

U. Tietze · Ch. Schenk

Halbleiter-Schaltungstechnik

Sechste,
neu bearbeitete und erweiterte Auflage



Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York Tokyo

TN43
T563
E6

8550162

U. Tietze · Ch. Schenk

Halbleiter-Schaltungstechnik

Sechste, neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 1014 Abbildungen



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York Tokyo 1983

Dr.-Ing. Ulrich Tietze

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technische Elektronik
der Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstr. 9, 8520 Erlangen

Dr.-Ing. Christoph Schenk

Geschäftsführer der Erwin Sick GmbH, Optik-Elektronik
Postfach 701649, 8000 München 70

Übersetzt in folgende Sprachen:

Polnisch: Naukowo-Techniczne, Warschau 1976

Englisch: Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1978

Ungarisch: Müszaki, Budapest 1981

Russisch: Mir, Moskau 1982

Spanisch: Marcombo, Barcelona 1983

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek
Tietze, Ulrich:

Halbleiter-Schaltungstechnik U. Tietze: Ch. Schenk. — 6., neu bearb. u. erweit. Aufl. —
Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer, 1983

ISBN 3-540-12488-8 6. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo
ISBN 0-387-12488-8 6th edition Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin Tokyo

NE: Schenk, Christoph

ISBN 3-540-09848-8 5. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 0-387-09848-8 5th edition Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Die Vergütungsansprüche des §54, Abs. 2 UrhG werden durch die „Verwertungsgesellschaft Wort“, München, wahrgenommen.

© Springer-Verlag Berlin · Heidelberg 1969, 1971, 1974, 1976, 1978, 1980 and 1983
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Wir übernehmen auch keine Gewähr, daß die in diesem Buch enthaltenen Angaben frei von Patentrechten sind; durch diese Veröffentlichung wird weder stillschweigend noch sonstwie eine Lizenz auf etwa bestehende Patente gewährt.

Gesamtherstellung: Universitätsdruckerei H. Stürtz AG, Würzburg

2362/3020-543210

Vorwort

Die Elektronik dringt in immer weitere Gebiete von Wissenschaft und Technik vor. Sie beschränkt sich längst nicht mehr auf Nachrichtentechnik und Datenverarbeitung allein, sondern ist überall dort unentbehrlich geworden, wo es etwas zu messen, zu steuern oder zu regeln gilt. Das vorliegende Buch soll helfen, die Wirkungsweise fertiger Schaltungen zu verstehen und auch selbständig neue entwerfen zu können.

Das Buch ist in zwei Teile gegliedert. Der erste Teil ist als Einführung in die Grundlagen der Halbleiter-Schaltungstechnik gedacht und wendet sich an Naturwissenschaftler und Studierende der Hoch- und Fachschulen. Er enthält den Stoff einer zweisemestrigen Grundlagen-Vorlesung in Technischer Elektronik. Dabei gehen wir von den Kennlinien der Bauelemente aus und verzichten bewußt auf die Erklärung der physikalischen Vorgänge im Halbleiter. Hierzu verweisen wir auf die einschlägige Literatur.

Bei der Schaltungsanalyse vernachlässigen wir von vornherein untergeordnete Effekte. Dadurch wollen wir dem Leser ein qualitatives Verständnis der wesentlichen Zusammenhänge ermöglichen. Dieses Verständnis ist die Grundvoraussetzung für eine kreative Entwicklungsarbeit und damit viel wichtiger als eine besonders genaue Schaltungsberechnung, die angesichts der beträchtlichen Fertigungstoleranzen ohnehin kaum sinnvoll ist.

Der zweite Teil des Buches ist anwendungsorientiert gegliedert. Er soll den in der Praxis stehenden Fachleuten sowie den Studierenden höherer Semester eine ausführliche und kritische Übersicht über die vielfältigen Schaltungsmöglichkeiten bieten. Dabei steht der Einsatz integrierter Schaltungen im Vordergrund. Bei der Digitaltechnik muß man dem Umstand Rechnung tragen, daß für viele Anwendungen hochintegrierte Spezialbausteine erhältlich sind. Daraus ergibt sich eine neue Optimierungs-Strategie: Es geht nicht mehr darum, die Zahl der logischen Verknüpfungen zu minimisieren, sondern die am besten geeigneten Spezialbausteine zu kombinieren.

Wenn nicht besonders hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten verlangt werden, ergibt sich die einfachste und übersichtlichste Schaltung häufig durch die Verwendung eines Mikroprozessors. Dadurch verlagert sich die Schaltungsentwicklung mehr und mehr auf die Programmierungsebene. Der große Vorteil dieser Technik besteht darin, daß ein und dieselbe Schaltungsanordnung auf einfachste Weise der jewei-

ligen Aufgabenstellung angepaßt werden kann. Um den Übergang von der konventionellen Digitalschaltungstechnik zur Mikroprozessor-Technik zu erleichtern, haben wir die Hardware- und Software-Aspekte gleichberechtigt in zwei ausführlichen Kapiteln behandelt.

Die Kapitel des zweiten Teils sind so abgefaßt, daß sie unabhängig voneinander gelesen werden können. Damit wollen wir den etwas fortgeschrittenen Leser in die Lage versetzen, sich bei Bedarf schnell in die verschiedenen Spezialgebiete einzuarbeiten. Um dabei auf möglichst kurzem Wege zur praktischen Realisierung zu gelangen, haben wir die verschiedenen Schaltungsprinzipien anhand typischer Lösungsbeispiele erläutert, deren Funktionsfähigkeit anhand eigener Laborversuche überprüft wurde.

Wir freuen uns, daß der rasche Verkauf der fünften Auflage uns die Möglichkeit gegeben hat, das Buch zu überarbeiten und zu erweitern. Nachdem nunmehr eine internationale Einigung über die Verwendung einheitlicher Schaltsymbole für die Digitaltechnik zustande gekommen ist, haben wir die Darstellung dem neuesten Stand angepaßt. Die Umstellung bedeutet sehr viel mehr als nur den Übergang von runden Symbolen auf eckige. Mit der Einführung der Abhängigkeitsnotation wurde eine völlig neue Systematik geschaffen, mit der auch komplexe Bausteine eindeutig beschrieben werden können. Wir haben diesem Punkt besondere Aufmerksamkeit gewidmet, um auch „alten Hasen“ das Verständnis der neuen Datenblätter zu ermöglichen.

Entsprechend der ständig wachsenden Bedeutung haben wir den Halbleiterspeichern ein eigenes Kapitel gewidmet und dabei auch spezielle Anwendungsfälle aufgenommen, wie z.B. FIFOs und Zweitorspeicher.

Mit Hilfe von schnell schaltenden Leistungstransistoren, insbesondere von Leistungsmosfets, wurden die Daten von Schaltnetzteilen so verbessert, daß sie die linearen Netzteile in vielen Bereichen verdrängt haben. Aus diesem Grund haben wir die Schaltnetzteile sehr viel ausführlicher als bisher behandelt.

Zur Anpassung an den neuesten Stand der Technik sind die Typenangaben in allen Kapiteln aktualisiert und erweitert worden. Zur schnelleren Orientierung haben wir dabei jeweils die wichtigsten Daten von gebräuchlichen integrierten Schaltungen in Tabellenform hinzugefügt.

Für die zahlreichen Hinweise aus dem Leserkreis danken wir herzlich. Wir werden uns bemühen, mit Hilfe dieser Rückkopplung eine stetige Weiterverbesserung unseres Buches zu erreichen.

Erlangen und München,
im September 1983

U. Tietze Ch. Schenk

Halbleiter- Elektronik

Herausgeber: W. Heywang, R. Müller

Band 15
R. Müller

Rauschen

1979. 188 Abbildungen. 247 Seiten
DM 68,-. ISBN 3-540-09379-6

Inhaltsübersicht: Einleitung. – Beschreibung des Rauschens im Zeitbereich. – Beschreibung des Rauschens im Frequenzbereich. – Thermisches Rauschen. – Schrotrauschen. – Generations-Rekombinations-Rauschen. – Übertragung von Rauschen über elektrische Netzwerke. – Kenngrößen rauschender linearer Vierpole. – Rauschmeßtechnik. – Dioden. – Bipolare Transistoren. – Feldeffekttransistoren. – Empfang optischer Signale. – Oszillatorrauschen. – Anhang. – Literatur. – Sachverzeichnis.

Band 14
H. Weiss, K. Horninger

Integrierte MOS-Schaltungen

1982. 181 Abbildungen. 344 Seiten
DM 74,-. ISBN 3-540-11545-5

Inhaltsübersicht: Bezeichnungen und Symbole. – Einleitung. – MOS-Bauelemente. – MOS-Techniken. – MOS-Grundsaltungen. – Entwurfstechnik für integrierte MOS-Schaltungen. – Schaltungsarten. – Ausblick. – Sachverzeichnis.

Band 13
H.-M. Rein, R. Ranft

Integrierte Bipolarschaltungen

1980. 198 Abbildungen, 8 Tabellen. 320 Seiten
DM 68,-. ISBN 3-540-09607-8

Inhaltsübersicht: Einleitung. – Herstellung integrierter Schaltungen. – Elemente integrierter Schaltungen – Aufbau, Eigenschaften, Dimensionierung. – Integrierte Digitalschaltungen. – Integrierte Analogschaltungen. – Anhang. – Literaturverzeichnis. – Sachverzeichnis.

Band 12
W. Gerlach

Thyristoren

Berichtiger Nachdruck. 1981. 184 Abbildungen.
426 Seiten
DM 68,-. ISBN 3-540-09438-5

Inhaltsübersicht: Einleitung. – Funktionsprinzip des Thyristors. – Statisches Verhalten des Thyristors bei Vorwärtspolung. – Theorie der Durchlaß-

charakteristik. – Sperrvermögen. – Methoden zur Analyse der Schaltvorgänge. – Einschaltverhalten. – Die Steuerstromzündung großflächiger Thyristoren. – Das Ausschaltverhalten. – Vom Thyristor abgeleitete Bauelemente und spezielle Gate-Konfigurationen. – Literaturverzeichnis. – Sachverzeichnis.

Band 10
G. Winstel, C. Weyrich

Optoelektronik I

Lumineszenz- und Laserdioden
Berichtiger Nachdruck. 1981. 152 Abbildungen.
315 Seiten
DM 68,-. ISBN 3-540-09598-5

Inhaltsübersicht: Einführung und Überblick. – Strahlende und nichtstrahlende Rekombination in Halbleitern. – Physik der Lumineszenzdioden. – Materialherstellung und -technologie. – Lumineszenzdioden. – Halbleiterlaser. – Anwendungen von Lumineszenz- und Laserdioden. – Langzeitverhalten von Lumineszenz- und Laserdioden. – Sachverzeichnis.

Band 9
W. Harth, M. Claassen

Aktive Mikrowellendioden

1981. 117 Abbildungen. 190 Seiten
DM 68,-. ISBN 3-540-10203-5

Inhaltsübersicht: Bezeichnungen und Symbole. – Einleitung. – Lawinenlaufzeitdioden. – Barittdioden. – Elektronentransfer-(Gunn)-Elemente. – Tunnelioden. – Sachverzeichnis.

Band 8
G. Kesel, J. Hammerschmitt, E. Lange

Signalverarbeitende Dioden

1982. 113 Abbildungen. 224 Seiten
DM 74,-. ISBN 3-540-11144-1

Inhaltsübersicht: Symbolverzeichnis. – Einführung. – Die PIN-Diode. – Der Speichervaraktor. – Der Sperrschichtvaraktor. – Der MIS-Varaktor. – Schottky-Diode. – Zener- und Lawinen-Diode (Z-Diode). – Anhang. – Sachverzeichnis.

Springer-Verlag
Berlin
Heidelberg
New York
Tokyo



Halbleiter- Elektronik

Herausgeber:
W. Heywang, R. Müller

In Vorbereitung

Band 4

I. Ruge

Halbleiter-Technologie

2., überarbeitete und erweiterte Auflage von H. Mader
1983. 218 Abbildungen. Etwa 400 Seiten
DM 78,-. ISBN 3-540-12661-9

Inhaltsübersicht: Physikalische Größen. - Der ideale Einkristall. - Der reale Kristall. - Herstellung von Einkristallen. - Dotiertechnologien. - Der Metall-Halbleiter-Kontakt. - Meßverfahren zur Ermittlung von Halbleiterparametern. - Kristallvorbereitung. - Grundzüge der Planartechnik. - Gehäuse- und Montagetechnik. - Spezielle Technologien für die Herstellung Integrierter Schaltungen. - Einführung in die Technik der Schaltungsintegration. - Anhang. - Literaturverzeichnis. - Sachverzeichnis.

Band 17

W. Heywang

Sensorik

1983. Etwa 146 Abbildungen, etwa 5 Tabellen.
Etwa 240 Seiten. ISBN 3-540-12767-4

Inhaltsübersicht: Einleitung. - Einzeleffekte: Überblick über Effekte. Thermische Effekte. Optische Effekte. Magnetische Effekte. Piezowiderstandseffekte. Piezo- und Pyroelektrische Effekte. Chemische Effekte. - Sensorsignalverarbeitung: Einzelverarbeitung. Sensorsysteme. - Sachverzeichnis.

Band 18

W. Heywang

Amorphe und polykristalline Halbleiter

1984. 106 Abbildungen. Etwa 180 Seiten.
ISBN 3-540-12981-2

Inhaltsübersicht: Einleitung. - Amorphe Halbleiter. - Thermoelektrische Bauelemente. - Heißleiter. - Kaltleiter. - Varistoren. - Sachverzeichnis.



Springer-Verlag
Berlin
Heidelberg
New York
Tokyo

Inhaltsverzeichnis

Teil I. Grundlagen

1	Erklärung der verwendeten Größen	1
2	Passive RC- und LRC-Netzwerke	9
2.1	Der Tiefpaß	9
2.2	Der Hochpaß	14
2.3	Kompensierter Spannungsteiler	17
2.4	Passiver RC-Bandpaß	17
2.5	Wien-Robinson-Brücke	19
2.6	Doppel-T-Filter	20
2.7	Schwingkreis	22
3	Dioden	23
3.1	Kennlinien und charakteristische Daten	23
3.2	Z-Dioden	26
3.3	Kapazitätsdioden	27
4	Bipolartransistoren	28
4.1	Kennlinien und Kleinsignalparameter	29
4.2	Grenzdaten	33
4.3	Emitterschaltung	38
4.4	Basisschaltung	55
4.5	Kollektorschaltung, Emitterfolger	56
4.6	Transistor als Konstantstromquelle	59
4.7	Darlington-Schaltung	64
4.8	Differenzverstärker	66
4.9	Messung einiger Transistorparameter	76
4.10	Das Transistor-Rauschen	78
5	Feldeffekttransistoren	83
5.1	Klassifikation	83
5.2	Kennlinien und Kleinsignalparameter	85
5.3	Grenzdaten	88

5.4	Grundsaltungen	89
5.5	Fet als Konstantstromquelle	94
5.6	Fet-Differenzverstärker	97
5.7	Fet als steuerbarer Widerstand	99
6	Optoelektronische Bauelemente	102
6.1	Photometrische Grundbegriffe	102
6.2	Photowiderstand	104
6.3	Photodiode	106
6.4	Phototransistor	108
6.5	Leuchtdioden	109
6.6	Optokoppler	110
6.7	Optische Anzeige	111
7	Operationsverstärker	122
7.1	Eigenschaften eines Operationsverstärkers	122
7.2	Prinzip der Gegenkopplung	129
7.3	Nicht-invertierender Verstärker	132
7.4	Invertierender Verstärker	135
7.5	Innerer Aufbau von Operationsverstärkern	137
7.6	Integrierte Standard-Operationsverstärker	140
7.7	Frequenzgang-Korrektur	143
7.8	Messung von Operationsverstärker-Daten	157
7.9	Typenübersicht	158
8	Kippschaltungen	162
8.1	Der Transistor als digitales Bauelement	162
8.2	Kippschaltungen mit gesättigten Transistoren	166
8.3	Kippschaltungen mit emittergekoppelten Transistoren	172
8.4	Kippschaltungen mit Gattern	174
8.5	Kippschaltungen mit Komparatoren	178
9	Logische Grundsaltungen	190
9.1	Die logischen Grundfunktionen	190
9.2	Aufstellung logischer Funktionen	194
9.3	Abgeleitete Grundfunktionen	198
9.4	Schaltungstechnische Realisierung der Grundfunktionen	199
9.5	Verbindungsleitungen	219
9.6	Kombinatorische Logik (Schaltnetze)	222
9.7	Abhängigkeitsnotation	227

10 Schaltwerke (Sequentielle Logik)	230
10.1 Integrierte Flip-Flops	230
10.2 Dualzähler	238
10.3 BCD-Zähler im 8421-Code	247
10.4 Vorwahlzähler	250
10.5 Schieberegister	251
10.6 Aufbereitung asynchroner Signale	253
10.7 Systematischer Entwurf von Schaltwerken	259
11 Halbleiterspeicher	269
11.1 Festwertspeicher (ROM)	270
11.2 Schreib-Lese-Speicher (RAM)	278
11.3 Zweitortspeicher	286
11.4 RAM als Schieberegister	288
11.5 First-In-First-Out Memories (FIFO)	289
11.6 Fehler-Erkennung und -Korrektur	293

Teil II. Anwendungen

12 Lineare und nichtlineare Analogrechenschaltungen	299
12.1 Addierer	299
12.2 Subtrahierer	300
12.3 Bipolares Koeffizientenglied	304
12.4 Integratoren	305
12.5 Differentiatoren	311
12.6 Lösung von Differentialgleichungen	314
12.7 Funktionsnetzwerke	316
12.8 Analog-Multiplizierer	333
12.9 Koordinatentransformation	346
13 Gesteuerte Quellen und Impedanzkonverter	349
13.1 Spannungsgesteuerte Spannungsquellen	349
13.2 Stromgesteuerte Spannungsquellen	350
13.3 Spannungsgesteuerte Stromquellen	352
13.4 Stromgesteuerte Stromquellen	364
13.5 Der NIC (Negative Impedance Converter)	365
13.6 Der Gyrator	368
13.7 Der Zirkulator	372

14	Aktive Filter	376
14.1	Theoretische Grundlagen von Tiefpaßfiltern	376
14.2	Tiefpaß-Hochpaß-Transformation	398
14.3	Realisierung von Tief- und Hochpaßfiltern	
	1. Ordnung	399
14.4	Realisierung von Tief- und Hochpaßfiltern	
	2. Ordnung	403
14.5	Realisierung von Tief- und Hochpaßfiltern höherer Ordnung	409
14.6	Tiefpaß-Bandpaß-Transformation	412
14.7	Realisierung von Bandpaßfiltern 2. Ordnung	417
14.8	Tiefpaß-Bandsperren-Transformation	423
14.9	Realisierung von Sperrfiltern 2. Ordnung	425
14.10	Allpaß-Filter	428
14.11	Einstellbare Universalfilter	433
15	Signalgeneratoren	440
15.1	LC-Oszillatoren	440
15.2	Quarzoszillatoren	448
15.3	Wien-Brücken-Oszillatoren	454
15.4	Analogrechner-Oszillatoren	458
15.5	Funktionsgeneratoren	461
16	Breitbandverstärker	470
16.1	Frequenzabhängigkeit der Stromverstärkung	470
16.2	Einfluß von Transistor- und Schaltkapazitäten	472
16.3	Kaskodeschaltung	474
16.4	Differenzverstärker als Breitbandverstärker	475
16.5	Symmetrische Breitbandverstärker	476
16.6	Breitband-Spannungsfolger	482
16.7	Breitband-Operationsverstärker	484
17	Leistungsverstärker	488
17.1	Emitterfolger als Leistungsverstärker	488
17.2	Komplementäre Emitterfolger	490
17.3	Komplementäre Darlington-Schaltungen	496
17.4	Komplementäre Sourcefolger	498
17.5	Elektronische Strombegrenzung	500
17.6	Vier-Quadranten-Betrieb	502
17.7	Dimensionierung einer Leistungsendstufe	504

17.8	Ansteuerschaltungen mit Spannungsverstärkung	507
17.9	Erhöhung des Ausgangsstromes integrierter Operationsverstärker	509
18	Stromversorgung	511
18.1	Eigenschaften von Netztransformatoren	511
18.2	Netzgleichrichter	512
18.3	Lineare Spannungsregler	519
18.4	Erzeugung der Referenzspannung	532
18.5	Schaltnetzgeräte	538
18.6	Sekundärgetaktete Schaltregler	539
18.7	Primärgetaktete Schaltregler	548
19	Digitale Rechenschaltungen	563
19.1	Zahlendarstellung	563
19.2	Code-Umsetzer	569
19.3	Schiebelogik (Barrel Shifter)	575
19.4	Komparatoren	577
19.5	Addierer	579
19.6	Multiplizierer	587
19.7	Digitale Funktionsnetzwerke	591
20	Mikrocomputer-Grundlagen	594
20.1	Grundstruktur eines Mikrocomputers	594
20.2	Arbeitsweise eines Mikroprozessors	596
20.3	Befehls-Satz	603
20.4	Entwicklungshilfen	617
20.5	Typenübersicht	622
20.6	Minimal-Systeme	628
21	Modularer Aufbau von Mikrocomputern	635
21.1	Mikroprozessor-Platine	635
21.2	Speicher-Platine	640
21.3	Programmierung von EPROMs	644
21.4	Parallele Schnittstelle	647
21.5	Serielle Schnittstelle	651
21.6	IEC-Bus-Schnittstelle	664
21.7	Programmierbarer Zähler	669
21.8	Interrupt-Controller	670
21.9	Direkter Speicherzugriff (DMA)	672
21.10	Arithmetik-Prozessor	675
21.11	Datenausgabe auf Anzeigeeinheiten	680

21.12	Video-Ausgabe	684
21.13	Analog-Ein-/Ausgabe	692
21.14	Spezielle Peripherieschaltungen	695
22	Digitale Filter	697
22.1	Abtasttheorem	697
22.2	Digitale Übertragungsfunktion	701
22.3	Bilineare Transformation	704
22.4	Realisierung von Digitalfiltern	708
23	Analogschalter und Abtast-Halte-Glieder	719
23.1	Anordnung der Schalter	719
23.2	Elektronische Schalter	720
23.3	Analogschalter mit Verstärkern	731
23.4	Abtast-Halte-Glieder	733
24	DA- und AD-Umsetzer	739
24.1	Grundprinzipien der DA-Umsetzung	739
24.2	DA-Umsetzer in CMOS-Technologie	740
24.3	DA-Umsetzer in Bipolartechnologie	745
24.4	DA-Umsetzer für spezielle Anwendungen	747
24.5	Genauigkeit von DA-Umsetzern	754
24.6	Grundprinzipien der AD-Umsetzung	757
24.7	Genauigkeit von AD-Umsetzern	758
24.8	Ausführung von AD-Umsetzern	761
25	Meßschaltungen	778
25.1	Spannungsmessung	778
25.2	Strommessung	783
25.3	Meßgleichrichter (AC/DC-Converter)	786
26	Elektronische Regler	803
26.1	Grundlagen	803
26.2	Regler-Typen	804
26.3	Regelung nichtlinearer Strecken	814
26.4	Nachlaufsynchronisation (PLL)	817
27	Anhang	830
	Anschriften einiger Halbleiter-Hersteller und Distributoren	830
	Literatur	836
	Sachverzeichnis	843

Teil I. Grundlagen

1 Erklärung der verwendeten Größen

Um Unklarheiten zu vermeiden, wollen wir die Bezeichnung der wichtigsten Größen kurz zusammenstellen.

Spannung. Eine Spannung zwischen den Punkten x und y wird mit U_{xy} bezeichnet. Es ist vereinbart, daß U_{xy} positiv sein soll, wenn der Punkt x positiv gegenüber dem Punkt y ist. U_{xy} ist negativ, wenn der Punkt x negativ gegenüber dem Punkt y ist. Es gilt die Beziehung $U_{xy} = -U_{yx}$. Die Angabe

$$U_{BE} = -5 \text{ V}$$

oder

$$-U_{BE} = 5 \text{ V}$$

oder

$$U_{EB} = 5 \text{ V}$$

bedeutet also, daß zwischen E und B eine Spannung von 5V liegt, wobei E positiv gegenüber B ist. In einer Schaltung läßt man die Doppelindizes meist weg und ersetzt die Angabe U_{xy} durch einen Spannungspfeil U , der vom Schaltungspunkt x zum Schaltungspunkt y zeigt.

Potential. Das Potential V ist die Spannung eines Punktes bezogen auf einen gemeinsamen Bezugspunkt 0:

$$V_x = U_{x0}.$$

In den Schaltungen ist das Bezugspotential durch ein Massezeichen gekennzeichnet. Häufig wird U_x in der Bedeutung von V_x verwendet. Man spricht dann nicht ganz korrekt von der Spannung eines Punktes, z. B. der Anodenspannung. Für die Spannung zwischen zwei Punkten x und y gilt:

$$U_{xy} = V_x - V_y.$$

Strom. Der Strom wird durch einen Strompfeil I in der Leitung gekennzeichnet. Es ist vereinbart, daß I positiv sein soll, wenn der Strom im konventionellen Sinne in Pfeilrichtung fließt. I ist also positiv, wenn der Strompfeil am Verbraucher vom größeren zum kleineren Potential zeigt. Wie man die Strom- und Spannungspfeile in eine Schaltung einzeichnet, ist beliebig, wenn man den Zahlenwert von

U und I mit dem entsprechenden Vorzeichen versehen. – Besitzen Strom- und Spannungspfeil an einem Verbraucher dieselbe Richtung, lautet das Ohmsche Gesetz nach den angegebenen Vereinbarungen $R = U/I$; besitzen sie entgegengesetzte Richtung, muß es $R = -U/I$ lauten. Diesen Sachverhalt zeigt Abb. 1.1.



Abb. 1.1 Ohmsches Gesetz

Widerstand. Ist ein Widerstand spannungs- oder stromabhängig, kann man entweder den *statischen Widerstand* $R = U/I$ oder den *differentiellen Widerstand* $r = \partial U / \partial I \approx \Delta U / \Delta I$ angeben. Dies gilt bei gleicher Richtung von Strom- und Spannungspfeil. Bei entgegengesetzter Richtung ist wie in Abb. 1.1 ein Minuszeichen einzusetzen.

Spannungs- und Stromquelle. Eine reale Spannungsquelle läßt sich durch die Beziehung

$$U_a = U_0 - R_i I_a \quad (1.1)$$

beschreiben. Darin ist U_0 die Leerlaufspannung und $R_i = -dU_a/dI_a$ der Innenwiderstand. Diesen Sachverhalt veranschaulicht das Ersatzschaltbild in Abb. 1.2. Eine ideale Spannungsquelle ist durch die Eigenschaft $R_i = 0$ gekennzeichnet, d. h.: die Ausgangsspannung ist vom Strom unabhängig.

Ein anderes Ersatzschaltbild für eine reale Spannungsquelle läßt sich durch Umformen der Gl. (1.1) ableiten:

$$I_a = \frac{U_0 - U_a}{R_i} = I_0 - \frac{U_a}{R_i} \quad (1.2)$$

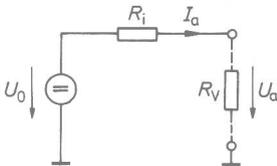


Abb. 1.2 Ersatzschaltbild für eine reale Spannungsquelle

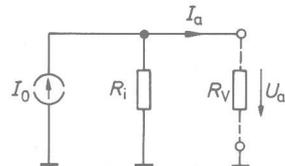


Abb. 1.3 Ersatzschaltbild für eine reale Stromquelle

Darin ist $I_0 = U_0/R_i$ der Kurzschlußstrom. Die zugehörige Schaltung zeigt Abb. 1.3. Man erkennt, daß der Ausgangsstrom um so weniger von der Ausgangsspannung abhängt, je größer R_i ist. Der Grenzübergang $R_i \rightarrow \infty$ ergibt eine ideale Stromquelle.

Eine reale Spannungsquelle läßt sich nach Abb. 1.2 oder 1.3 sowohl mit Hilfe einer idealen Spannungs- als auch mit Hilfe einer idealen Stromquelle darstellen. Man wählt die eine oder die andere Darstellung, je nachdem ob der Innenwiderstand R_i klein oder groß gegenüber dem in Frage kommenden Verbraucherwiderstand R_V ist.

Knotenregel. Bei der Berechnung vieler Schaltungen machen wir von der Knotenregel Gebrauch. Sie besagt, daß die Summe aller Ströme, die in einen Knoten hineinfließen, gleich Null ist. Dabei werden Strompfeile, die zum Knoten hinzeigen, positiv gezählt und Strompfeile, die vom Knoten wegzeigen, negativ. Die Anwendung der

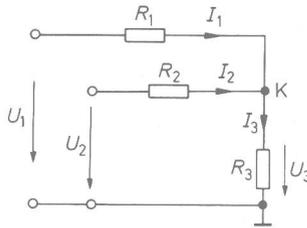


Abb. 1.4 Beispiel für die Anwendung der Knotenregel

Knotenregel wollen wir anhand der Schaltung in Abb. 1.4 demonstrieren. Gesucht sei die Spannung U_3 . Zu ihrer Berechnung wenden wir die Knotenregel auf den Knoten K an:

$$\sum_i I_i = I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

Nach dem Ohmschen Gesetz gilt:

$$I_1 = \frac{U_1 - U_3}{R_1},$$

$$I_2 = \frac{U_2 - U_3}{R_2},$$

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3}.$$

Durch Einsetzen ergibt sich

$$\frac{U_1 - U_3}{R_1} + \frac{U_2 - U_3}{R_2} - \frac{U_3}{R_3} = 0.$$

Daraus folgt das Ergebnis

$$U_3 = \frac{U_1 R_2 R_3 + U_2 R_1 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}.$$

Maschenregel. Ein weiteres Hilfsmittel zur Schaltungsrechnung ist die Maschenregel. Sie besagt, daß die Summe aller Spannungen längs einer geschlossenen Schleife Null ist. Dabei zählt man diejenigen Spannungen positiv, deren Pfeilrichtung mit dem gewählten Umlaufsinn übereinstimmt. Die anderen zählt man negativ. Bei der Schaltung in Abb. 1.5 gilt also

$$\sum_i U_i = U_1 + U_4 - U_2 - U_3 = 0.$$

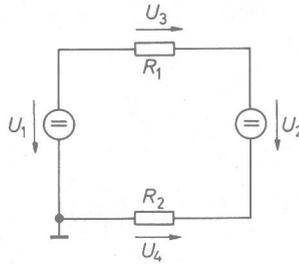


Abb. 1.5 Beispiel für die Anwendung der Maschenregel

Wechselstromkreis. Wenn sich eine Schaltung durch eine Gleichspannungs-Übertragungsgleichung $U_a = f(U_e)$ beschreiben läßt, gilt dieser Zusammenhang zwangsläufig auch für beliebig zeitabhängige Spannungen $U_a(t) = f[U_e(t)]$, solange die Änderung der Eingangsspannung quasistationär, d. h. nicht zu schnell erfolgt. Aus diesem Grund verwenden wir für Gleichspannungen und beliebig zeitabhängige Spannungen einheitlich Großbuchstaben $U = U(t)$.

Es gibt jedoch häufig Fälle, in denen eine Übertragungsgleichung nur für Wechselspannungen ohne Gleichspannungsanteil gültig ist. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, solche Wechselspannungen besonders zu kennzeichnen. Wir verwenden für ihren Momentanwert den Kleinbuchstaben u .

Ein besonders wichtiger Spezialfall sind solche Wechselspannungen, die sinusförmig von der Zeit abhängen:

$$u = \hat{U} \sin(\omega t + \varphi_u). \quad (1.3)$$

Darin ist \hat{U} der Scheitelwert. Daneben werden zur Charakterisierung von Wechselspannungen auch der Effektivwert $U_{\text{eff}} = \hat{U}/\sqrt{2}$ oder die Spannung von Spitze zu Spitze $U_{\text{SS}} = 2\hat{U}$ verwendet.