
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 Gyrtator	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	Liniendipol	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 (*Internet-Download*) 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 Drahringes	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 Skinneffekt	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 (*Internet-Download*) ... 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 (*Internet-Download*) 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 $nnpn$ -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