

Karl Küpfmüller · Wolfgang Mathis
Albrecht Reibiger

Theoretische Elektrotechnik

Eine Einführung

17., bearbeitete Auflage

Mit 372 Abbildungen

 Springer

Inhaltsverzeichnis

Teil I Was ist Theoretische Elektrotechnik?

1	Die elektrotechnischen Disziplinen	3
2	Systemtheoretische Grundlagen	9
3	Grundlegende Aspekte physikalischer Systeme	15
3.1	Verteilte physikalische Systeme	15
3.2	Mechanik und Energie-Impuls-Transporte	17

Teil II Theorie elektrischer Netzwerke

4	Grundgleichungen und Analysemethoden elektrischer Netzwerke	23
4.1	Netzwerkmodellierung und Widerstandsnetzwerke	23
4.2	Einschwingvorgänge in elektrischen Netzwerken	35
4.3	Die Wechselstromrechnung	38
4.4	Darstellungen von Übertragungsfunktionen	44
4.5	Zweitore und Vierpole	51
5	Beispiele für elektrische Netzwerke	60
5.1	Netzwerke aus Kapazitäten und Widerständen	60
5.1.1	Der zeitliche Auf- und Abbau eines elektrischen Feldes .	60
5.1.2	Wechselstromkreis mit Kapazität	65
5.2	Netzwerke aus Induktivitäten und Widerständen	70
5.2.1	Der Aufbau eines magnetischen Feldes	70
5.2.2	Wechselstromkreis mit Induktivität	73
5.3	Dreiphasennetzwerke	78
5.4	Der Gyrator	84

Teil III Das elektrostatische Feld

6	Die Grundgleichungen des elektrostatischen Feldes	91
7	Elementare Betrachtungen zur Elektrostatik	97
8	Materialgesetze in der Elektrostatik	105
9	Influenzwirkungen	112
10	Einfache Beispiele für elektrostatische Felder	115
10.1	Das elektrische Feld von Punktladungen	116
10.1.1	Die homogen geladene Kugel und die Punktladung	116
10.1.2	Endlich viele Punktladungen	117
10.1.3	Das Potenzial zweier Punktladungen	118
10.1.4	Der elektrische Dipol	120
10.1.5	Das elektrische Feld zweier Kugeln	123
10.1.6	Endlich ausgedehnte Linienladungen	125
10.2	Ebene elektrostatische Felder	127
10.2.1	Unendlich lange Linienleiter	127
10.2.2	Koaxialkabel, Zylinderkondensator	129
10.2.3	Zweidrahtleitung, parallele Zylinder	133
10.2.4	Zylinder und Platte	138
10.2.5	Linien-dipol	139
10.2.6	Erdseil	141
11	Lösungsverfahren der Poisson- und Laplace-Gleichung	144
11.1	Grundlagen	144
11.1.1	Poisson- und Laplace-Gleichung und ihre Lösungsmengen	145
11.1.2	Rand- und Grenzbedingungen, Eindeutigkeit des Potenzials	147
11.2	Elementare Methoden	148
11.2.1	Die graphische Methode	148
11.2.2	Eindimensionale Potenzialprobleme	151
11.2.3	Überlagerung von Punktladungen	152
11.3	Das Kirchhoff-Integral	153
11.4	Die Greensche und Neumannsche Funktionen	154
11.5	Die Multipolmethode	155
11.6	Die Spiegelungsmethode	157
11.7	Konforme Abbildungen	159
11.8	Die Separationsmethode	174
11.9	Bemerkungen zu numerischen Verfahren	175

12	Kapazitätskoeffizienten	178
12.1	Der elementare Kapazitätsbegriff	178
12.2	Graphische Berechnung von Kapazitätskoeffizienten	180
12.3	Kapazität einfacher Anordnungen	181
12.4	Parallel- und Reihenschaltung von Kapazitäten	190
12.5	Kapazitäten in Mehrleitersystemen	191
12.5.1	Maxwellsche Kapazitätskoeffizienten	191
12.5.2	Definition und Messung von Teilkapazitäten	192
12.5.3	Form des elektrischen Feldes	195
12.5.4	Berechnung von Teilkapazitäten	196
13	Energie in der Elektrostatik	206
14	Mechanische Kräfte in der Elektrostatik	210
14.1	Kräfte an Leiteroberflächen	210
14.2	Mechanische Spannungen im elektrischen Feld	212
14.3	Kräfte an Grenzflächen zwischen Nichtleitern	214
14.4	Berechnung der Feldkräfte aus der Kapazität	216
14.5	Einwirkung elektrischer Felder auf Elektronenbahnen: Elektronenoptik (<i>Internet-Download</i>)	219

Teil IV Das elektrische Strömungsfeld

15	Grundgleichungen des elektrischen Strömungsfeldes	223
16	Elementare Betrachtungen zum elektrischen Strömungsfeld	228
16.1	Experimentelle Betrachtungen	228
16.2	Das stationäre Strömungsfeld und Widerstandsnetzwerke	232
16.3	Zusammenhang zwischen Kapazität und Widerstand	238
17	Beispiele von elektrischen Strömungsfeldern	242
17.1	Punktquelle	242
17.2	Spiegelung	250
17.3	Linienquelle	252

Teil V Das stationäre Magnetfeld

18	Grundgleichungen des stationären Magnetfeldes	261
19	Elementare Betrachtungen zum stationären Magnetfeld	268
19.1	Magnetische Kraftwirkungen und das B-Feldes	268
19.2	Beispiele für magnetische Kraftwirkungen	273
19.3	Das Durchflutungsgesetz	277
19.4	Der magnetische Dipol	281

20	Materialgesetze im stationären Magnetfeld	283
20.1	Diamagnetismus und Paramagnetismus	283
20.2	Messung der Permeabilität	286
20.3	Ferromagnetismus	287
20.4	Magnetische Werkstoffe	295
20.5	Magnetische Anisotropie	298
21	Lösungsverfahren für die Vektorpoisson-Gleichung	301
21.1	Grundlagen	301
21.2	Das vektorielle Kirchhoff-Integral	303
21.2.1	Kirchhoff-Integral für Stromdichteverteilungen	303
21.2.2	Kirchhoff-Integral für Stromfäden	304
21.3	Das Biot-Savart-Integral	308
21.4	Die Multipolmethode	311
21.5	Das skalare magnetische Potenzial und konforme Abbildungen	312
22	Beispiele für stationäre Magnetfelder	321
22.1	Anwendung der Laplaceschen Formel	321
22.2	Anwendung des magnetischen Potenzials	323
22.3	Der magnetische Kreis: Elektro- und Dauermagnete	327
22.3.1	Grundgleichungen des magnetischen Kreises	327
22.3.2	Angenäherte Berechnung von Elektromagneten	329
22.3.3	Scherung	334
22.3.4	Berechnung von Dauermagneten	334
22.3.5	Theorie der Kompassnadel	340
23	Induktionskoeffizienten	342
23.1	Der Induktivitätsbegriff	342
23.2	Induktivitäten einfacher Anordnungen	343
23.2.1	Induktivität einer Ringspule	343
23.2.2	Induktivität einer Zylinderspule	344
23.2.3	Induktivität einer Doppelleitung	344
23.2.4	Induktivität eines Drahtringes	345
23.2.5	Induktivität von Drähten beliebiger Form	345
23.2.6	Induktivität bei beliebigen magnetischen Kreisen	346
23.3	Gegeninduktion und Gegeninduktivitäten	347
24	Energie im stationären Magnetfeld	352
25	Kräfte im stationären Magnetfeld	361
25.1	Kräfte zwischen Stromleitern	361
25.2	Kräfte zwischen Stromleitern und magnetischen Stoffen	365
25.3	Kräfte an Grenzflächen	365

Teil VI Das quasistationäre elektromagnetische Feld

26	Grundgleichungen des quasistationären Feldes	373
26.1	Elektrisches und magnetisches Feld	373
26.2	Das Induktionsgesetz	374
26.3	Die Grundgleichungen mit Induktionsgesetz	377
26.4	Das Induktionsgesetz und die Kontinuitätsgleichung	378
26.5	Die Grundgleichungen des quasistationären elektromagnetischen Feldes	380
27	Elementare Betrachtungen zur Induktionswirkung	384
28	Lösungsverfahren für Diffusionsgleichungen	401
29	Anwendungen des quasistationären Feldes	404
29.1	Wirbelströme und Skineneffekt	404
29.1.1	Stromverdrängung im zylindrischen Leiter	405
29.1.2	Ebene Wirbelfelder	410
29.1.3	Einseitige Stromverdrängung in Ankerleitern und Spulen	415
29.1.4	Wirbelströme in Eisenblechkernen	419
29.1.5	Abschirmung von Hochfrequenzfeldern	424
29.1.6	Triebströme eines Wechselstromzählers	426
29.2	Ummagnetisierungsverluste bei ferromagnetischen Werkstoffen	427
29.3	Der Transformator	435
29.3.1	Allgemeine Beziehungen	435
29.3.2	Streuungs-Ersatzbild	438
29.3.3	Die Streuung	439
29.3.4	Der lineare Übertrager	442
29.3.5	Kopplungs-Ersatzbilder des linearen Übertragers	446
29.4	Elektrisch-mechanische Energiewandlung	448
29.4.1	Allgemeines	448
29.4.2	Die Grundgleichungen der elektrischen Maschine	449
29.4.3	Die Gleichstrommaschine	451
29.4.4	Die Synchronmaschine	454
29.4.5	Die Asynchronmaschine	460
29.4.6	Lineare elektrisch-mechanische Systeme	466
30	Der Verschiebungsstrom im quasistationären Feld	473
31	Bewegte Leiter und das Induktionsgesetz	478
31.1	Bewegte Leiter	478
31.2	Bewegte nichtleitende Körper	481
31.3	Weitere Bewegungseffekte	482

Teil VII Das instationäre elektromagnetische Feld

32	Die Maxwellsche Theorie des elektromagnetisches Feldes	489
32.1	Die Maxwellsche Ergänzung und Wellen	489
32.2	Die Maxwellschen Gleichungen	491
33	Elementare Betrachtungen zum instationären elektromagnetischen Feld	494
34	Elektromagnetische Wellen	503
34.1	Elementarform der elektromagnetischen Welle	503
34.1.1	Nahfeld der schwingenden Ladung	509
34.1.2	Fernfeld der schwingenden Ladung	509
34.1.3	Energiefluss in der Elementarwelle, Strahlungswiderstand	510
34.2	Energiedichte des elektromagnetischen Feldes	516
34.3	Ebene Welle	519
34.4	Empfangsantennen	529
34.5	Elektromagnetische Schirme	531
35	TEM-Wellen auf Doppel- und Mehrfachleitungen	534
35.1	Vorbemerkungen	534
35.2	Verlustfreie Doppelleitungen	536
35.2.1	Feldtheoretische Beschreibung	536
35.2.2	Leitungsgleichungen	544
35.2.3	Konstruktion von Leitungsmodellen mit Differenzenformeln	555
35.2.4	Ausblick: Mehrfachleitungen	559
35.2.5	Schlußbemerkung	561
35.3	Verlustbehaftete Doppelleitungen	561
35.3.1	Doppelleitungen mit verlustbehaftetem Dielektrikum	561
35.3.2	Doppelleitungen mit verlustbehaftetem Dielektrikum und verlustbehafteten Leitern	564
35.4	Lösung der Leitungsgleichungen im Zeitbereich	567
35.4.1	Wellenausbreitung auf verlustlosen Doppelleitungen	567
35.4.2	Leitungsmodelle zur Netzwerkanalyse im Zeitbereich	580
35.5	Lösung der Leitungsgleichungen im Frequenzbereich	589
35.5.1	Sinusförmig eingeschwungene Lösungen der Leitungsgleichungen	590
35.5.2	Leitungsmodelle für die Netzwerkanalyse im Frequenzbereich	596
35.5.3	Eigenschaften der Lösungen der Leitungsgleichungen im Frequenzbereich	599
36	Hohlleiter und Hohlraumresonatoren	608

**Teil VIII Das elektromagnetische Feld
in elektronischen Bauelementen**

37	Mechanismen der Stromleitung	623
37.1	Stromleitung in Gasen: Grundbegriffe (<i>Internet-Download</i>)	623
37.1.1	Stoßionisierung	623
37.1.2	Elektronenauslösung an der Kathode	623
37.1.3	Anlaufspannung, Durchschlag in Gasen	623
37.1.4	Koronaentladung	623
37.1.5	Kurzzeitige Gasentladung	623
37.1.6	Bogenentladung	623
37.1.7	Bogenentladung an Kontakten	623
37.1.8	Die Kapazität bei Feldern mit Raumladungen	623
37.1.9	Der Durchschlag von Isolierstoffen	623
37.2	Stromleitung in festen Körpern und Flüssigkeiten	624
37.2.1	Atomstruktur der Leiter und Leitungsmechanismen	624
37.2.2	Metallische Leiter	625
37.2.3	Ionenleiter	630
37.2.4	Schwankungserscheinungen	631
37.2.5	Das Wesen der Spannungsquellen - Quellenspannung	633
37.3	Stromleitung in Halbleitern	634
37.3.1	Siliziumkristall	634
37.3.2	Bändermodell	636
37.3.3	Eigenleitung	637
37.3.4	Störstellenleitung	639
37.3.5	Feldstrom und Diffusionsstrom	642
37.3.6	Diffusion von Minoritätsträger	645
37.3.7	Diffusion von Löchern aus einer p -Zone in eine n -Zone. Diffusionsspannung	649
37.3.8	Thermoeffekt	653
37.3.9	Photoeffekt	653
38	Elektronenröhren (<i>Internet-Download</i>)	656
38.1	Die Raumladungsgleichung	656
38.2	Elektronenemission	656
38.3	Photoemission	656
38.4	Die Strom-Spannungsrelation für Elektronenröhren	656
38.5	Die Hochvakuumtriode	656
38.6	Die Hochvakuumtriode	656
38.7	Raumladung in leitenden Stoffen	656

39 Halbleiterbauelemente	657
39.1 Der pn -Übergang	657
39.1.1 Der pn -Übergang im stromlosen Zustand	657
39.1.2 pn -Übergang im Durchlassbereich	661
39.1.3 pn -Übergang im Sperrbereich	666
39.1.4 Kapazität des pn -Überganges	666
39.2 Der bipolare nnp -Transistor	671
39.2.1 Der Aufbau	673
39.2.2 Die Ersatzschaltung	673
39.3 Der MOSFET	680
40 Schaltungen und Netzwerke	685
40.1 Grundbegriffe des Bipolartransistors	685
40.2 Der Bipolartransistor und seine Grundsaltungen	686
40.2.1 Die Basisschaltung	686
40.2.2 Die Emitterschaltung	690
40.2.3 Die Kollektorschaltung (Emitterfolger)	694
40.3 Systeme mit Rückkopplung	695
40.3.1 Stabilitätsbedingungen	695
40.3.2 Negativer Widerstand	698
40.3.3 Die beiden Typen von negativen Widerständen	702
40.3.4 Rückkopplung	705
40.3.5 Erzeugung von Schwingungen in Oszillatoren	709
A Mathematische Felder	715
A.1 Differentialoperatoren und Rechenregeln	715
A.2 Das Satz von Helmholtz	720
B Der Laplace-Operator	722
B.1 Skalare Felder	722
B.2 Vektorielle Felder	723
Literatur	727
Index	739