

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zur Bedeutung der elektromagnetischen Theorie .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Einige mathematische Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
1.1 Vektoralgebra .....	5
1.2 Koordinatensysteme .....	9
1.3 Vektoranalysis .....	15
1.3.1 Differentiation .....	15
1.3.2 Integration .....	15
1.3.3 Gradient .....	16
1.3.4 Divergenz .....	17
1.3.5 Rotation .....	18
1.3.6 Nabla-Operator .....	21
1.3.7 Rechnen mit dem Nabla-Operator .....	22
1.3.8 Zweifache Anwendungen des Nabla-Operators .....	23
1.4 Integralsätze .....	24
1.4.1 Hauptsatz der Integralrechnung .....	24
1.4.2 Wegintegral eines Gradientenfeldes .....	25
1.4.3 Gauß'scher Integralsatz .....	25
1.4.4 Green'sche Integralsätze .....	27
1.4.5 Stokes'scher Integralsatz .....	28
1.5 Numerische Integration .....	29
1.6 Dirac'sche Deltafunktion .....	34
1.7 Vektorfelder, Potentiale .....	36
Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	37
<b>2. Maxwell'sche Gleichungen im Vakuum .....</b>	<b>39</b>
2.1 Feldbegriff .....	39
2.2 Ladungen, Ströme .....	41
2.3 Coulomb'sches Gesetz, Elektrisches Feld .....	43
2.4 Satz von Gauß .....	43
2.5 Biot-Savart'sches Gesetz, Durchflutungssatz .....	45
2.6 Vierte Maxwell'sche Gleichung .....	46
2.7 Induktionsgesetz .....	47
2.8 Verschiebungsstrom, Maxwell's Gleichung .....	48

2.9	Maxwell'sche Gleichungen .....	49
2.10	Einteilung elektromagnetischer Felder .....	51
	Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	54
<b>3.</b>	<b>Elektrostatische Felder I (Vakuum. Leitende Körper) .....</b>	<b>56</b>
3.1	Anwendung des Coulomb'schen Gesetzes .....	56
3.2	Anwendung des Satzes von Gauß .....	59
3.3	Elektrisches Potential .....	60
3.4	Potentiale verschiedener Ladungsanordnungen .....	61
3.5	Laplace-, Poisson-Gleichung .....	67
3.6	Leitende Körper. Randbedingungen .....	72
3.7	Spiegelungsmethode .....	75
3.8	Kapazität. Teilkapazität .....	78
	Zusammenfassung .....	85
	Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	86
<b>4.</b>	<b>Elektrostatische Felder II (Dielektrische Materie) .....</b>	<b>88</b>
4.1	Polarisation .....	89
4.1.1	Unpolare Dielektrika .....	89
4.1.2	Polare Dielektrika .....	90
4.1.3	Feld eines polarisierten Körpers .....	92
4.1.4	Makroskopische Beschreibung .....	94
4.2	Dielektrische Verschiebung .....	97
4.3	Einfluss auf die Maxwell'schen Gleichungen. Stetigkeitsbedingungen .....	98
4.4	Spiegelung an dielektrischen Grenzflächen .....	101
	Zusammenfassung .....	103
	Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	104
<b>5.</b>	<b>Elektrostatische Felder III (Energie. Kräfte) .....</b>	<b>105</b>
5.1	Energie einer Anordnung von Punktladungen .....	105
5.2	Energie einer kontinuierlichen Ladungsverteilung .....	106
5.3	Kräfte auf Körper und Grenzflächen .....	108
5.4	Kraftdichte .....	110
	Zusammenfassung .....	113
	Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	114
<b>6.</b>	<b>Elektrostatische Felder IV (Spezielle Lösungsmethoden) ..</b>	<b>115</b>
6.1	Eindeutigkeit der Lösung .....	115
6.2	Separation der Laplace-Gleichung .....	116
6.2.1	Kartesische Koordinaten .....	117
6.2.2	Vollständige, orthogonale Funktionensysteme .....	120
6.2.3	Zylinderkoordinaten. Zylinderfunktionen .....	122
6.2.4	Fourier-Bessel-Entwicklung .....	126
6.2.5	Kugelkoordinaten. Kugelfunktionen .....	128

6.3	Konforme Abbildung .....	131
6.3.1	Darstellung ebener Felder durch komplexe Funktionen .....	131
6.3.2	Prinzip der konformen Abbildung. Beispiele .....	135
6.3.3	Schwarz-Christoffel-Abbildung .....	141
6.4	Beispiele für numerische Simulation .....	144
6.4.1	Einfache Integral-Methode .....	145
6.4.2	Einfache Differentiations-Methode (Finite Differenzen Methode) .....	149
	Zusammenfassung .....	153
	Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	155
7.	Stationäres Strömungsfeld .....	157
7.1	Stromdichte. Kontinuitätsgleichung .....	157
7.2	Leitfähigkeit. Ohm'sches Gesetz. Verlustleistung .....	159
7.3	Elektromotorische Kraft (EMK) .....	161
7.4	Kirchhoff'sche Sätze .....	163
7.5	Grundlegende Gleichungen .....	164
7.6	Relaxationszeit .....	167
	Zusammenfassung .....	169
	Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	170
8.	Magnetostatische Felder I (Vakuum) .....	171
8.1	Anwendung des Durchflutungssatzes .....	171
8.2	Anwendung des ersten Ampère'schen Gesetzes .....	173
8.3	Anwendung des Biot-Savart'schen Gesetzes .....	176
8.4	Magnetisches Skalarpotential .....	179
8.5	Stromdurchflossene Leiterschleife. Magnetischer Dipol .....	180
8.6	Magnetisches Vektorpotential .....	184
8.7	Vektorpotential im Zweidimensionalen (Komplexes Potential) .....	188
	Zusammenfassung .....	190
	Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	191
9.	Magnetostatische Felder II (Magnetisierbare Materie) ....	193
9.1	Magnetisierung .....	194
9.1.1	Diamagnetismus .....	195
9.1.2	Paramagnetismus .....	196
9.1.3	Feld eines magnetisierten Körpers .....	197
9.1.4	Makroskopische Beschreibung .....	200
9.1.5	Ferromagnetismus .....	201
9.2	Magnetische Feldstärke .....	204
9.3	Einfluss auf die Maxwell'schen Gleichungen .....	205
9.4	Spiegelung an permeablen Grenzflächen .....	207
	Zusammenfassung .....	208

Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	209
<b>10. Magnetostatische Felder III (Induktivität. Energie. Magnetische Kreise) .....</b>	<b>210</b>
10.1 Induktivität .....	210
10.2 Magnetische Energie .....	213
10.3 Kräfte auf Körper und Grenzflächen .....	217
10.4 Magnetische Kreise .....	220
Zusammenfassung .....	223
Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	224
<b>11. Bewegung geladener Teilchen in statischen Feldern .....</b>	<b>225</b>
11.1 Homogenes elektrisches Feld .....	225
11.2 Elektrostatische Linsen .....	229
11.3 Homogenes magnetisches Feld .....	231
11.4 Inhomogenes Magnetfeld (Magnetischer Spiegel) .....	235
Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	238
<b>12. Zeitlich langsam veränderliche Felder .....</b>	<b>239</b>
12.1 Induktionsgesetz .....	240
12.1.1 Transformator-EMK .....	243
12.1.2 Bewegungs-EMK .....	245
12.1.3 Lokale Formulierung (differentielle Form) .....	247
12.1.4 Bemerkungen .....	247
12.2 Grundlegende Gleichungen .....	250
12.3 Herleitung der magnetischen Energie (Hystereseverluste) ...	252
12.4 Diffusion magnetischer Felder durch dünnwandige Leiter ...	255
12.4.1 Zylinder parallel zum Magnetfeld .....	255
12.4.2 Zylinder senkrecht zum Magnetfeld .....	257
12.5 Separation der Diffusionsgleichung .....	259
12.5.1 Kartesische Koordinaten .....	260
12.5.2 Zylinderkoordinaten .....	263
12.6 Komplexe Zeiger (Phasoren) .....	266
12.7 Skineffekt .....	267
12.8 Numerische Lösung des Skineffektes im Rechteckleiter .....	270
12.9 Abschirmung .....	273
12.9.1 Dünnwandiger Kreiszyylinder .....	273
12.9.2 Dicks Blech .....	274
12.10 Wirbelströme (Induktives Heizen. Levitation. Linearmotor) .	276
12.11 Induktivität (Ergänzung) .....	281
Zusammenfassung .....	283
Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	285

<b>13. Zeitlich beliebig veränderliche Felder I (Erhaltungssätze)</b>	<b>286</b>
13.1 Ladungserhaltung	286
13.2 Energieerhaltung. Poynting'scher Satz	287
13.3 Komplexer Poynting'scher Satz	288
13.4 Impulserhaltung. Maxwell'scher Spannungstensor	292
13.5 Feldbegriff (Anmerkungen)	295
Zusammenfassung	297
Fragen zur Prüfung des Verständnisses	298
<b>14. Zeitlich beliebig veränderliche Felder II (Homogene Wellengleichung)</b>	<b>299</b>
14.1 Homogene Wellengleichung	299
14.2 Ebene Wellen	303
14.2.1 Feldpuls	305
14.2.2 Zeitharmonische Welle	306
14.2.3 Energie. Impuls	310
14.2.4 Polarisierung des Feldes	311
14.2.5 Doppler-Effekt	312
14.3 Rand- und Stetigkeitsbedingungen	313
14.4 Reflexion und Brechung ebener Wellen	314
14.4.1 Verschwinden der Reflexion. Totalreflexion	319
14.4.2 Dielektrische Platte als Wellenleiter	321
14.4.3 Reflexion am metallischen Halbraum. Skineffekt	324
14.4.4 Reflexion am ideal leitenden Halbraum. Parallelplattenleitung	325
14.5 Separation der Helmholtz-Gleichung	329
14.5.1 Kartesische Koordinaten (Rechteckhohlleiter. Rechteckhohlraumresonator)	330
14.5.2 Zylinderkoordinaten (Koaxialkabel. Rundhohlleiter. Dielektrischer Rundstab)	337
14.5.3 Kugelkoordinaten (Kugelresonator)	344
14.6 Numerische Berechnung der Felder auf der Parallelplattenleitung	349
Zusammenfassung	353
Fragen zur Prüfung des Verständnisses	355
<b>15. Zeitlich beliebig veränderliche Felder III (TEM-Wellenleiter)</b>	<b>357</b>
15.1 TEM-Wellen	358
15.2 Verlustbehaftete Leitungen	362
15.3 Zeitharmonische Vorgänge	364
15.4 Eingangsimpedanz. Reflexionsfaktor	367
15.5 Verlustlose Leitungen als Schaltungselement	368
15.6 Smith-Diagramm	371
15.7 Einschwingvorgänge auf verlustfreien Leitungen	376

Zusammenfassung .....	381
Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	382
<b>16. Zeitlich beliebig veränderliche Felder IV (Inhomogene Wellengleichung. Strahlung) .....</b>	<b>383</b>
16.1 Inhomogene Wellengleichung. Retardierte Potentiale .....	384
16.2 Elektrischer Dipolstrahler .....	387
16.3 Hertz'scher Dipol .....	390
16.4 Magnetischer Dipolstrahler .....	393
16.5 Dünne Drahtantenne. $\lambda/2$ -Antenne .....	396
16.6 Feld einer beliebig bewegten Punktladung .....	398
16.6.1 Liénard-Wiechert Potentiale .....	398
16.6.2 Herleitung der Felder .....	401
16.6.3 Gleichförmig bewegte Punktladung .....	405
16.6.4 Schwingende Ladung (Hertz'scher Dipol) .....	406
16.6.5 Strahlung bei nicht-relativistischer Geschwindigkeit. Strahlungsdämpfung. Thomson-Streuquerschnitt .....	407
16.6.6 Synchrotronstrahlung. Freier-Elektronen-Laser .....	410
Zusammenfassung .....	421
Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	421
<b>17. Streuung und Beugung von Wellen .....</b>	<b>423</b>
17.1 Fernfeldnäherung der Streuung .....	424
17.1.1 Streuquerschnitt und Streuamplitude .....	424
17.1.2 Integraldarstellung der Streuamplituden .....	425
17.1.3 Streuung an einer dielektrischen Kugel. Rayleigh-Streuung .....	427
17.1.4 Streuung an leitenden Körpern .....	428
17.1.5 Physikalische-Optik-Näherung .....	429
17.2 Streuung am leitenden Zylinder mittels Modenzerlegung .....	431
17.2.1 Entwicklung ebener Wellen nach Zylinderwellen .....	431
17.2.2 Elektrisches Feld parallel zur Zylinderachse .....	433
17.2.3 Elektrisches Feld senkrecht zur Zylinderachse .....	436
17.3 Green'sche Funktion im freien Raum .....	438
17.4 Skalare Beugungstheorie. Huygens'sches Prinzip .....	442
17.4.1 Helmholtz-Kirchhoff-Integral .....	443
17.4.2 Kirchhoff'sche Theorie der Beugung .....	445
17.4.3 Fraunhofer-Beugung an einer kreisförmigen Apertur ..	447
17.4.4 Babinet's Prinzip .....	449
17.4.5 Fresnel-Beugung an einer scharfen Kante .....	450
Zusammenfassung .....	454
Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	455

<b>18. Lineare, dispersive Medien</b> .....	456
18.1 Linearität. Kausalität .....	457
18.2 Kramers-Kronig-Relationen .....	458
18.3 Lorentz-Drude-Resonatormodell .....	461
18.3.1 Dielektrika .....	464
18.3.2 Leiter. Plasmen .....	466
18.3.3 Ideale Leiter. Supraleiter .....	468
18.4 Ebene Wellen in dispersiven Medien .....	470
Zusammenfassung .....	473
Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	474
<b>19. Anisotrope Medien</b> .....	475
19.1 Verlustfreie Dielektrika .....	476
19.1.1 Ausbreitung ebener Wellen .....	478
19.1.2 Optische Achsen .....	481
19.1.3 Uniachbiale Kristalle .....	483
19.1.4 Brechung am uniachsialen Halbraum .....	485
19.2 Stationäres Plasma im Magnetfeld .....	487
19.3 Faraday-Drehung .....	491
19.4 Gesättigte Ferrite .....	492
19.5 Einige Mikrowellenkomponenten mit Ferriten .....	495
Zusammenfassung .....	499
Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	500
<b>20. Spezielle Relativitätstheorie</b> .....	502
20.1 Michelson-Morley-Experiment. Lorentz-Transformation .....	503
20.2 Lorentz-Transformation als Orthogonaltransformation .....	508
20.3 Geschwindigkeit. Impuls. Kraft .....	512
20.4 Elektromagnetische Vierervektoren .....	515
20.5 Transformation elektromagnetischer Felder .....	518
20.6 Feld einer gleichförmig bewegten Punktladung .....	520
20.7 Ebene Welle. Doppler-Effekt. Lichtaberration .....	522
20.8 Magnetismus als relativistisches Phänomen .....	524
Zusammenfassung .....	528
Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	529
<b>21. Numerische Simulation (Einführung)</b> .....	531
21.1 Momentenmethode .....	532
21.2 Finite-Elemente-Methode .....	534
21.2.1 Funktionale. Variation von Funktionalen .....	535
21.2.2 Finite Elemente in einer Dimension .....	538
21.2.3 Finite Elemente in zwei Dimensionen .....	540
21.2.4 Allgemeine Bemerkungen .....	544
21.3 Finite-Differenzen-Methode. Zeitbereich .....	545

21.3.1 Eindimensionale Wellengleichung. Stabilität. Genauigkeit. Gitterdispersion .....	546
21.3.2 Diskretisierung der Maxwell'schen Gleichungen .....	550
Fragen zur Prüfung des Verständnisses .....	554
<b>Animationen im Internet .....</b>	<b>555</b>
<b>Übersicht über Symbole und Einheiten .....</b>	<b>556</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>558</b>
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>561</b>