

Peter Schmüser

Theoretische Physik für Studierende des Lehramts 2

Elektrodynamik und
Spezielle Relativitätstheorie

 Springer Spektrum

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen von Elektrizität und Magnetismus	1
1.1	Elektrische Kräfte	1
1.2	Die elektrische Ladung	3
1.3	Das elektrische Feld	5
1.4	Magnetische Felder und Kräfte	7
1.4.1	Permanentmagnete und Elektromagnete	7
1.4.2	Es gibt keine magnetischen Monopole	8
1.4.3	Die Lorentz-Kraft	9
1.5	Elektrische Felder in Materie	11
1.5.1	Dielektrische Materialien	11
1.5.2	Energiedichte des elektrischen Feldes	14
1.6	Magnetische Felder in Materie	14
1.6.1	Magnetische Materialien	14
1.6.2	Energiedichte des magnetischen Feldes	17
1.7	Die Rolle der Felder E , D sowie H , B	18
1.8	Elektrische Leitung in Metallen	20
1.8.1	Das Ohm'sche Gesetz	20
1.8.2	Wechselstrom, Impedanz, Leistung	21
1.9	Beispiele und didaktische Anmerkungen	23
1.9.1	Vergleich elektrischer und mechanischer Größen	23
1.9.2	Feldberechnungen für Spulen und Elektromagnete	25
2	Zeitlich konstante elektrische und magnetische Felder	31
2.1	Elektrisches Feld und elektrisches Potential	31
2.1.1	Das Konzept des elektrischen Feldes	31
2.1.2	Das Superpositionsprinzip	33
2.1.3	Elektrostatische Kräfte sind konservativ	33
2.1.4	Das elektrische Potential	37
2.1.5	Äquipotentialflächen und Gradient	39

2.2	Integralsatz von Gauß, Divergenz eines Vektorfeldes	41
2.2.1	Gauß-Satz für elektrische und magnetische Felder	41
2.2.2	Beweis des Gauß'schen Satzes	43
2.2.3	Divergenz des elektrischen (magnetischen) Feldes	45
2.3	Anwendungen des Satzes von Gauß	46
2.3.1	Kugelsymmetrie	46
2.3.2	Zylindersymmetrie	50
2.3.3	Flächensymmetrie	53
2.4	Satz von Stokes, Rotation eines Vektorfeldes	53
2.5	Anwendungen des Satzes von Stokes	56
2.6	Vektorpotential, Poisson-Gleichung	58
2.6.1	Das magnetische Vektorpotential	58
2.6.2	Poisson-Gleichung und Biot-Savart-Gesetz	59
2.7	Randbedingungen an Grenzflächen	62
2.7.1	Elektrische Felder	62
2.7.2	Magnetische Felder	63
2.8	Weitere Beispiele und didaktische Anmerkungen	64
2.8.1	Genügt das Feld einer Punktladung exakt einem $1/r^2$ -Gesetz?	64
2.8.2	Die elektrostatische Selbstenergie des Elektrons	65
3	Die Maxwell'schen Gleichungen	73
3.1	Das Induktionsgesetz	73
3.1.1	Die Lenz'sche Regel	74
3.1.2	Zeitlich veränderliche Leiterschleifen: Induktion als Folge der Lorentz-Kraft	75
3.2	Kontinuitätsgleichung und Verschiebungsstrom	77
3.3	Darstellung der Felder durch Potentiale	80
3.4	Das Vektorpotential in der Quantentheorie	81
3.5	Die Gleichungen der Elektrodynamik	84
3.6	Ergänzungen und didaktische Anmerkungen	85
3.6.1	Induktionskochplatten und Wirbelstrombremsen	85
3.6.2	„Optische Täuschungen“ in der Elektrodynamik	85
4	Elektromagnetische Wellen im Vakuum	91
4.1	Herleitung der eindimensionalen Wellengleichung	91
4.2	Die dreidimensionale Wellengleichung	94
4.2.1	Ebene Wellen	95
4.2.2	Kugelwellen	96
4.3	Energietransport in einer Welle, Poyntingvektor	98
4.4	Strahlung eines oszillierenden elektrischen Dipols	100
4.5	Interferenz und Beugung	104
4.5.1	Interferenzen am Doppelspalt	106
4.5.2	Beugung am Einzelspalt	107

4.6	Didaktische Anmerkungen und Ergänzungen	109
4.6.1	Das Konzept des Äthers	109
4.6.2	Messung von Lichtwellenlängen mit einem Gitter	110
4.6.3	Auflösungsvermögen optischer Instrumente	112
5	Elektromagnetische Wellen in Materie, Hohlleitern und Kabeln	119
5.1	Elektromagnetische Wellen in Materie	119
5.1.1	Homogene Medien	119
5.1.2	Reflexion und Brechung an Grenzflächen	120
5.2	Elektromagnetische Wellen in Hohlleitern	123
5.3	Wellen in Koaxialkabeln	126
5.4	Anwendungsbeispiele und didaktische Anmerkungen	128
5.4.1	Speisung einer Glühlampe durch ein Koaxialkabel	128
5.4.2	Wie kommt die elektrische Leistung in einen Widerstand?	130
5.4.3	Mikrowellen in Haushalt und Schule	131
6	Relativistische Mechanik	135
6.1	Einleitung	135
6.2	Inertialsysteme und Lorentz-Transformation	135
6.2.1	Galilei- und Lorentz-Transformation	136
6.2.2	Zeitdilatation, Längenkontraktion	138
6.2.3	Experimentelle Tests der Zeitdilatation	140
6.2.4	Transformation der Geschwindigkeit	142
6.3	Relativistische Masse, Impuls und Energie	144
6.3.1	Masse, Impuls und kinetische Energie	144
6.3.2	Lorentz-Transformation von Energie und Impuls	146
6.3.3	Der relativistische Doppler-Effekt	147
6.4	Das Konzept der Vierervektoren	148
6.4.1	Vierervektoren für Zeit-Raum und Energie-Impuls	148
6.4.2	Das Vierer-Skalarprodukt	149
6.5	Anwendungsbeispiele und didaktische Anmerkungen	150
6.5.1	Anmerkungen zur Einstein'schen Lichtuhr	150
6.5.2	Das Zwillingenparadoxon mit Menschen?	151
6.5.3	Relativitätstheorie und Teilchenbeschleuniger	152
6.5.4	Relativitätstheorie und Elementarteilchenphysik	155
7	Relativistische Elektrodynamik	163
7.1	Das Magnetfeld als relativistischer Effekt	163
7.2	Transformation des elektromagnetischen Feldes	165
7.2.1	Transformation der Felder \mathbf{E} und \mathbf{B}	166
7.2.2	Viererpotential und Viererstromdichte	167
7.2.3	Elektrisches Feld eines relativistischen Teilchens	168
7.3	Relativistische Strahlungsquellen	169
7.3.1	Synchrotronstrahlung	170
7.3.2	Undulatorstrahlung	171

7.4	Anwendungsbeispiel und didaktische Anmerkungen	173
7.4.1	Feld eines relativistischen Protonen-Pakets	173
7.4.2	Elektrische und magnetische Kräfte in unserer Umwelt	175
8	Ausblick: Quantenelektrodynamik	177
8.1	Die Klein-Gordon-Gleichung	177
8.2	Die Dirac-Gleichung	179
8.3	Spin und magnetisches Moment des Elektrons	182
8.4	Ergänzungen und didaktische Anmerkungen	185
8.4.1	Analogie zwischen Positronen und Löchern im Halbleiter	185
8.4.2	Das Konzept der Feynman-Graphen	186
8.4.3	Die komplexe Natur des physikalischen Vakuums	189
	Vektoranalysis	199
A.1	Vektoralgebra	199
A.1.1	Skalarprodukt und Vektorprodukt	200
A.1.2	Rotationsinvarianz des Skalarprodukts	202
A.2	Dreidimensionale Differentialrechnung	203
A.3	Integraltheoreme	205
A.3.1	Gradienten-Theorem	205
A.3.2	Berechnung der Potentialfunktion	206
A.3.3	Gauß-Theorem	207
A.3.4	Stokes-Theorem	209
A.4	Zweite Ableitungen	210
A.5	Kugel- und Zylinderkoordinaten	211
	Ergänzungen zur Elektrodynamik	215
B.1	Der Energiesatz in der Maxwell-Theorie	215
B.2	Strahlung eines elektrischen Dipols	217
	Ergänzungen zur Relativitätstheorie	221
C.1	Herleitung der Lorentz-Transformation	221
C.2	Gedankenexperiment zur relativistischen Masse	223
C.3	Zur Herleitung der Lorentz-Kraft	225
C.4	Der elektromagnetische Feldstärkentensor	226
C.5	Feld eines gleichförmig bewegten Teilchens	228
	Herleitung und Eigenschaften der Dirac-Gleichung	231
	SI-Einheiten und häufig benutzte Symbole	235
	Lösungen	239
	Literaturverzeichnis	253
	Sachverzeichnis	255