

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Elektromagnetische Feldtheorie</b>	<b>1</b>
1.1	Grundlagen der Feldberechnung . . . . .	1
1.2	Ladungen, Ströme . . . . .	4
1.3	Kapazität, Energie . . . . .	6
1.4	Elektrische Feldstärke . . . . .	8
1.5	Elektrische Verschiebungsdichte . . . . .	9
1.6	Gaußscher Satz der Elektrostatik . . . . .	11
1.7	Elektrisches Strömungsfeld . . . . .	11
1.8	Coulombsches Gesetz . . . . .	11
1.9	Divergenz und Rotation . . . . .	12
1.10	Maxwell-Gleichungen . . . . .	15
1.11	Klassifizierung der Felder . . . . .	20
1.12	Skalares Potential . . . . .	21
1.13	Laplace-Gleichung . . . . .	22
1.14	Poisson-Gleichung . . . . .	24
1.15	Lösungen der Laplace-Gleichung . . . . .	26
<b>2</b>	<b>Eigenschaften von Isolierstoffen</b>	<b>27</b>
2.1	Permittivität . . . . .	28
2.2	Leitfähigkeit . . . . .	30
2.3	Elektrische Festigkeit . . . . .	30
2.4	Dielektrische Grenzflächen . . . . .	32
2.5	Einfluss von Raumladungen . . . . .	44
2.6	Gleichspannungsbelastung . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Mathematische Methoden der Feldberechnung</b>	<b>49</b>
3.1	Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger . . . . .	50
3.2	Graphische Verfahren . . . . .	55

3.3	Konforme Abbildung . . . . .	57
3.4	Koordinatentransformation . . . . .	71
<b>4</b>	<b>Numerische Berechnung von Hochspannungsfeldern</b>	<b>83</b>
4.1	Differenzenverfahren . . . . .	86
4.1.1	Prinzip . . . . .	86
4.1.2	Zweidimensionale Felder . . . . .	87
4.1.3	Lösungsverfahren . . . . .	93
4.1.4	Dielektrische Grenzschichten . . . . .	100
4.1.5	3D-Felder mit Rotationssymmetrie . . . . .	101
4.2	Finite-Elemente-Verfahren . . . . .	106
4.2.1	Prinzip . . . . .	106
4.2.2	Zweidimensionale Felder . . . . .	111
4.2.3	3D-Felder mit Rotationssymmetrie . . . . .	125
4.2.4	3D-Felder ohne Symmetrie . . . . .	126
4.2.5	Anwendungsprogramme . . . . .	128
4.3	Ersatzladungsverfahren . . . . .	129
4.3.1	Prinzip . . . . .	130
4.3.2	Zweidimensionale Felder . . . . .	137
4.3.3	3D-Felder mit Rotationssymmetrie . . . . .	138
4.3.4	3D-Felder ohne Symmetrie . . . . .	141
4.3.5	Berücksichtigung von Raumladungen . . . . .	149
4.3.6	Anordnungen mit mehreren Dielektrika . . . . .	151
4.3.7	Bereichsorientiertes Ersatzladungsverfahren . . . . .	153
4.3.8	Überprüfung der Genauigkeit . . . . .	162
4.3.9	Anwendungsprogramme . . . . .	166
4.4	Flächenladungsverfahren . . . . .	167
4.4.1	Prinzip . . . . .	167
4.4.2	Teilflächenmethode . . . . .	168
4.4.3	Bestimmung des Potentials von Flächenladungen mit Hilfe numerischer Integration . . . . .	172
4.5	Boundary-Elemente-Verfahren . . . . .	176
4.5.1	Prinzip . . . . .	176
4.5.2	Numerische Integration über ein Boundary- Element . . . . .	181

---

4.5.3	Ladungsdichteverteilung und Formfunktion . . . . .	182
4.5.4	Berücksichtigung von Volumen- und Oberflächenleitfähigkeit bei Isolierstoffen . . . . .	184
4.5.5	Anwendungsprogramme . . . . .	188
4.6	Finite-Integrations-Theorie . . . . .	189
4.6.1	Prinzip . . . . .	189
4.6.2	Anwendungsprogramm . . . . .	193
4.7	Monte-Carlo-Verfahren . . . . .	194
4.7.1	Prinzip . . . . .	194
4.7.2	Fixed-Random-Walk Methode . . . . .	195
4.7.3	Floating-Random-Walk Methode . . . . .	197
4.7.4	Bessere Effizienz mit Hilfe der Greenschen Funktion . . . . .	199
4.7.5	Berechnung von Randfeldstärken . . . . .	201
4.7.6	Berücksichtigung geschichteter Dielektrika . . . . .	202
4.7.7	Anwendungsbeispiel . . . . .	203
4.8	Vergleich der Verfahren . . . . .	204
<b>5</b>	<b>Optimierung von Hochspannungsanlagen</b>	<b>207</b>
5.1	Aufgabenstellung . . . . .	207
5.2	Mathematische Optimierung . . . . .	209
5.2.1	Koaxiales Zylinderfeld . . . . .	209
5.2.2	Formeln von Spielrein . . . . .	210
5.2.3	Rogowski-Profil . . . . .	211
5.2.4	Borda-Profil . . . . .	212
5.3	Rechnergestützte Optimierung . . . . .	213
5.3.1	Verfahren nach Singer und Grafoner . . . . .	213
5.3.2	Weitere Untersuchungen . . . . .	215
5.4	Automatische Optimierung von 3D-Anordnungen . . . . .	217
5.4.1	Parametrisches Modell . . . . .	218
5.4.2	Mathematische Optimierungsalgorithmen . . . . .	219
5.4.3	Anwendungsbeispiele . . . . .	222
<b>6</b>	<b>Moderne Rechnerarchitektur für die Feldberechnung</b>	<b>229</b>
6.1	Modularer Feldberechnungsprozess . . . . .	229

6.2	Strategien zur Beschleunigung der Feldberechnung . . . . .	232
6.2.1	Einsatz von effizienten Matrixsolvern . . . . .	232
6.2.2	Vermeidung redundanter Berechnungen . . . . .	233
6.2.3	Parallelisierung der Lösungsverfahren . . . . .	234
6.3	Gridsystem für die Feldberechnung . . . . .	241
<b>Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger</b>		<b>249</b>
<b>Analytische Berechnungsbeispiele</b>		<b>259</b>
<b>Koordinatensysteme</b>		<b>263</b>
1	Rechtwinklige Koordinaten $x, y, z$ . . . . .	264
2	Kreiszyylinder-Koordinaten $r, \psi, z$ . . . . .	267
3	Ellipsenzylinder-Koordinaten $\eta, \psi, z$ . . . . .	271
4	Parabolzylinder-Koordinaten $\mu, \nu, z$ . . . . .	274
5	Kugelkoordinaten $r, \theta, \psi$ . . . . .	277
6	Gestreckte Ellipsoid-Koordinaten $\eta, \Theta, \psi$ . . . . .	280
7	Abgeplattete Ellipsoid-Koordinaten $\eta, \Theta, \psi$ . . . . .	283
8	Paraboloid-Koordinaten $\mu, \nu, \psi$ . . . . .	286
9	Bisphärische-Koordinaten $\eta, \Theta, \psi$ . . . . .	289
10	Toroid-Koordinaten $\eta, \Theta, \psi$ . . . . .	292