

Heiner Herberg

Elektronik

Aus dem Programm
Elektrotechnik/ Elektronik

Aufgabensammlung Elektrotechnik, Band 1 + 2

von M. Vömel und D. Zastrow

Elektrotechnik

von D. Zastrow

Vieweg Handbuch Elektrotechnik

von W. Böge

Handbuch Elektrische Energietechnik

von L. Constantinescu-Simon

Elektronik

von D. Zastrow

Elektronik

von Heiner Herberg

Elemente der angewandten Elektronik

von E. Böhmer

Rechenübungen zur angewandten Elektronik

von E. Böhmer

**Arbeitshilfen und Formeln für das
technische Studium 4:**

Elektrotechnik / Elektronik / Digitaltechnik

von A. Böge

Elektrische Meßtechnik

von K. Bergmann

Vieweg Lexikon Technik

von A. Böge

Heiner Herberg

Elektronik

Einführung für alle Studiengänge

Mit 529 Abbildungen

Herausgegeben von Otto Mildenerger



Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei
Der Deutschen Bibliothek erhältlich.

1. Auflage Januar 2002

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Otto Mildenerger lehrte an der Fachhochschule Wiesbaden in den
Fachbereichen Elektronik und Informatik.

Alle Rechte vorbehalten

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2002

Ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH,
Braunschweig/Wiesbaden, 2002.



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

www.vieweg.de

Konzeption und Layout des Umschlags: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 978-3-528-03911-0 ISBN 978-3-663-09913-0 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-09913-0

Vorwort

Das vorliegende Buch wendet sich an Studierende und Ingenieure, die sich mit dem großen Gebiet der Elektronik im Haupt- und vor allem im Nebenfach beschäftigen.

In diesem Buch wird aufbauend auf den Grundlagen der Elektrotechnik eine Einführung in die konventionelle Elektronik vermittelt. Dazu ist zu Beginn im Kapitel 1 eine Zusammenfassung aller wesentlicher Fakten des Grundwissens aus der Elektrotechnik angegeben, auf die das Buch dann aufbaut. Im Anschluss wird der pn-Übergang behandelt, wobei sich auf die wesentlichen Fakten zur Anwendung beschränkt wird. Aufbauend auf den pn-Übergang wird als Schwerpunkt die Diode als Gleichrichter-Anwendung und die Z-Diode in Stabilisierungsschaltungen dargestellt. Zu diesen Anwendungen sind absichtlich sehr ausführlich die entsprechenden Herleitungen, auch mit vielen Zwischenschritten angegeben. Im Kapitel 3 wird der Bipolar-Transistor am Beispiel des npn-Typs vorgestellt und in den drei Grundsaltungen vorgestellt, angewendet sowie wieder ausführlich formal beschrieben. Dabei wird immer Wert darauf gelegt, dass *ein Typ* und *eine Grundsaltung* ausführlich diskutiert wird. Die anderen Schaltungsvarianten und Anwendungen werden danach in vergleichender Weise vorgestellt und kürzer behandelt. Dieser Weg setzt sich im Kapitel 4 mit dem Feldeffekttransistor fort, wo wieder nur eine Grundsaltung am Beispiel des n-Kanaltyp behandelt wird. Anschließend werden die anderen technologischen Systeme vergleichend betrachtet. Nach der Darstellung der Grundlagen zu den Bauelementen und deren Anwendungsmöglichkeiten werden aufbauend ab Kapitel 5 komplette Schaltungen untersucht und die Frage des Frequenzverhaltens von Wechselsignalverstärkern behandelt. Daran schließt sich eine Untersuchung zur Rückkopplungsproblematik und der Mehrtransistoranwendung an. Aus der Anwendung des Bipolartransistors in einem Differenzverstärker erfolgt der Übergang auf die Kapitel 10 und 11, die als eine kurze Einführung in die Operationsverstärkertechnik zu sehen sind. Hier werden nur die Grundlagen zusammengetragen, Vergleiche zu den bisherigen Erkenntnissen gezogen und einige einfache Anwendungen behandelt. Tiefergehende Betrachtungen und Berechnungen sind nicht Inhalt dieses Buches, dazu ist auf die große Zahl der Spezialliteratur zurückzugreifen.

Wie bereits erwähnt, wird in diesem Buch, im Gegensatz zu anderen Büchern, besonders Wert darauf gelegt, dass bei den formalen Beschreibungen auf einfache Grundlagen zurückgegriffen und auf diese aufgebaut wird. Da oft den Studierenden das Verständnis bei der formalen Herleitung verloren geht, werden hier eine Vielzahl von Zwischenschritten eingefügt, was zu umfangreichen Formelsätzen führte. Gleiches trifft auch auf die Abbildungen und deren hohe Zahl zu, mit deren Hilfe das Verständnis weiter gefördert werden soll.

Dieses vorliegende Buch soll rein der Grundlagenvermittlung dienen. Deshalb wird so intensiv auf die Bauelemente und die Transistorschaltungen eingegangen, die heute bei den modernen Entwicklungsmethoden oft nur als Block mit einer mathematischen Funktion noch auftauchen. Das hier dargestellte Wissen wird u.a. in der Vorlesung an der Fachhochschule Frankfurt am Main eingesetzt und stellt den kompletten Lehrstoff der Grundlagen der Elektronik dar.

Abschließend möchte ich meinen Dank für die Unterstützung bei der Erstellung dieses Buches aussprechen und mich stellvertretend für alle Beteiligten bei Herrn Prof. Dr. Mildenerger als Verlagsbetreuer sowie bei Herrn Anders Meyer und Frau Ingrid Schleiter-Lausch FH Frankfurt/Main bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Grundlegende Gesetze	1
1.1.1	Ohmsche Gesetz	1
1.1.2	Kirchhoffsche Gesetze	1
1.2	Quellen und Ersatzschaltbilder	2
1.2.1	Spannungsquelle	2
1.2.2	Stromquelle	2
1.3	Strom-/Spannungs-Verhalten von Bauelementen	3
1.3.1	Widerstände	3
1.3.2	Kondensator	9
1.3.3	Induktivitäten / Spulen	12
1.3.4	Strom-/Spannungsverhalten an R, C, L	15
1.4	Parallel- und Reihenschaltung von Bauelementen	19
1.4.1	Herleitung des Phasenwinkels	19
1.4.2	Grenzfrequenz, Tief- und Hochpassverhalten	21
1.4.3	Integrier- und Differenzierglieder mit RC-Kombinationen	24
1.5	Elektrische Leistung und Arbeit	26
1.5.1	Allgemeine Definitionen	26
1.5.2	Definition und Herleitung des Effektivwertes	27
1.5.3	Wirkleistung und Blindleistung	28
1.5.4	Elektrische Arbeit	29
2	PN-Diode	30
2.1	Physikalische Grundlagen	30
2.1.1	Aufbau eines Halbleiterkristalls	30
2.1.2	Eigenleitfähigkeit	30
2.1.3	PN-Übergang	32
2.2	Arbeitsweise von Halbleiterdioden	34
2.2.1	Allgemeine Kennlinie	34
2.2.2	Parameter von Halbleiterdioden	35
2.2.2	Temperaturverhalten	38
2.2.3	Großsignalverhalten	38
2.2.4	Kleinsignalverhalten	41
2.2.5	Schaltverhalten von Halbleiterdioden	43

2.3	Halbleiterdioden als Gleichrichter	45
2.3.1	Einleitung	45
2.3.2	Grundsaltungen mit ohmscher Last	45
2.3.3	Gleichspannungserzeugung mit Glättungskondensator	56
2.3.4	Gleichspannungserzeugung mit Siebkette	61
2.4	Halbleiterdioden als Logik-Baustein	63
2.5	Sonderformen von Dioden und deren Anwendungen	64
2.5.1	Z-Diode	64
2.5.2	Kapazitätsdioden	73
2.5.3	Tunneldiode	74
2.5.4	Schottky-Dioden	75
2.5.5	Lichtempfindliche Dioden	76
2.5.6	Leuchtdioden	77
3	Bipolar-Transistor	78
3.1	Grundlagen	78
3.1.1	Allgemeiner Aufbau eines Transistors	78
3.1.2	Funktionsweise des pnp-Transistors	78
3.1.3	Funktionsweise des npn-Transistors	82
3.2	Strom-/ Spannungsbeziehungen am Transistor	84
3.2.1	Grundlagen	84
3.2.2	Großsignalverhalten des Bipolartransistors	88
3.2.3	Kleinsignalverhalten des Bipolartransistors	101
3.2.4	Dynamisches Verhalten des Bipolartransistors	103
3.3	Arbeitspunkteinstellung	104
3.3.1	Grundsätze	104
3.3.2	Festlegung des Arbeitspunktes	105
3.3.3	Stabilisierung des Arbeitspunktes	111
3.3.4	Betrachtung der Arbeitspunkteinstellung beim Schalterbetrieb	117
3.3.5	Wechselstromverhalten	117
3.4	Weitere Schaltungsvarianten des Bipolartransistors	124
3.4.1	Kollektorschaltung	124
3.4.2	Basisschaltung	133
3.4.3	Beispielschaltung Spannungsregler	136
3.5	Transistor als digitaler Schalter	137
3.5.1	Grundlagen	137
3.5.2	Betrachtung der Betriebszustände	138
3.5.3	Schaltverhalten und Schaltzeiten	142

4	Feldeffekttransistoren	146
4.1	Grundlagen der Feldeffekttransistortechnik	146
4.1.1	Einteilung der Feldeffekttransistoren nach der Steuerungsart	146
4.1.2	Grundfunktion und deren Zusammenhänge	147
4.2	Sperrschicht-FET	149
4.2.1	Grundlagen	150
4.2.2	Arbeitspunkteinstellung bei Sperrschicht-FET	159
4.3	Feldeffekttransistor mit Isolierschicht	163
4.3.1	Grundlagen	163
4.3.2	Mathematische Grundlagen	166
4.3.3	Kennlinienfelder für MOSFET	168
4.3.4	Arbeitspunkteinstellung für MOSFET	173
4.3.5	Weitere Grundschaltungen mit Feldeffekttransistoren	177
4.3.6	Feldeffekttransistor als gesteuerter Widerstand	182
4.4	Feldeffekttransistor als Schalter	184
4.4.1	Grundlagen	184
4.4.2	Statische Betrachtung	185
4.4.3	Statisches Übertragungsverhalten	188
4.4.4	Dynamisches Verhalten	191
4.5	CMOS-FET im Schalterbetrieb	197
4.5.1	Grundlagen	197
4.5.2	Statisches Verhalten des CMOS-Schalters	199
4.5.3	Dynamisches Verhalten des CMOS-Schalters	203
5	Kleinsignalverhalten von Transistoren	205
5.1	Einführung	205
5.2	Betrachtung des Bipolartransistors	206
5.2.1	Emitterschaltung	207
5.2.2	Basisschaltung	213
5.2.3	Kollektorschaltung	214
5.3	Umrechnung der h-Parameter	215
5.3.1	Umrechnung von Emitter- in Kollektorschaltung	216
5.3.2	Umrechnung von Emitter- in Basisschaltung	217
5.4	Arbeitspunktabhängigkeit der h-Parameter	218
5.5	Betrachtung des Unipolartransistors	221
5.5.1	Source-Schaltung	221
5.5.2	Interpretation der Differentiale am Kennlinienfeld	223
5.5.3	Arbeitspunktabhängigkeit der y-Parameter	224

6	Betriebskenngrößen von Transistorschaltungen	226
6.1	Der Vierpol	226
6.1.1	Allgemeine Grundlagen	226
6.1.2	Schnittstellenvarianten an einer Verstärkerschaltung	227
6.1.3	Beschreibungssysteme	228
6.2	Beschreibung mittels h-Parameter	229
6.2.1	Bedeutung der einzelnen Parameter (allgemeine Darstellung)	229
6.2.2	Interpretation der h-Parameter	230
6.2.3	Betrachtung von Ein- und Ausgangswiderstand	231
6.2.4	Betrachtung des Transistors und dessen Umfeld	235
6.2.5	Betrachtung von Ein- und Ausgangswiderstand	239
6.2.6	Betrachtung der Verstärkungen	242
6.3	Vierpol-Ersatzschaltbild mit y-Parametern	248
6.3.1	Allgemeine Darstellung	248
6.3.2	Bedeutung der Einzelparameter in y-Darstellung	248
6.3.3	Darstellung des Transistors mit y-Parameter	249
6.3.4	Betriebseigenschaften der y-Parameter	250
6.3.5	Zusammenhang zwischen h- und y-Parametern	252
7	Frequenzverhalten von Transistorschaltungen	253
7.1	Allgemeine Betrachtung der Emitter-Schaltung	253
7.1.1	Überlegungen zur Wirkung der Kapazitäten	254
7.2	Mathematische Betrachtungen	255
7.2.1	Betrachtung der Beschaltung	255
7.2.2	Betrachtung der Spannungsverstärkung	258
8	Der rückgekoppelte Transistorverstärker	268
8.1	Problemstellung	268
8.1.1	Rückkopplung	268
8.1.2	Ziel der Kopplungen	268
8.2	Prinzipien der Rückkopplung	269
8.3	Varianten der Rückkopplungen	270
8.4	Einsatzfall der Strom-Spannungs-Gegenkopplung	271
8.4.1	Spannungsanalyse	272
8.4.2	Analyse der Impedanzen	273
8.4.3	Umformung und Übertragung der Widerstandsanteile	274
8.4.4	Verstärkungsanalyse	276
8.4.5	Wirkungen auf die Ein- und Ausgangsimpedanz	277

8.4.6	Näherungen bei der Strom-/Spannungs-Gegenkopplung	279
8.5	Einsatzfall der Spannungs-/ Strom-Gegenkopplung	280
8.5.1	Grundprinzip	280
8.5.2	Analyse über y-Parameter	282
9	Differenzverstärker	287
9.1	Grundlagen	287
9.2	Allgemeiner Differenzverstärker	288
9.2.1	Grundvoraussetzungen für diese Funktion	288
9.2.2	Funktionsweise	289
9.2.3	Betrachtung der Signalparameter	290
9.2.4	Berechnung der Verstärkerparameter	293
10	Grundlagen der Operationsverstärkertechnik	295
10.1	Einführung	295
10.1.1	Allgemeine Beschreibung eines OPV	295
10.1.2	Hauptbaugruppen eines OPV	298
10.2	Grundkenngrößen von Operationsverstärkern	300
10.2.1	Wichtige Parameter	300
10.2.2	Übertragungsverhalten	301
10.2.3	Wechselstromeigenschaften	302
10.2.4	Statische Eigenschaften	305
10.2.5	Abgleichmöglichkeiten der Offsetfehler	306
10.3	Betriebsarten	307
10.3.1	Nichtinvertierender Betrieb	308
10.3.2	Invertierender Betrieb	308
10.3.3	Differenzbetrieb	309
10.3.4	Gleichtaktbetrieb	309
10.4	Allgemeine Grundanwendungen von Operationsverstärkern	310
10.4.1	Der rückgekoppelte OPV	310
11	Operationsverstärker - Anwendungen	313
11.1	Einführung zur Anwendung von Operationsverstärkern	313
11.1.1	Festlegungen	313
11.1.2	Grundsaltungen für Spannungsverstärker	313
11.2	Invertierender Spannungsverstärker	314
11.2.1	Betrachtung eines idealen Operationsverstärkers	314
11.2.2	Betrachtung eines realen Operationsverstärkers	318
11.2.3	Kompensation von Eingangsruhestrom und Offsetspannung	323

11.3 Nichtinvertierender Verstärker	325
11.3.1 Betrachtung des idealen OPVs	325
11.3.2 Betrachtung eines realen OPV	327
11.3.3 Ersatzschaltbild des nichtinvertierenden OPVs	328
11.3.4 Operationsverstärker als Niederfrequenzverstärker	330
11.4 Analoge Rechenschaltungen	332
11.4.1 Addierer	332
11.4.2 Subtrahierer	332
11.4.3 Exponentialverstärker	333
11.4.4 Logarithmierverstärker	334
11.5 Signalaufbereitung mit OPV	355
11.5.1 Integrierer	335
11.5.2 Differenzierer	337
11.5.3 Vierpolbeschaltung	338
11.6 Nichtlineare Schaltungsstufen	340
11.6.1 Spannungskomparator	340
11.6.2 Schmitt-Trigger	344
11.6.3 Astabiler Multivibrator	348
Literaturverzeichnis	352
Sachwortverzeichnis	355