2.3 Multipolentwicklung in sphärischen Koordinaten 48

2.3 *Multipolentwicklung* für das Vektorpotential 52

2.4 Elektromagnetische Wellen „im Vakuum“ 55

2.4.1 Wellen in *Abwesenheit* von Ladungen und Strömen 56

2.4.2 Wellen, *erzeugt* von Ladungen und Strömen 64

2.4.3 Die Green’sche Funktion der Wellengleichung 69

2.5 Übungsaufgaben 74

3	Relativistisches Kompendium	85
3.1	Postulate der Speziellen Relativitätstheorie	86
3.1.1	Das zweite Postulat und die Eigenzeit	87
3.2	Poincaré- und Lorentz-Transformationen	88
3.2.1	Die Lorentz-Gruppe	89
3.3	Physikalische Folgen der Lorentz-Kovarianz	93
3.4	4-Schreibweise	94
3.5	Die Poincaré- und Lorentz-Gruppen	98
3.6	4-Skalare, 4-Vektoren, 4-Tensoren	100
3.7	Der elektromagnetische Feldtensor und die Lorentz-Kraft	107
3.8	Übungsaufgaben	114
4	Relativistische Dynamik	117
4.1	Die Dynamik der Teilchen	119
4.1.1	Die Lagrange-Funktion	120
4.1.2	Die Hamilton-Funktion	121
4.1.3	Analytische Mechanik in kovarianter Form	123
4.2	Die Dynamik der Felder	125
4.2.1	Eichinvarianz der Wirkung des Gesamtsystems	128
4.2.2	Zusammenfassung	129
4.3	Energie und Impuls des Strahlungsfelds	130
4.3.1	Energieerhaltung des Gesamtsystems	131
4.3.2	Impulserhaltung des Gesamtsystems	132
4.3.3	Erhaltung des 4-Impulses in 4-Notation!	134
4.4	Drehimpulserhaltung	136
4.4.1	Der 4-Drehimpulstensor des freien Feldes	136
4.4.2	Energie-Impuls-Tensor für materielle Teilchen	137
4.4.3	Drehimpulserhaltung	140
4.5	Der Virialsatz	141
4.6	Die Grenzen der klassischen Physik	143
4.6.1	Ausblick	146
4.7	Das Noether-Theorem	147
4.7.1	Das Noether-Theorem in der Elektrodynamik	148
4.7.2	Beispiel 1: Translationen in der Raum-Zeit	152
4.7.3	Beispiel 2: Transformationen des Feldfreiheitsgrads	153
4.7.4	Beispiel 3: Lorentz-Transformationen	156
4.8	Übungsaufgaben	157
5	Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen	161
5.1	Das Feld bewegter Punktladungen	162
5.1.1	Konsequenzen für die physikalischen Felder	164
5.1.2	Beispiel: geradlinig-gleichförmig bewegtes Teilchen	165
5.2	Geradlinige und kreisförmige Bewegung	168
5.2.1	Beispiel 1: geradlinige, beschleunigte Bewegung	169
5.2.2	Beispiel 2: kreisförmige Bewegung	172
5.3	Abstrahlung von Energie im Coulomb-Problem	175
5.3.1	Energieabstrahlung im relativistischen Coulomb-Problem	176
5.3.2	Energieabstrahlung im Bohr'schen Atommodell	179

5.3.3	Die Grenzen der klassischen Physik	183
5.4	Strahlungsfelder lokalisierter oszillierender Quellen	184
5.4.1	Die Nahzone oder Statische Zone	186
5.4.2	Die Induktionszone	187
5.4.3	Die Fern- oder Strahlungszone	187
5.4.4	Was ändert sich bei Wellenausbreitung im Medium?	192
5.5	Übungsaufgaben	193
6	Elektrodynamik „im Medium“	199
6.1	Die Basisgleichungen der Maxwell-Theorie <i>im Medium</i>	200
6.1.1	Materialgleichungen	201
6.1.2	Statische Felder „im Medium“	202
6.1.3	Die Energiebilanzgleichung	202
6.1.4	Die Suszeptibilitäten in <i>anisotropen Medien</i>	203
6.1.5	Gültigkeitsbereich: hinreichend <i>niedrige</i> Frequenzen	205
6.2	Wellengleichungen in materiellen Medien	206
6.3	Kovariante Formulierung der Elektrodynamik in materiellen Medien	209
6.4	Hertz'sche Potentiale	211
6.4.1	Beispiel 1: zeitabhängige Magnetisierung	216
6.4.2	Beispiel 2: zeitabhängige Polarisation	217
6.5	Herleitung der Maxwell-Theorie „im Medium“	218
6.5.1	Klassisches mikroskopisches Bild des „Mediums“	220
6.5.2	Räumliche Mittelung physikalischer Größen	222
6.5.3	Die räumlich gemittelte <i>Ladungsdichte</i>	223
6.5.4	Die <i>Stromdichte</i> „im Vakuum“	224
6.5.5	<i>Konvektiver</i> Anteil der <i>Stromdichte</i> „im Medium“	227
6.5.6	Das räumlich gemittelte Durchflutungsgesetz	230
6.6	Übungsaufgaben	233
7	Elektromagnetische Wellen in materiellen Medien	239
7.1	Skineffekt an einer <i>ebenen Grenzfläche</i>	241
7.1.1	Die Skintiefe	241
7.1.2	Die Felder und Stromdichten	243
7.1.3	Die Randbedingungen	245
7.1.4	Der Energiefluss	246
7.1.5	Anmerkungen	248
7.2	Hohlraumresonatoren und Wellenleiter	249
7.2.1	Beispiel: quaderförmiger Hohlraum	251
7.2.2	Beispiel: allgemeine Zylindergeometrien	256
7.2.3	Beispiel: Wellenleiter	260
7.3	Skineffekt im leitenden Draht	264
7.3.1	<i>Physikalische Bedeutung</i> dieses Modells	265
7.3.2	Die Felder und Stromdichten	266
7.3.3	Bestimmungsgleichungen für das Vektorpotential	268
7.3.4	Lösung <i>innerhalb</i> des leitenden Drahts	270
7.3.5	Lösung <i>außerhalb</i> des leitenden Drahts	273
7.3.6	Grenzfall hoher Leitfähigkeit	274
7.3.7	Der Energiefluss	275

7.3.8	Anmerkungen	279
7.4	Hohlräume mit <i>sphärischer Geometrie</i>	280
7.4.1	Die Struktur des komplexen Vektorpotentials	282
7.4.2	Energiefluss im sphärischen Hohlraum	289
7.4.3	Transversal-elektrische Moden: die Details	293
7.4.4	Transversal-magnetische Moden: die Details	295
7.4.5	Beispiel: Schumann-Resonanzen	297
7.5	Übungsaufgaben	304
8	Lösungen zu den Übungsaufgaben	309
8.1	Einführung	309
8.2	Statik und Dynamik elektromagnetischer Felder	320
8.3	Relativistisches Kompendium	357
8.4	Relativistische Dynamik	361
8.5	Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen	373
8.6	Elektrodynamik „im Medium“	385
8.7	Elektromagnetische Wellen in materiellen Medien	402
A	Induktive Herleitung der Gleichungen der Elektrodynamik	413
A.1	Das Coulomb'sche Gesetz	413
A.2	Ladungserhaltung	414
A.3	Das Biot-Savart-Gesetz	415
A.4	Das Faraday'sche Gesetz	417
B	Magnetische Monopole	419
B.1	Kovariante Formulierung	420
C	Eigenwertproblem für $(\hat{\mathcal{L}}^2, \hat{\mathcal{L}}_3)$	423
C.1	Eigenschaften der Operatoren $\hat{\mathcal{L}}^2$ und $\hat{\mathcal{L}}_{1,2,3}$	425
C.2	Bestimmung der möglichen (ℓ, m) -Werte	429
C.3	Erzeugung der Eigenfunktionen $Y_{\ell m}$ aus $Y_{\ell, -\ell}$	429
C.4	Explizite Form der Eigenfunktionen $Y_{\ell m}$	431
C.5	Eigenschaften der Eigenfunktionen $Y_{\ell m}$	434
D	Retardierte elektromagnetische Felder	439
E	Die Telegraphengleichung	443
E.1	Bedeutsamkeit der Telegraphengleichung	443
E.2	Herleitung für ein leitendes Kabel ($d = 1$)	444
E.3	Dissipation, Langzeitlimes, Eindeutigkeit	446
E.4	Lösung im d -dimensionalen Raum	448
E.5	Beispiel: das leitende Kabel ($d = 1$)	449
E.6	Lösung der Telegraphengleichung für $d = 2, 3$	452
	Liste der Symbole	455
	Literaturverzeichnis	459
	Stichwortverzeichnis	463