

Inhaltsverzeichnis

1	Elementare Begriffe elektrischer und magnetischer Felder	1
1.1	Feldstärke, Fluss und Flussdichte von Vektorfeldern	4
1.1.1	Elektrisches Vektorfeld $\mathbf{E}$	4
1.1.1.1	Elektrische Feldstärke, elektrischer Fluss	4
1.1.1.2	Elektrische Flussdichte, Verschiebungsdichte	7
1.1.2	Magnetisches Vektorfeld $\mathbf{H}$	11
1.1.3	Elektrisches Strömungsfeld $\mathbf{J}$	13
1.2	Materialgleichungen	14
1.3	Grenzflächenverhalten von Vektorfeldern	14
2	Arten von Vektorfeldern	21
2.1	Elektrische Quellenfelder	21
2.2	Elektrische und magnetische Wirbelfelder	25
2.3	Allgemeine Vektorfelder	26
3	Feldtheorie-Gleichungen	29
3.1	Maxwell-Gleichungen in Integralform	30
3.1.1	Induktionsgesetz in Integralform (Faradaysches Gesetz) <i>Wirbelstärke</i> elektrischer Wirbelfelder	31
3.1.2	Durchflutungsgesetz in Integralform (Ampèresches Gesetz) <i>Wirbelstärke</i> magnetischer Wirbelfelder	34
3.1.3	Gaußsches Gesetz des elektrischen Felds <i>Quellenstärke</i> elektrischer Felder	40
3.1.4	Gaußsches Gesetz des magnetischen Felds <i>Quellenstärke</i> magnetischer Felder	41
3.2	Kontinuitätsgesetz in Integralform <i>Quellenstärke</i> elektrischer Strömung	42

3.3	Maxwell-Gleichungen in Differentialform	47
3.3.1	Induktionsgesetz in Differentialform <i>Wirbeldichte</i> elektrischer Wirbelfelder	48
3.3.2	Durchflutungsgesetz in Differentialform <i>Wirbeldichte</i> magnetischer Wirbelfelder	51
3.3.3	Divergenz des elektrischen Felds <i>Quellendichte</i> elektrischer Felder	53
3.3.4	Divergenz des magnetischen Felds <i>Quellendichte</i> magnetischer Felder	55
3.4	Kontinuitätsgesetz in Differentialform <i>Quellendichte</i> elektrischer Strömung	56
3.5	Analyse von Vektorfeldern bezüglich ihrer Wirbel- und Quellennatur	54
3.6	Die Maxwell-Gleichungen in komplexer Schreibweise	58
3.7	Integralsätze von Stokes und Gauß	59
3.8	Ergänzende Betrachtungen zum Induktionsgesetz	65
3.8.1	Bewegungsinduktion	67
3.8.2	Beispiel zur Umlaufspannung	67
3.8.3	Netzwerkmodell des Induktionsvorgangs	68
4	Potentialfunktion, Gradient, Potentialgleichung,	73
4.1	Potentialfunktion und Potential eines elektrostatischen Felds	76
4.2	Ermittlung der Potentialfunktion ausgewählter Ladungsverteilungen	81
4.2.1	Potentialfunktion einer Punktladung außerhalb des Ursprungs	81
4.2.2	Potentialfunktion einer Linienladung	83
4.2.3	Potentialfunktion einer allgemeinen Ladungskonfiguration	85
4.3	Gradient eines Potentialfelds	87
4.4	Potentialgleichungen	92
4.4.1	Potentialgleichungen für raumladungsfreie Felder	92
4.4.2	Potentialgleichung für raumladungsbehaftete Felder	95
4.4.3	Integraloperator Δ^{-1}	98
4.5	Elektrisches Vektorpotential	104
4.6	Vektorpotential des Strömungsfelds	106
5	Potential und Potentialfunktion magnetischer Felder	109
5.1	Magnetisches Skalarpotential φ_m	109

5.2	Potentialgleichung des magnetischen Skalarpotentials	114
5.3	Magnetisches Vektorpotential $\mathbf{A}$	115
5.4	Potentialgleichung des magnetischen Vektorpotentials	121
6	Einteilung elektrischer und magnetischer Felder	125
6.1	Stationäre Felder	129
6.1.1	Elektrostatische Felder	129
6.1.2	Magnetostatische Felder	130
6.1.3	Statisches Strömungsfeld (Gleichstrom-Strömungsfeld)	131
6.2	Quasistationäre Felder	135
6.2.1	Quasistatische elektrische Felder	135
6.2.2	Quasistatische magnetische Felder	137
6.2.3	Quasistatische Strömungsfelder	139
6.2.4	Strömungsfelder mit Stromverdrängung	139
6.3	Nichtstationäre Felder – Elektromagnetische Wellen	145
6.3.1	Natur der Wellenausbreitung	137
6.3.2	Wellengleichung im Fernfeld	149
6.3.3	Wellengleichung für vorgegebene Anregungen $\mathbf{J}(\mathbf{r},t)$ und $\rho(\mathbf{r},t)$	152
6.3.3.1	Retardierte Potentiale	152
6.3.3.2	Wellengleichungen für die retardierten Potentiale in der Lorentz-Eichung	153
6.3.3.3	Wellengleichungen für die retardierten Potentiale ohne Lorentz-Eichung	159
6.3.3.4	Herleitung der Potentialgleichung mit Hilfe des inversen Operators $\text{rot}^{-1} = -\text{rot } \Delta^{-1}$	163
6.3.3.5	Abschließende Bemerkungen	165
6.3.4	Hertzsche Potentiale	168
6.3.5	<i>Energiedichte</i> elektrischer und magnetischer Felder <i>Energieflussdichte</i> elektromagnetischer Wellen	170
7	Integraloperatoren div^{-1}, rot^{-1}, grad^{-1}	173
7.1	Integraloperator div^{-1}	175
7.2	Integraloperator rot^{-1}	178
7.3	Integraloperator grad^{-1}	180
7.4	Berechnung eines allgemeinen Vektorfelds $\mathbf{E}(\mathbf{r})$	180
7.5	Rechnen mit Operatoren	182
8	Spannungs- und Stromgleichungen langer Leitungen	185

9 Typische Differentialgleichungen der Elektrodynamik bzw. der mathematischen Physik	197
9.1 Verallgemeinerte Telegraphengleichung	197
9.2 Telegraphengleichung mit $a, b > 0$; $c = 0$	198
9.3 Telegraphengleichung mit $a > 0$; $b = 0$; $c = 0$	199
9.4 Telegraphengleichung mit $b > 0$; $a = 0$; $c = 0$	201
9.5 Helmholtz-Gleichung	202
9.6 Schrödinger-Gleichung	206
9.7 Lorentz-Invarianz der Maxwell-Gleichungen	208
10 Numerische Feldberechnung	217
10.1 Finite-Elemente-Methode	218
10.2 Differenzenverfahren	233
10.3 Ersatzladungsverfahren	238
10.4 Boundary-Element-Methode	241
10.5 Momenten-Methode	243
10.6 Monte-Carlo-Methode	248
10.7 Allgemeine Bemerkungen zur numerischen Feldberechnung	250
Anhang	253
A1 Einheiten der verwendeten Größen	253
A2 Skalar- und Vektorintegrale	255
A3 Vektoroperationen in speziellen Koordinatensystemen	256
A4 Die inversen Operatoren rot^{-1} , div^{-1} und grad^{-1}	261
A5 Komplexe Darstellung sinusförmiger Größen	269
Aufgabenteil	273
1 Elementare Begriffe elektrischer und magnetischer Felder	275
1.1 Skalarfelder	275
1.2 Vektorfelder	276
1.3 Fluss als Oberbegriff	278
1.4 Geschichtete Dielektrika	281
2 Arten von Vektorfeldern	287
2.1 Gradienten-, Quellen- und Wirbelfelder	287
3 Feldtheorie-Gleichungen	289
3.1 Induktionsgesetz	289
3.2 Induktionsspannung	291

3.3	Wirbelfelder	293
3.4	Durchflutungsgesetz; Induktivität	294
3.5	Durchflutungsgesetz; Feldstärkeverlauf	297
3.6	Magnetische Umlaufspannung	299
3.7	Magnetischer Fluss	300
3.8	Magnetischer Kreis	302
3.9	Satz vom Hüllenfluss: Kapazität	304
3.10	Satz vom Hüllenfluss: Feldstärke und Potential	305
3.11	Induktionsgesetz in Differentialform Divergenz des elektrischen Felds	307
3.12	Integral- und Differentialform des Gaußschen Gesetzes	308
3.13	Wirbeldichte des magnetischen Felds	309
3.14	Integralsatz von Gauß	311
4	Gradient, Potential, Potentialfunktion	313
4.1	Potentialverteilung im Dielektrikum einer Koaxialleitung	313
4.2	Elektrisches Potential und elektrische Feldstärke	318
5	Potential und Potentialfunktion magnetostatischer Felder	323
5.1	Magnetfeld eines gleichstromdurchflossenen Leiters	323
5.2	Magnetfeld einer Zweidrahtleitung	328
5.3	Feldgrößen einer Koaxialleitung	329
6	Berechnung von Feldern aus ihren Quellen- und Wirbeldichten	337
6.1	Quellenfeld	337
6.2	Wirbelfeld	339
7	Einteilung elektrischer und magnetischer Felder	341
7.1	Stationäre Felder: Gleichstromfeld	341
7.2	Quasistationäre Felder: Stromverdrängung	343
7.3	Stromverdrängung im Rundleiter	348
7.4	Die schirmende Wirkung von Wirbelströmen	349
7.5	Elektromagnetische Wellenfelder	355
7.6	Helmholtz-Gleichung	356
	Literaturverzeichnis	363
	Sachverzeichnis	369