

Grundlagen der Elektrotechnik/ Elektronik Band 2

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Phys. Horst Elschner

unter Mitarbeit von

Doz. Dr.-Ing. habil. Gerhard Rödiger

Inhaltsverzeichnis

Wichtige Formelzeichen	13
1 Quasistationäre elektromagnetische Felder	15
1.1 Einführung der magnetischen Feldgrößen	15
1.1.1 Magnetische Flußdichte und Gaußsches Gesetz	15
1.1.2 Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz	17
1.1.3 Gesetz von Biot-Savart für Stromfäden	20
1.1.4* Gesetz von Biot-Savart bei räumlicher Stromverteilung	21
1.2 Magnetische Feldgrößen an Grenzflächen	22
1.3 Magnetische Eigenschaften von Materialien	25
1.3.1 Magnetische Polarisierung	25
1.3.2 Diamagnetismus	27
1.3.3 Paramagnetismus	27
1.3.4 Ferromagnetismus	28
1.4 Netzwerk- und Feldbeschreibung magnetischer Kreise	31
1.4.1 Netzwerkbeschreibung	31
1.4.2 Vergleich von Netzwerk- und Feldbeschreibung	35
1.4.3* Magnetisches Potential	37
1.5 Analyse nichtlinearer magnetischer Kreise	39
1.6 Bewegte Bezugssysteme - Lorentztransformation	43
1.7 Lorentzkraft	45
1.8 Induktionsgesetz und technische Anwendungen	46
1.8.1 Grundlagen	46
1.8.1.1 Ruheinduktion	46
1.8.1.2 Ruhe- und Bewegungsinduktion	50
1.8.2 Induktionen von Wirbelströmen in massivem Leitermaterial	53
1.8.3 Spannungsinduktion in elektrischen Generatoren	55
1.8.4 Selbst- und Gegeninduktion	58
1.8.4.1 Selbstinduktion	58
1.8.4.2 Selbst- und Gegeninduktion bei magnetisch verkoppelten Spulen	60
1.9 Magnetische Feldenergie	66
1.9.1 Energiedichte und Energie des magnetischen Feldes	66
1.9.2 Energie magnetisch verkoppelter Kreise	69
1.10 Kräfte in magnetischen Feldern	70
1.10.1 Kraft auf bewegte Punktladungen	70
1.10.1.1 Grundlagen	70
1.10.1.2 Bewegung freier Ladungsträger im Magnetfeld	71

1.10.1.3	Ladungsträgerbewegung in Halbleitern und Plasmen unter Einfluß eines Magnetfeldes	73
1.10.2	Kraft auf Konvektionsströme bzw. stromdurchflossene Leiter.	74
1.10.2.1	Grundlagen.	74
1.10.2.2	Gleichstrommotor.	78
1.10.2.3	Weitere Anwendungen des elektrodynamischen Kraftgesetzes.	80
1.10.3	Kraft an Grenzflächen zwischen Stoffen unterschiedlicher Permeabilität	82
1.10.3.1	Grundlagen.	82
1.10.3.2	Anwendungen ungepoltter Kraftwirkungen.	83
1.10.3.3	Anwendungen gepoltter Kraftwirkungen (Vormagnetisierung).	85
1.10.4	Kraft auf magnetische Dipole.	86
1.11	Skineffekt	87
2	Wechselstromschaltungen	89
2.1	Grundbegriffe periodischer Zeitfunktionen.	89
2.1.1	Beschreibung sinusförmiger Zeitfunktionen.	89
2.1.2	Mittelwerte periodischer Zeitfunktionen.	91
2.2	Wechselstromverhalten linearer Bauelemente.	95
2.3	Wechselstromverhalten linearer Schaltungen.	99
2.3.1	Addition sinusförmiger Zeitfunktionen gleicher Frequenz und einige Schlußfolgerungen.	99
2.3.2	Differentialgleichungen als Berechnungsgrundlage.	100
2.3.3	Komplexe Netzwerkanalyse.	102
2.3.3.1	Eigenschaften komplexer Größen.	102
2.3.3.2	Rechenoperationen bei komplexen Größen.	104
2.3.3.3	Mathematische Beschreibung von Zeigern.	105
2.3.3.4	Funktionaltransformation.	107
2.3.3.5	Netzwerkanalyse mit komplexen Differentialgleichungen bzw. Integro- Differentialgleichungen.	107
2.3.3.6	Komplexer Widerstand und komplexer Leitwert.	109
2.3.3.7	Komplexe Netzwerkanalyse mit den vollständigen Kirchhoffschen Gleichungen.	113
2.3.3.8	Weitere Methoden der komplexen Netzwerkanalyse.	115
2.3.3.9	Netzwerke mit gesteuerten Quellen.	120
2.4	Grafische Verfahren der Netzwerkbeschreibung sowie Netzwerkbegriffe.	121
2.4.1	Konstruktion komplexer Widerstände und Leitwerte.	121
2.4.2	/, (/)-Zeigerbilder.	122
2.4.3	Inversion von Zeigern.	125
2.4.4	Netzwerkfunktionen.	127
2.4.5	Frequenz-, Amplituden- und Phasengang.	129
2.4.6	Ortskurven und ihre Inversion.	129
2.4.7*	Inversionsdiagramm.	136
2.4.8	Scheinwiderstandsdiagramm.	138
2.4.9*	Äquivalente Netzwerke.	139
2.4.10*	Duale Netzwerke.	140
2.5	Leistung und Arbeit.	142
2.5.1	Grundlagen.	142
2.5.2	Leistung bei den Grundschaltelementen.	147

2.5.3*	Wirk- und Blindspannungen bzw. -ströme sowie Leistungen	147
2.5.4	Ersatzschaltungen und Leistungen passiver Zweipole	149
2.5.5	Ersatzschaltungen und Leistungen aktiver Zweipole	151
2.5.6	Leistung in Netzwerken	152
2.5.7	Leistungsanpassung	154
2.5.8	Blindleistungskompensation	155
2.6	Spezielle Wechselstromschaltungen sowie Kenngrößen	157
2.6.1	Logarithmierte Größenverhältnisse	157
2.6.2	Logarithmische Darstellung von Frequenzfunktionen	159
2.6.3	Schaltungen mit Tief- bzw. Hochpaßverhalten	161
2.6.3.1	Übersicht	161
2.6.3.2	RC-Tiefpaß 1. Ordnung	162
2.6.3.3	Weitere Tief- und Hochpässe 1. Ordnung	164
2.6.3.4	Tief- und Hochpässe 2. Ordnung	166
2.6.4	Resonanzkreise	168
2.6.4.1	Reine RLC-Reihenresonanzkreise und -Parallelresonanzkreise	168
2.6.4.2	Parallelresonanzkreis mit technischen Schaltelementen bzw. ohmscher Last	178
2.6.4.3	Anwendungen von Resonanzkreisen	180
2.6.5	Bandpaß- und Bandsperfilter	182
2.6.5.1	Grundbegriffe	182
2.6.5.2	LC-Filter	184
2.6.5.3	RC-Filter	185
2.6.5.4	Allgemeines zu Filterentwurf und -realisierung	186
2.6.6	Frequenzunabhängiger Spannungsteiler	188
2.6.7	Brückenschaltungen	189
2.6.7.1	Einführung	189
2.6.7.2	Resistive Brücke mit Spannungsquelle	190
2.6.7.3	Resistive Brücke mit Stromquelle	190
2.6.7.4	Wechselstrommeßbrücken	191
2.6.7.5	Phasendrehbrücken	194
2.7	Theorie der Vierpole	195
2.7.1	Vierpolgleichungen	195
2.7.2	Vierpolparameter	198
2.7.3	Umrechnung der Vierpolparameter	200
2.7.4	Zusammenschaltung von Vierpolen	200
2.7.5	Vierpolarten	202
2.7.6	Vierpol-Ersatzschaltungen	204
2.7.7	Transistor-Ersatzschaltungen	206
2.7.7.1	Überblick	206
2.7.7.2	Aufbau und Wirkungsweise von NPN-Bipolartransistoren	206
2.7.7.3	Strom-Spannungs-Beziehungen	208
2.7.7.4	Großsignal-Ersatzschaltung	210
2.7.7.5	Kleinsignal-Ersatzschaltung	210
2.7.8	Eingangs- und Ausgangsimpedanz	212
2.7.9	Wellenparameter	213
2.7.9.1	Wellenparameter eines umkehrbaren symmetrischen Vierpols	213
2.7.9.2*	Wellenparameter für umkehrbare unsymmetrische Vierpole	215
2.7.10	n-Pol	216

2.8	Transformatoren und Übertrager	216
2.8.1	Prinzip des Transformators	216
2.8.2	Idealer Transformator	217
2.8.3	Verhalten technischer Transformatoren	217
2.8.4	Anwendungen und Bauformen von Transformatoren	220
2.9	Dreiphasensysteme	223
2.9.1	Merkmale von Mehrphasensystemen	223
2.9.2	Netze mit Sternschaltung des Generators	224
2.9.3	Netze mit Dreieckschaltung des Generators	228
2.9.4	Leistung in Dreiphasensystemen	229
2.9.5	Einige Beispiele zum Drehstrom-Vierleiternetz	230
2.9.6	Übertragung und Verteilung von Elektroenergie	232
2.9.7*	Spannungsebenen bei Dreh-, Wechsel- und Gleichstrom	233
2.9.8	Leistungsmessung in Drehstromsystemen	233
2.9.9*	Umwandlung der Phasenzahl bei Mehrphasensystemen	234
2.9.10*	Unsymmetrische Drehstromsysteme	235
2.9.11*	Symmetrische Komponenten	236
2.10	Schaltungen mit nichtsinusförmigen periodischen Zeitfunktionen	237
2.10.1	Lineare Schaltungen mit Quellen unterschiedlicher Frequenz	237
2.10.2	Fourieranalyse und-synthese periodischer Zeitfunktionen	239
2.10.3*	Fourierintegral	244
2.10.4*	Diskrete Fouriertransformation	245
2.10.5	Kenngößen nichtsinusförmiger periodischer Zeitfunktionen	246
2.10.5.1	Effektivwert und Leistung	246
2.10.5.2	Klirrfaktor und Welligkeit	248
2.10.5.3	Einfluß von Bauelementen und Schaltungen auf die Klirrfaktoren	249
2.10.5.4	Quellen mit nichtsinusförmigem periodischen Zeitverlauf	250
2.10.6	Oberwellengeneration durch nichtlineare Bauelemente und Schaltungen	251
2.10.7	Verzerrungsfreie Übertragung	252
3	Schaltungen bei beliebiger Erregung sowie Schaltvorgänge	253
3.1	Schaltvorgänge	253
3.1.1	Schaltvorgänge an Netzwerkelementen	253
3.1.2	Schaltvorgänge in linearen Schaltungen	256
3.1.2.1	Schaltungen mit einem Energiespeicher bei konstanter Erregung	257
3.1.2.2	Schaltungen mit einem Energiespeicher bei beliebiger Erregung	262
3.1.2.3	Schaltungen mit 2 Energiespeichern bei beliebiger Erregung	265
3.2	Computergestützte Analyse nichtlinearer Schaltungen	271
3.3*	Übertragungsfunktion eines linearen Systems	277
3.4	Anwendung der Laplacetransformation	280
3.4.1	Überblick	280
3.4.2*	Laplacetransformation zur Netzwerkanalyse mit Differentialgleichungen	286
3.4.3*	Laplacetransformation zur Netzwerkanalyse mit Operatorschaltungen	287
3.4.4*	Methode der Aufspaltung	289

4	Analogien zwischen elektrischen und nichtelektrischen Systemen	291
4.1	Einführung	291
4.2	Thermisch-elektrische Analogien	291
4.2.1	Thermische Knoten- und Maschengleichungen	291
4.2.2	Bilanzgleichung für Wärmeleistungen - thermischer Knotensatz	293
4.2.3	Temperaturfeld als Potentialfeld - thermischer Maschensatz	294
4.2.4	Thermische Widerstände	295
4.2.5	Übersicht und Beispiele zu thermischen Netzwerken	298
4.2.6	Feldbeschreibung der Wärmeleitung	302
4.3	Mechanisch-elektrische Analogien	305
4.3.1	Mechanisch-translatorische Systeme	305
4.3.2	Mechanisch-rotatorische Systeme	309
4.4	Weitere Analogien	309
5	Nichtstationäre elektromagnetische Felder	312
5.1	Einführung in die Wellenausbreitung	312
5.2*	Wellengleichungen für die elektrische und magnetische Feldstärke	315
5.3*	Wellengleichungen für die elektrische und magnetische Feldstärke bei harmonischer Zeitabhängigkeit	317
5.4*	Wellengleichungen für das Vektor- und das Skalarpotential	319
5.5	Energiebilanz bei elektromagnetischen Wellen	323
5.6*	Maxwellsche Gleichungen und Halbleitergleichungen	325
5.7	Elektrische Leitungen	326
5.7.1	Telegrafengleichung	326
5.7.2*	Telegrafengleichungen bei harmonischer Zeitabhängigkeit	329
5.7.3	Reflexion bei unterschiedlichen Abschlußbedingungen	334
5.7.4*	Streuparameter	336
6	Sensoren	341
6.1	Allgemeine Eigenschaften von Meßverfahren	341
6.2	Sensoren für nichtelektrische Größen	343
	Anhang	346
A. 1	Lösung linearer Gleichungssysteme	346
A. 2	Personen- und Anlagenschutz in Niederspannungsanlagen	348
A. 3	Lösungen der Aufgaben	351
	Literaturverzeichnis	370
	Sachwörterverzeichnis	371