

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundlagen von Elektrizität und Magnetismus</b>	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
<b>2</b>	<b>Zeitlich konstante elektrische und magnetische Felder</b>	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

<b>2.2</b>	<b>Integralsatz von Gauß, Divergenz eines Vektorfeldes</b>	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
<b>2.3</b>	<b>Anwendungen des Satzes von Gauß</b>	46
2.3.1	Kugelsymmetrie	46
2.3.2	Zylindersymmetrie	50
2.3.3	Flächensymmetrie	53
<b>2.4</b>	<b>Satz von Stokes, Rotation eines Vektorfeldes</b>	53
<b>2.5</b>	<b>Anwendungen des Satzes von Stokes</b>	56
<b>2.6</b>	<b>Vektorpotential, Poisson-Gleichung</b>	58
2.6.1	Das magnetische Vektorpotential	58
2.6.2	Poisson-Gleichung und Biot-Savart-Gesetz	59
<b>2.7</b>	<b>Randbedingungen an Grenzflächen</b>	62
2.7.1	Elektrische Felder	62
2.7.2	Magnetische Felder	63
<b>2.8</b>	<b>Weitere Beispiele und didaktische Anmerkungen</b>	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
<b>3</b>	<b>Die Maxwell'schen Gleichungen</b>	73
<b>3.1</b>	<b>Das Induktionsgesetz</b>	73
3.1.1	Die Lenz'sche Regel	74
3.1.2	Zeitlich veränderliche Leiterschleifen: Induktion als Folge der Lorentz-Kraft	75
<b>3.2</b>	<b>Kontinuitätsgleichung und Verschiebungsstrom</b>	77
<b>3.3</b>	<b>Darstellung der Felder durch Potentiale</b>	80
<b>3.4</b>	<b>Das Vektorpotential in der Quantentheorie</b>	81
<b>3.5</b>	<b>Die Gleichungen der Elektrodynamik</b>	84
<b>3.6</b>	<b>Ergänzungen und didaktische Anmerkungen</b>	85
3.6.1	Induktionskochplatten und Wirbelstrombremsen	85
3.6.2	„Optische Täuschungen“ in der Elektrodynamik	85
<b>4</b>	<b>Elektromagnetische Wellen im Vakuum</b>	91
<b>4.1</b>	<b>Herleitung der eindimensionalen Wellengleichung</b>	91
<b>4.2</b>	<b>Die dreidimensionale Wellengleichung</b>	94
4.2.1	Ebene Wellen	95
4.2.2	Kugelwellen	96
<b>4.3</b>	<b>Energietransport in einer Welle, Poyntingvektor</b>	98
<b>4.4</b>	<b>Strahlung eines oszillierenden elektrischen Dipols</b>	100
<b>4.5</b>	<b>Interferenz und Beugung</b>	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	<b>Elektromagnetische Wellen in Materie, Hohlleitern und Kabeln</b> .....	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	<b>Relativistische Mechanik</b> .....	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 Zwillingsparadoxon mit Menschen? .....	151
6.5.3	Relativitätstheorie und Teilchenbeschleuniger .....	152
6.5.4	Relativitätstheorie und Elementarteilchenphysik .....	155
7	<b>Relativistische Elektrodynamik</b> .....	163
7.1	Das Magnetfeld als relativistischer Effekt .....	163
7.2	Transformation des elektromagnetischen Feldes .....	165
7.2.1	Transformation der Felder $E$ und $B$ .....	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	<b>Ausblick: Quantenelektrodynamik</b> .....	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
	<b>Vektoranalysis</b> .....	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
	<b>Ergänzungen zur Elektrodynamik</b> .....	215
B.1	Der Energiesatz in der Maxwell-Theorie .....	215
B.2	Strahlung eines elektrischen Dipols .....	217
	<b>Ergänzungen zur Relativitätstheorie</b> .....	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
	<b>Herleitung und Eigenschaften der Dirac-Gleichung</b> .....	231
	<b>SI-Einheiten und häufig benutzte Symbole</b> .....	235
	<b>Lösungen</b> .....	239
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	253
	<b>Sachverzeichnis</b> .....	255