

Springer-Lehrbuch

Theoretische Elektrotechnik

Eine Einführung

von

Karl Küpfmüller, Wolfgang Mathis, Albrecht Reibiger

Neuausgabe

Theoretische Elektrotechnik – Küpfmüller / Mathis / Reibiger

schnell und portofrei erhältlich bei beck-shop.de DIE FACHBUCHHANDLUNG

Thematische Gliederung:

Theoretische Physik, Mathematische Physik

Springer 2008

Verlag C.H. Beck im Internet:

www.beck.de

ISBN 978 3 540 78589 7

Contents

Was ist Theoretische Elektrotechnik?

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

Theorie elektrischer Netzwerke

Grundgleichungen und Analysemethoden elektrischer Netzwerke	23
Netzwerkmodellierung und Widerstandsnetzwerke	23
Elektrischen Netzwerke mit dynamischen Elementen	38
Die Wechselstromrechnung: AC-Kalkül	42
Darstellungen von Übertragungsfunktionen	55
Zweitore und Vierpole	63

Einfache elektrische Grundschaltungen	75
Einführende Überlegungen	75
Einfache Schaltungen aus Spulen und Widerständen	77
5.2.1 Lade- und Entladevorgang eines RC-Gliedes	77
5.2.2 Ein einfacher Wechselstromkreis mit Kondensator	82
Netzwerke aus Spulen und Widerständen	87
5.2.3 Anwendung der LP-Gleichungen	87

Inhaltsverzeichnis

III Das elektrostatische Feld

Die Grundgleichungen des elektrostatischen Feldes	107
Elementare Betrachtungen zur Elektrostatik	113
Materialgesetze in der Elektrostatik	121
nfluenzwirkungen	129
Einfache Beispiele für elektrostatische Felder	133
0.1 Das elektrische Feld von Punktladungen	134
10.1.1 Die homogen geladene Kugel und die Punktladung	134
10.1.2 Endlich viele Punktladungen	135
10.1.3 Das Potenzial zweier Punktladungen	136
10.1.4 Der elektrische Dipol	138
10.1.5 Das elektrische Feld zweier Kugeln	141
10.1.6 Endlich ausgedehnte Linienladungen	143
0.2 Ebene elektrostatische Felder	145
10.2.1 Unendlich lange Linienleiter	145
10.2.2 Koaxialkabel, Zylinderkondensator	147
10.2.3 Zweidrahtleitung, parallele Zylinder	151
10.2.4 Zylinder und Platte	156
10.2.5 Liniendipol	157
10.2.6 Erdseil	159
Lösungsverfahren der Poisson- und Laplace-Gleichung	163
1.1 Grundlagen	163
11.1.1 Die Poisson- und die Laplace-Gleichung und ihre Lösungsmengen	164
11.1.2 Rand- und Grenzbedingungen, Eindeutigkeit des Potenzials	166
1.2 Elementare Methoden	167
11.2.1 Die graphische Methode	167
11.2.2 Eindimensionale Potenzialprobleme	170
11.2.3 Überlagerung von Punktladungen	171
1.3 Das Kirchhoff-Integral	172
1.4 Die Greensche und Neumannsche Funktionen	173
1.5 Die Multipolmethode	174
1.6 Die Spiegelungsmethode	176
1.7 Konforme Abbildungen	178

Inhaltsverzeichnis XVII

Kapazitätskoeffizienten	197
1 Der elementare Kapazitätsbegriff	197
2 Graphische Berechnung von Kapazitätskoeffizienten	199
3 Kapazität einfacher Anordnungen	200
4 Parallel- und Reihenschaltung von Kapazitäten	209
5 Kapazitäten in Mehrleitersystemen	210
12.5.1 Maxwellsche Potenzial- und Kapazitätskoeffizienten	210
12.5.2 Definition und Messung von Teilkapazitäten	211
12.5.3 Teilkapazitäten und Form des elektrischen Feldes	214
12.5.4 Berechnung von Teilkapazitäten	216
Energie in der Elektrostatik	225
Mechanische Kräfte in der Elektrostatik	229
1 Kräfte an Leiteroberflächen	229
2 Mechanische Spannungen im elektrischen Feld	231
3 Kräfte an Grenzflächen zwischen Nichtleitern	233
4 Berechnung der Feldkräfte aus der Kapazität	235
5 Einwirkung elektrischer Felder auf Elektronenbahnen: Elektronenoptik (Internet)	238
<hr/>	
7 Das elektrische Strömungsfeld	
Grundgleichungen des elektrischen Strömungsfeldes	241
Einige elementare Betrachtungen zum elektrischen Strömungsfeld	247
1 Experimentelle Betrachtungen	247
2 Das stationäre Strömungsfeld und Widerstandsnetzwerke	251
3 Zusammenhang zwischen Kapazität und Widerstand	257
Beispiele von elektrischen Strömungsfeldern	261
1 Punktquelle	261
2 Spiegelung	269
3 Linienquelle	271
<hr/>	
Das stationäre Magnetfeld	
Grundgleichungen des stationären Magnetfeldes	279

Inhaltsverzeichnis

9.4 Der magnetische Dipol	300
Materialgesetze im stationären Magnetfeld	303
9.0.1 Diamagnetismus und Paramagnetismus	303
9.0.2 Messung der Permeabilität	306
9.0.3 Ferromagnetismus	307
9.0.4 Magnetische Werkstoffe	315
9.0.5 Magnetische Anisotropie	318
Lösungsverfahren für die Vektor-Poisson-Gleichung	321
9.1.1 Ableitung der Vektor-Poisson-Gleichung	321
9.1.2 Das vektorielle Kirchhoff-Integral	323
9.1.2.1 Kirchhoff-Integral für Stromdichteveilungen	323
9.1.2.2 Kirchhoff-Integral für Stromfäden	325
9.1.3 Das Biot-Savart-Integral	329
9.1.4 Die Multipolmethode	331
9.1.5 Das skalare magnetische Potenzial	333
Beispiele für stationäre Magnetfelder	343
9.2.1 Anwendungen der Laplaceschen Formel	343
9.2.2 Anwendung des magnetischen Potenzials	345
9.2.3 Der magnetische Kreis: Elektro- und Dauermagnete	350
9.2.3.1 Grundgleichungen des magnetischen Kreises	350
9.2.3.2 Angenäherte Berechnung von Elektromagneten	351
9.2.3.3 Scherung	356
9.2.3.4 Berechnung von Dauermagneten	357
9.2.3.5 Theorie der Kompassnadel	362
Induktionskoeffizienten	365
9.3.1 Der Induktivitätsbegriff	365
9.3.2 Induktivitäten einfacher Anordnungen	366
9.3.2.1 Induktivität einer Ringspule	366
9.3.2.2 Induktivität einer Zylinderspule	367
9.3.2.3 Induktivität einer Doppelleitung	368
9.3.2.4 Induktivität eines Drahtringes	368
9.3.2.5 Induktivität von Drähten beliebiger Form	369
9.3.2.6 Induktivität bei beliebigen magnetischen Kreisen	369
9.3.3 Gegeninduktion und Gegeninduktivitäten	371
Energie im stationären Magnetfeld	377
Kräfte im stationären Magnetfeld	387

I Das quasistationäre elektromagnetische Feld

Grundgleichungen des quasistationären Feldes	399
1 Elektrisches und magnetisches Feld	399
2 Das Induktionsgesetz	400
3 Die Grundgleichungen mit Induktionsgesetz	403
4 Das Induktionsgesetz und die Kontinuitätsgleichung	405
5 Die Grundgleichungen des quasistationären elektromagnetischen Feldes	407
Elementare Betrachtungen zur Induktionswirkung	411
Stromsverfahren für Diffusionsgleichungen	429
Anwendungen des quasistationären Feldes	433
1 Wirbelströme und Skineffekt	433
29.1.1 Stromverdrängung im zylindrischen Leiter	434
29.1.2 Ebene Wirbelfelder	439
29.1.3 Einseitige Stromverdrängung in Ankerleitern und in Spulen	444
29.1.4 Wirbelströme in Eisenblechkernen	448
29.1.5 Abschirmung von Hochfrequenzfeldern	454
29.1.6 Triebströme eines Wechselstromzählers	455
2 Die Ummagnetisierungsverluste in ferromagnetischen Werkstoffen	456
3 Der Transformator	465
29.3.1 Allgemeine Beziehungen	465
29.3.2 Streuungs-Ersatzbild	468
29.3.3 Die Streuung	469
29.3.4 Der lineare Übertrager	472
29.3.5 Kopplungs-Ersatzbilder des linearen Übertragers	476
4 Elektrisch-mechanische Energiewandlung	478
29.4.1 Allgemeines	478
29.4.2 Die Grundgleichungen der elektrischen Maschine	479
29.4.3 Die Gleichstrommaschine	480
29.4.4 Die Synchronmaschine	484
29.4.5 Die Asynchronmaschine	490
29.4.6 Lineare elektrisch-mechanische Systeme	496
Der Verschiebungsstrom im quasistationären Feld	503

Inhaltsverzeichnis

Bewegte Leiter und das Induktionsgesetz	509
31.1 Bewegte Leiter	509
31.2 Bewegte nichtleitende Körper	512
31.3 Weitere Bewegungseffekte	513

VII Das instationäre elektromagnetische Feld

Die Maxwellsche Theorie des elektromagnetischen Feldes ..	519
32.1 Die Maxwellsche Ergänzung und Wellen	519
32.2 Die Maxwellschen Gleichungen	521

Elementare Betrachtungen zum instationären elektromagnetischen Feld	525
--	-----

Elektromagnetische Wellen	535
34.1 Elementarform der elektromagnetischen Welle	535
34.1.1 Nahfeld der schwingenden Ladung	541
34.1.2 Fernfeld der schwingenden Ladung	541
34.1.3 Energiefloss in der Elementarwelle und der Strahlungswiderstand	542
34.2 Energiedichte des elektromagnetischen Feldes	548
34.3 Ebene Welle	551
34.4 Empfangsantennen	561
34.5 Elektromagnetische Schirme	563

TEM-Wellen auf Doppel- und Mehrfachleitungen	567
35.1 Vorbemerkungen	567
35.2 Verlustfreie Doppelleitungen	569
35.2.1 Feldtheoretische Beschreibung	569
35.2.2 Leitungsgleichungen	580
35.2.3 Konstruktion von Leitungsmodellen mit Differenzenformeln	594
35.2.4 Ausblick: Mehrfachleitungen	598
35.2.5 Schlußbemerkung	600
35.3 Verlustbehaftete Doppelleitungen	600
35.3.1 Doppelleitungen mit verlustbehaftetem Dielektrikum ..	600
35.3.2 Doppelleitungen mit verlustbehaftetem Dielektrikum und verlustbehafteten Leitern	603
35.4 Lösung der Leitungsgleichungen im Zeitbereich	606
35.4.1 Wellenausbreitung auf verlustlosen Doppelleitungen ..	606
35.4.2 Leitungen mit Nuten und Leiter im Zeitbereich ..	610

Inhaltsverzeichnis XXI

35.5.2 Leitungsmodelle für die Netzwerkanalyse im Frequenzbereich	635
35.5.3 Eigenschaften der Lösungen der Leitungsgleichungen im Frequenzbereich	638
halleiter und Hohlraumresonatoren	647

III Das elektromagnetische Feld in elektronischen Elementen

Mechanismen der Stromleitung	661
1 Stromleitung in Gasen: Grundbegriffe (Internet)	661
37.1.1 Stoßionisierung	661
37.1.2 Elektronenauslösung an der Kathode	661
37.1.3 Anlaufspannung. Durchschlag in Gasen	661
37.1.4 Koronaentladung	661
37.1.5 Kurzzeitige Gasentladung	661
37.1.6 Bogenentladung	661
37.1.7 Bogenentladung an Kontakten	661
37.1.8 Die Kapazität bei Feldern mit Raumladungen	661
37.1.9 Der Durchschlag von Isolierstoffen	661
2 Stromleitung in festen Körpern und Flüssigkeiten	662
37.2.1 Atomstruktur der Leiter und Leitungsmechanismen	662
37.2.2 Metallische Leiter	663
37.2.3 Ionenleiter	668
37.2.4 Schwankungerscheinungen	669
37.2.5 Das Wesen der Spannungsquellen - Quellenspannung	671
3 Stromleitung in Halbleitern	672
37.3.1 Siliziumkristall	672
37.3.2 Bändermodell	674
37.3.3 Eigenleitung	675
37.3.4 Störstellenleitung	677
37.3.5 Feldstrom und Diffusionsstrom	680
37.3.6 Diffusion von Minoritätsträger	683
37.3.7 Diffusion von Löchern aus einer <i>p</i> -Zone in eine <i>n</i> -Zone. Diffusionsspannung	687
37.3.8 Thermoeffekt	691
37.3.9 Photoeffekt	691
lektronenröhren (Internet)	694
1 Die Raumladungsgleichung	694

Inhaltsverzeichnis

8.5 Das Raumladungsgesetz bei Elektronenröhren	694
8.6 Kennlinien von Hochvakuumtrioden	694
8.7 Charakteristische Größen von Hochvakuumtrioden	694
8.8 Raumladung in leitenden Stoffen	694
Halbleiterbauelemente	695
9.1 Der <i>pn</i> -Übergang	695
39.1.1 Der <i>pn</i> -Übergang im stromlosen Zustand	695
39.1.2 <i>pn</i> -Übergang im Durchlassbereich	699
39.1.3 <i>pn</i> -Übergang im Sperrbereich	704
39.1.4 Kapazität des <i>pn</i> -Überganges	704
9.2 Der bipolare <i>npn</i> -Transistor	709
39.2.1 Der Aufbau	711
39.2.2 Die Ersatzschaltung	711
9.3 Der MOSFET	718
Schaltungen und Netzwerke	723
0.1 Grundbegriffe der Schaltungstechnik	723
0.2 Der Bipolartransistor und seine Grundschaltungen	726
40.2.1 Die Basisschaltung	726
40.2.2 Die Emitterschaltung	730
40.2.3 Die Kollektorschaltung (Emitterfolger)	733
0.3 Grundaufbau von Operationsverstärkern	735
0.4 Systeme mit Rückkopplung	738
40.4.1 Stabilitätsbedingungen	738
40.4.2 Negativer Widerstand	740
40.4.3 Die beiden Typen von negativen Widerständen	744
40.4.4 Rückkopplung	748
40.4.5 Erzeugung von Schwingungen in Oszillatoren	751
Mathematische Felder	758
A.1 Differentialoperatoren und Rechenregeln	758
A.2 Das Satz von Helmholtz	764
Der Laplace-Operator	766
3.1 Skalare Felder	766
3.2 Vektorielle Felder	767
atur	771
x	785