

Reinhold Pregla

Grundlagen der Elektrotechnik

7., überarbeitete und erweiterte Auflage

unter Mitarbeit von

Dr.-Ing. Hans-Georg Bergandt

Dr.-Ing. Uwe Schulz

Dr.-Ing. Volker Tulaja



Hüthig Verlag Heidelberg

Inhaltsverzeichnis

Vororientierung zur Kurseinheit 1	1
0 Zur Beschreibung physikalischer Vorgänge	2
0.1 Physikalische Größen	3
0.2 Einheiten und Einheitensysteme	5
0.3 Dimension, Zahlenwertgleichung	8
1 Das statische elektrische Feld	12
1.1 Die elektrische Ladung und ihre Wirkungen	12
1.1.1 Zum Aufbau der Materie	12
1.1.2 Grundversuche zur Wirkung der elektrischen Ladung	13
1.1.3 Ladungserhaltungssatz, Leiter und Nichtleiter	16
1.2 Feldstärke und Coulomb'sches Gesetz	18
1.3 Feldlinien, Feldlinienbilder	23
Vororientierung zur Kurseinheit 2	31
1.4 Bewegung einer Ladung im elektrischen Feld – Arbeit, Potential, Spannung	33
1.5 Ungeladene Leiter im statischen elektrischen Feld	45
1.5.1 Influenz	45
1.5.2 Der Faraday'sche Becherversuch	47
1.6 Die elektrische Verschiebungsdichte	49
1.6.1 Fluss eines Vektorfeldes	49
1.6.2 Die Erregung des elektrischen Feldes	51
Vororientierung zur Kurseinheit 3	62
1.7 Die Kapazität	64
1.7.1 Begriff und Berechnungsgleichung	64
1.7.2 Kondensatoren und Beispiele für die Kapazitätsberechnung	66
1.7.3 Zusammenschaltung von Kondensatoren	72
1.8 Energie und Kräfte im elektrostatischen Feld	77
1.8.1 Energie und Energiedichte	77
1.8.2 Bestimmung von Kräften aus der Energie	80
1.8.3 Elektrostatische Spannungsmesser	81
1.8.4 Der elektrische Dipol	82

1.9	Materie im elektrischen Feld	87
1.9.1	Die Feldstärke im isolierenden Stoff	87
1.9.2	Grenzfläche zwischen zwei Dielektrika	90
1.9.3	Betrachtung der Polarisation im atomaren Bereich	92
1.9.4	Energie und Kräfte in Feldern mit Dielektrika	94

Vororientierung zur Kurseinheit 4 **100**

2	Der elektrische Strom	102
2.1	Der einfache Stromkreis: Die elektrische Stromstärke	102
2.2	Stromstärke und Stromdichte	104
2.3	Strömung im Metall: Ohm'sches Gesetz	107
2.4	Strömungsfelder	112
2.5	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes	113
2.6	Energieumsetzung im elektrischen Stromkreis	118
2.7	Strömung im Hochvakuum: Raumladungsgesetz	120

Vororientierung zur Kurseinheit 5 **128**

2.8	Leitungsmechanismen im Halbleiter	130
2.8.1	Zur Kristallstruktur der Halbleiter	130
2.8.2	Eigenleitung	131
2.8.3	Störleitung	133
2.8.4	Bändermodell	135
2.8.5	Zustandsdichte, Besetzungswahrscheinlichkeit, Ladungsträgerdichten	138
2.9	Die Halbleiterdiode	141
2.9.1	Der stromlose pn-Übergang	141
2.9.2	Der pn-Übergang unter Vorspannung	145
2.10	Stromsteuerung im Transistor	150
2.10.1	Der Injektionstransistor	150
2.10.2	Feldeffekttransistoren	153
2.10.2.1	Einführung	153
2.10.2.2	Sperrschicht-Feldeffekttransistoren (NIGFET)	153
2.10.2.3	Isolierschicht-Feldeffekttransistoren (IGFET)	156
2.10.2.4	Übersicht über die Feldeffekttransistoren	157

Vororientierung zur Kurseinheit 6	161
3 Gleichstromschaltungen	163
3.1 Strom und Spannungen im einfachen Stromkreis	163
3.2 Zweipole	165
3.3 Zusammenschaltung von Zweipolen – die Kirchhoff'schen Regeln	167
3.4 Serien- und Parallelschaltung von Widerständen	170
3.5 Messung von Stromstärke und Spannung	175
3.6 Die Wheatstone'sche Brücke	177
3.7 Der Spannungsteiler	180
3.8 Ersatzquellen	181
3.9 Leistungsanpassung und Wirkungsgrad	183
3.10 Schaltungen mit nichtlinearen Elementen	184
Vororientierung zur Kurseinheit 7	192
4 Berechnung linearer Netzwerke	194
4.1 Allgemeine Grundlagen	194
4.2 Das Maschenstromverfahren	197
4.3 Das Knotenpotentialverfahren	200
4.4 Netzwerktopologie	201
4.5 Die Netzwerkgleichungen	205
4.5.1 Netzwerkgleichungen nach dem Maschenverfahren	205
4.5.2 Netzwerkgleichungen nach dem Knotenverfahren	207
4.5.3 Bemerkungen zu den Analysegleichungen	208
4.6 Lösung der Analysegleichungen – Überlagerungsprinzip	210
4.7 Netzwerkfunktionen	212
4.7.1 Eingangswiderstand und Übergangsgröße	212
4.7.2 Das Reziprozitätstheorem	213
4.7.3 n-Torgleichungen	214
4.8 Netzwerke mit gesteuerten Quellen	216
4.8.1 Gesteuerte Quellen	216
4.8.2 Wichtige Theoreme	221
4.8.3 Quellentransformation	222
4.9 Kondensatornetzwerke	223

Vororientierung zur Kurseinheit 8	230
5 Das magnetische Feld	232
5.1 Wirkung und Darstellung des magnetischen Feldes	232
5.1.1 Grunderscheinungen	232
5.1.2 Feldvektor und Feldbilder	233
5.1.3 Vergleich zwischen elektrischem und magnetischem Feld	235
5.2 Kraft auf eine bewegte Ladung – Definition der magnetischen Flussdichte B	236
5.3 Die magnetische Kraft auf einen stromdurchflossenen Draht	239
5.4 Drehmoment auf eine stromdurchflossene Leiterschleife im Magnetfeld – der magnetische Dipol	245
5.5 Die Erregung des magnetischen Feldes	248
5.5.1 Das magnetische Feld eines geraden Stromfadens	248
5.5.2 Die magnetische Feldstärke	250
5.5.3 Die magnetische Spannung	254
5.5.4 Das Durchflutungsgesetz	254
5.5.5 Beispiele zum Durchflutungsgesetz	256
5.5.5.1 Das magnetische Feld im Inneren einer langen Zylinderspule	256
5.5.5.2 Das magnetische Feld eines zylindrischen Drahtes endlicher Dicke	257
5.6 Die Kraft zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern – Definition der Einheit für die Stromstärke	258
5.7 Zur Bestimmung magnetischer Felder	259
Vororientierung zur Kurseinheit 9	265
5.8 Die magnetischen Eigenschaften der Materie	267
5.8.1 Der Magnetisierungsvektor	267
5.8.2 Drehimpuls und magnetisches Moment	269
5.8.3 Diamagnetismus	272
5.8.4 Paramagnetismus	274
5.8.5 Ferromagnetismus	275
5.8.6 Bedingungen an Grenzflächen	279
5.9 Der magnetische Kreis	284
5.9.1 Der magnetische Fluss	284
5.9.2 Das Ohm'sche Gesetz des magnetischen Kreises	285
5.9.3 Der verzweigte magnetische Kreis	288
5.9.4 Der magnetische Kreis mit Luftspalt	290
5.9.5 Berechnung von Dauermagnetkreisen	291
5.10 Anwendungen der magnetischen Kraftwirkung	296
5.10.1 Der Hall-Effekt und seine Anwendungen	296
5.10.2 Das Drehspulinstrument	299
5.10.3 Elektroakustischer Wandler	304
5.10.4 Das Zyklotron	305

Vororientierung zur Kurseinheit 10	310
6 Die elektromagnetische Induktion	312
6.1 Induktionsvorgänge	312
6.1.1 Bewegungsinduktion	312
6.1.2 Transformationsinduktion	314
6.1.3 Lenz'sche Regel	315
6.2 Das Induktionsgesetz	317
6.3 Das induzierte elektrische Feld	322
6.4 Beispiele zum Induktionsgesetz	326
6.4.1 Die induzierte Spannung in einer Spule	326
6.4.2 Gleichmäßig rotierende Spule im konstanten Magnetfeld	327
6.4.3 Drahtschleife im veränderlichen inhomogenen Magnetfeld	329
6.4.4 Das Barlow'sche Rad als „Ausnahme“ von der Flussregel	331
6.5 Selbstinduktion und Gegeninduktion	336
6.5.1 Selbstinduktion	336
6.5.2 Gegeninduktion	337
6.6 Berechnung von Induktivitäten und Gegeninduktivitäten	339
6.6.1 Allgemeines Verfahren	339
6.6.2 Berechnung der Induktivität aus dem magnetischen Fluss	340
6.6.2.1 Lange Zylinderspule	342
6.6.2.2 Toroidspule	342
6.6.2.3 Doppelleitung	344
6.6.2.4 Gegeninduktivität zwischen zwei Doppelleitungen	347
Vororientierung zur Kurseinheit 11	353
6.7 Energie im magnetischen Feld	355
6.7.1 Magnetische Energie in Spulen	355
6.7.2 Energiedichte im magnetischen Feld	359
6.7.3 Hystereseverluste	360
6.7.4 Berechnung von Kraftwirkungen aus der Energie	362
6.7.5 Berechnung von Induktivitäten aus der Energie	365
6.8 Wirbelströme und Stromverdrängung	369
6.8.1 Beispiele für Wirbelströme	369
6.8.2 Wirbelstrom in einem dünnen Blech	371
6.8.3 Stromverdrängung	374
6.9 Die Grundgleichungen des elektromagnetischen Feldes	380
6.9.1 Das magnetische Feld des Verschiebungsstromes	380
6.9.2 Die Maxwell'schen Gleichungen	383

Vororientierung zur Kurseinheit 12	388
7 Der elektrische Stromkreis im quasistationären Zustand	390
7.1 Der quasistationäre Zustand	390
7.2 Die Schaltelemente im quasistationären Zustand	391
7.3 Spannungsquellen	395
7.4 Die Kirchhoff'schen Gleichungen für den quasistationären Fall	396
7.5 Ersatzschaltungen realer Bauelemente	398
7.6 Ausgleichsvorgang und eingeschwungener Zustand	403
7.7 Verschiedene Ausgleichsvorgänge	406
7.7.1 Einfacher Kreis mit Spule oder Kondensator	406
7.7.2 Einfacher Kreis mit Spule und Kondensator	410
Vororientierung zur Kurseinheit 13	418
8 Wechselströme und Netzwerke	420
8.1 Grundbegriffe und Definitionen	420
8.2 Zeigerdarstellung sinusförmiger Wechselgrößen	423
8.3 Darstellung sinusförmiger Vorgänge mit Hilfe der komplexen Rechnung	426
8.3.1 Komplexe Zahlen	426
8.3.2 Rechenoperationen mit komplexen Zahlen	427
8.3.3 Komplexe Darstellung sinusförmiger Schwingungen	429
8.4 Komplexe Schwingungen und die linearen Schaltelemente	435
8.5 Netzwerke aus komplexen Widerständen	439
8.5.1 Komplexer Widerstand und komplexer Leitwert	439
8.5.2 Serien- und Parallelschaltungen komplexer Widerstände	442
8.5.3 Analysegleichungen für Netzwerke aus komplexen Widerständen	445
8.6 Duale und reziproke Netzwerke	446
8.6.1 Eigenschaften dualer Netzwerke	446
8.6.2 Reziproke Netzwerke	451
Vororientierung zur Kurseinheit 14	457
8.7 Ortskurven	459
8.8 Wechselstrommessbrücken	461
8.9 Schwingkreise	465
8.10 Leistungen im Wechselstromkreis	473
8.11 Messen von Wechselströmen	477

8.12 Der Transformator	481
8.12.1 Der ideale Transformator	481
8.12.2 Ersatzschaltungen für den realen Transformator	485
8.12.3 Der verlustfreie Lufttransformator	489
8.12.4 Einsatzbereiche von Transformatoren	490
Glossar	495
Literaturverzeichnis	513
Sachwörterverzeichnis	515