

Leitfäden der Informatik

Reinhold Paul

Elektrotechnik und Elektronik

für Informatiker

Band 2 Grundgebiete der Elektronik

Leitfäden der Informatik

Herausgegeben von

Prof. Dr. Hans-Jürgen Appelrath, Oldenburg
Prof. Dr. Volker Claus, Stuttgart
Prof. Dr. Günter Hotz, Saarbrücken
Prof. Dr. Lutz Richter, Zürich
Prof. Dr. Wolfried Stucky, Karlsruhe
Prof. Dr. Klaus Waldschmidt, Frankfurt

Die Leitfäden der Informatik behandeln

- Themen aus der Theoretischen, Praktischen und Technischen Informatik entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft in einer systematischen und fundierten Darstellung des jeweiligen Gebietes.
- Methoden und Ergebnisse der Informatik, aufgearbeitet und dargestellt aus Sicht der Anwendungen in einer für Anwender verständlichen, exakten und präzisen Form.

Die Bände der Reihe wenden sich zum einen als Grundlage und Ergänzung zu Vorlesungen der Informatik an Studierende und Lehrende in Informatik-Studiengängen an Hochschulen, zum anderen an „Praktiker“, die sich einen Überblick über die Anwendungen der Informatik(-Methoden) verschaffen wollen; sie dienen aber auch in Wirtschaft, Industrie und Verwaltung tätigen Informatikern und Informatikerinnen zur Fortbildung in praxisrelevanten Fragestellungen ihres Faches.

Elektrotechnik und Elektronik für Informatiker

Band 2 Grundgebiete der Elektronik

Von Prof. Dr.-Ing. Reinhold Paul
Technische Universität Hamburg-Harburg

Mit 427 Bildern und 80 Tafeln



B. G. Teubner Stuttgart 1995

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Paul, Reinhold:

Elektrotechnik und Elektronik für Informatiker / von Reinhold

Paul. – Stuttgart : Teubner.

Bd. 2. Grundgebiete der Elektronik : mit 80 Tafeln. – 1995

(Leitfäden der Informatik)

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

© B. G. Teubner Stuttgart 1995

Satz: Schreibdienst Henning Heinze, Nürnberg

ISBN 978-3-519-02129-2

ISBN 978-3-322-96652-0 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-96652-0

Vorwort

Der vorliegende Gesamtext entstand aus dem Anliegen, Informatikern, aber auch Ingenieuren und Wissenschaftlern, die keinen unmittelbaren Bezug zur Elektrotechnik/Elektronik hatten, eine angemessene Einführung in Schwerpunkte dieses Fachgebietes zu geben. Die Notwendigkeit dürfte unbestritten sein, nicht zuletzt ist gerade der Computer ein überzeugendes Produkt der elektronischen Industrie selbst. Auch für die Einbindung des Rechners über Sensoren und Aktoren in die technische Umwelt oder in Kommunikationsnetze sind elektronische Grundkenntnisse für jeden Informatiker höchst nützlich.

Dies ist einer der Gründe, der eine Einführung „Elektrotechnik/Elektronik“ in den einschlägigen Ausbildungsempfehlungen vorsieht. Die Zielstellung bedingt von Anfang an eine Stoffbeschränkung auf wirkliche Grundkenntnisse, die mit minimalen Mathematikkenntnissen auskommen und dafür mehr Wert auf die anschauliche Darstellung legen. Häufiger Bezug auf uns täglich umgebende elektrotechnische Erscheinungen soll den Leser über Stoffklippen hinweghelfen und ein Gefühl dafür vermitteln, was sich z.B. hinter Begriffen wie analoge und digitale Signalverarbeitung und -übertragung, Wellenausbreitung u.a. verbirgt.

Der gesamte Stoff wurde auf zwei Bände verteilt: Der erste Band enthält hauptsächlich die elektrotechnischen Grundbegriffe und Phänomene, die Grundlagen der Netzwerke (Stromkreise) und ihrer Netzwerkelemente, Wechselstromnetzwerke (als Grundlage einer allgemein zeitveränderlichen Signalübertragung), einen kurzen Abriss der Signal- und Systembegriffe sowie eine phänomenologische Einführung in das elektromagnetische Feld (das in konzentrierter Form z.B. in den Grundelementen auftritt).

Der vorliegende zweite Band umfaßt die Grundlagen der Elektronik und insbesondere der Digitaltechnik.

Halbleiterbauelemente stellen das Fundament informationstechnischer Einrichtungen dar. Behandelt werden Funktion und Anwendung der wichtigsten Halbleiterbauelemente: Dioden, Bipolar-, Feldeffekttransistoren, optoelektronische Elemente und Aspekte des Entwurfs integrierter Schaltungen. Ein knapper Abschnitt enthält einige Grundlagen analoger Schaltungen, die

6 Vorwort

zum selbstverständlichen Wissensbestand auch des Informatikers gehören sollten.

Den Kern dieses Bandes bildet fraglos die Digitaltechnik. Am Anfang stehen ihre Grundlagen: Zahlensysteme, Grundoperationen, Schaltsysteme und Grundkenntnisse der Analyse und Synthese. Ihre elektronische Realisierung erfolgt durch digitale Grundsaltungen und Schaltkreisfamilien.

Der Abschnitt komplexe Schaltnetze umfaßt die typischen Funktionseinheiten (Codierer, Multiplexer, Addierer, ALUs) und ihre Realisierung, auch durch programmierbare Strukturen, wie ROMs, PROMs und PLDs.

Schaltwerke bilden neben Schaltnetzen die zweite große Gruppe digitaler Systeme. Dazu zählen zunächst Flip-Flops und dynamische Speicherelemente als Grundstrukturen. Anschließend folgt ein Abschnitt über komplexere Schaltwerke einschließlich ihrer Analyse und Synthese. Zähler und Register mit ihren unterschiedlichen Formen sind ein weites und wichtiges Anwendungsfeld von Schaltwerken.

Ein größerer Abschnitt ist den Speichern gewidmet, einer der wichtigsten Gruppen digitaler Funktionseinheiten. Das Kapitel befaßt sich mit den verschiedenen Speicherarten, ihren Funktionsprinzipien und Speicherschaltkreisen. Aber auch magnetische und optische Speicherprinzipien als neuere Entwicklungsrichtung finden angemessene Beachtung. In vielen Anwendungsfällen sind digitale Systeme mit der analogen Welt verknüpft. Deshalb werden in einem Abschnitt AD-DA-Wandler die wichtigsten Wandlungsprinzipien erläutert. Digitale Systeme sind ohne Kommunikationsprozesse nicht denkbar. Dies war Grund genug, den letzten Schwerpunkt des Bandes diesem Themenkreis zu widmen. Zunächst werden dazu elementare Signal- und Systembegriffe weiter ausgebaut und damit der Anschluß an die Netzwerke und Transformationsmethoden des Bandes 1 geschaffen. Ergänzt sind hier insbesondere Abtastsysteme. Ein zweiter Aspekt sind die typischen Modulations- und Demodulationsverfahren, stets aus der Sicht digitaler Systeme. In diesem Rahmen kommt auch der Filterung als typischer Systemaufgabe Bedeutung zu, denn sehr oft müssen analoge und digitale Signale selektiert werden.

Physikalisch erfolgt die Kommunikation über unterschiedlichste Leitungssysteme oder den freien Raum. Eine Zusammenstellung der diesbezüglichen Grundlagen wird gegeben.

Die Datenkommunikation innerhalb von Geräten und zwischen ihnen erfolgt über Bussysteme und Kommunikationsnetze, die jeweils über Schnittstellen verkoppelbar sind.

Mit Bedacht werden Computer nicht eingehender betrachtet, weil dafür erfahrungsgemäß eigenständige Lehrveranstaltungen vorgesehen sind, in denen auch die Peripherie behandelt wird. Die Zielsetzung dieses Bandes ist aber die Vermittlung elektronischer Grundlagen für Informatiker.

Zur Verstärkung der Lernmotivation wurden jedem Abschnitt Lernziele vorge stellt und am Ende in Form von Lernorientierungen die wichtigsten Erkenntnisse thesenartig zusammengefaßt. Regelmäßig in den Text eingebaute Aufgaben (mit Lösungen) und eine Reihe typischer praxisbezogener Beispiele vermitteln dem Leser sehr bald ein Gefühl für den jeweiligen Lernfortschritt. Verwiesen werden soll auch auf die Hinweise zur Studienmethodik im Band 1, die selbstverständlich auch für diesen Band gelten.

Bei der Abfassung des Textes stand mir – neben den eigenen Lehr- und Übungserfahrungen – vor allem Herr Prof. Dr. Waldschmidt beratend zur Seite. Gerade von ihm kamen viele wertvolle Hinweise für die Stoffakzentuierung für Informatiker und an diesen Leserkreis wendet sich das Buch.

Herr Dr. Spuhler vom B.G. Teubner Verlag sorgte zusammen mit seinen Mitarbeitern – insbesondere Herrn Kretschmer – für die gute und rasche drucktechnische Abwicklung.

Hamburg, März 1994

R. Paul

Inhalt

7	Halbleiterbauelemente	13
7.1	Halbleiterdiode. pn-Übergang	16
7.1.1	Wirkprinzip	17
7.1.2	Kennlinienmodellierung	21
7.1.3	Kleinsignal- und dynamisches Verhalten	23
7.1.4	SPICE-Diodenmodell	28
7.1.5	Bau- und Anwendungsformen von Halbleiterdioden	30
7.2	Bipolartransistor	39
7.2.1	Wirkprinzip. Grundsaltungen	40
7.2.2	Kennlinienmodell	47
7.2.3	Kennlinienfelder	51
7.2.4	Kleinsignalparameter	58
7.2.5	SPICE-Bipolartransistormodell	61
7.2.6	Transistor im Grundstromkreis	62
7.2.7	Schaltungen zur Arbeitspunkteinstellung	70
7.3	MOS-Bauelemente. MOS-Feldeffekttransistoren	71
7.3.1	MOS-Kapazität	71
7.3.2	MOS-Feldeffekttransistor. Wirkprinzip	74
7.3.3	Kennlinienmodellierung	75
7.3.4	Kleinsignalmodell	82
7.3.5	SPICE-Modelle	84
7.3.6	Weitere Feldeffekttransistoren	85
7.3.7	MOSFET im Grundstromkreis. Verstärkergrundstufen	89
7.3.8	MOSFET-Grundstufen mit Transistorlast	93
7.4	Schottky-Gate-Feldeffekttransistor	101
7.5	Optoelektronische Halbleiterbauelemente	102
7.5.1	Strahlungsquellen. LED	104
7.5.2	Alphanumerische Anzeigeeinheiten	107
7.5.3	Laserdiode	110
7.5.4	Strahlungsempfänger	113
7.5.5	Optokoppler	116

10 Inhalt

7.6	Integrierte Schaltungen	117
7.6.1	Entwicklungstendenzen integrierter Schaltungen	117
7.6.2	Herstellungsverfahren, Basistechnologie	121
7.6.3	Entwurf	133
7.6.4	Anwenderspezifische ICs (ASICs)	139
7.6.5	Testverfahren	144
	Lernorientierungen, Wiederholungsfragen	145
8	Analoge Systeme	152
8.1	Verstärker	153
8.1.1	Verstärkerarten	154
8.1.2	Grundelemente integrierter Verstärkerstufen	163
8.2	Rückkopplung	168
8.3	Operationsverstärker	176
8.3.1	Prinzip. Aufbau	176
8.3.2	Realer Operationsverstärker	179
8.3.3	Anwendungen des Operationsverstärkers	182
8.4	Phasenregelkreis, PLL	196
	Lernorientierungen, Wiederholungsfragen	200
9	Digitale Grundschaltungen und Systeme	204
9.1	Grundlagen der Digitaltechnik	205
9.1.1	Zahlensysteme	208
9.1.2	Arithmetische Operationen im Dualsystem	222
9.1.3	Codes	227
9.1.4	Schaltsysteme	231
9.1.5	Schaltnetzanalyse und -synthese	255
9.1.6	Zusammenhang Logik – physikalische Größen	259
9.2	Digitale Grundelemente	263
9.2.1	Schaltungsgrundprinzipien	265
9.2.2	Digitale Grundgatter	269
9.2.3	Transferrgatter	274
9.2.4	Kenngrößen digitaler Grundelemente	275
9.3	Schaltungstechniken digitaler Grundglieder. Schaltkreisfamilien	279
9.3.1	Bipolarschaltkreise	283
9.3.2	MOS-Schaltkreise	288
9.3.3	BICMOS-Schaltkreise	295
9.3.4	GaAs-Schaltkreise	295

9.3.5	Leistungsfähigkeit verschiedener Schaltkreisfamilien	298
9.3.6	Pegelumsetzer, Interface-Schaltungen	299
9.4	Komplexe Digitalschaltungen. Schaltnetze	300
9.4.1	Codierer, Code-Umsetzer	301
9.4.2	Multiplexer, Demultiplexer	304
9.4.3	Addierer	307
9.4.4	Vergleicher	313
9.4.5	Arithmetik-Logikeinheit	316
9.4.6	Realisierungsformen von Schaltnetzen (Schaltwerken)	320
9.5	Schaltwerke, Folgeschaltungen	333
9.5.1	Kippschaltungen	334
9.5.2	Flip-Flops mit Zwischenspeicherung. Zweizustandssteuerung .	348
9.5.3	Dynamische Speicherelemente	353
9.6	Komplexe Schaltwerke	354
9.6.1	Die Zustandsmaschine als Modell des Schaltwerkes	355
9.6.2	Beschreibungsmöglichkeiten von Schaltwerken	361
9.6.3	Analyse und Synthese von Schaltwerken	364
9.6.4	Realisierung von Schaltwerken	365
9.7	Zähler und Register	371
9.7.1	Zähler	371
9.7.2	Register	385
9.8	Speicher. Halbleiterspeicher	398
9.8.1	Schreib-/Lesespeicher. RAM	410
9.8.2	Festwertspeicher. ROM, PROM, EPROM, EEPROM	427
9.8.3	Weitere Speicherformen	440
9.8.4	Magnetische Speicher	448
9.8.5	Optische Speicher	458
9.9	Analog-Digital-Signalumwandlung	461
9.9.1	DA-Wandler, DAC	465
9.9.2	AD-Wandler, ADC	477
	Lernorientierungen, Wiederholungsfragen	490
10	Elektrische Kommunikationssysteme	500
10.1	Signale und Systeme	501
10.1.1	Abtastsysteme	503
10.1.2	Z-Transformation	507
10.2	Modulation und Demodulation	515
10.2.1	Amplitudenmodulation	518

12 Inhalt

10.2.2	Winkelmodulation, Frequenz- und Phasenmodulation	526
10.2.3	Sinusträgermodulation durch digital modulierte Signale	532
10.2.4	Pulsmodulation	536
10.3	Filterung	540
10.3.1	Analogfilter	544
10.3.2	Abtastanalogfilter	548
10.3.3	Digitalfilter	551
10.4	Informationsübertragung	558
10.4.1	Ausbreitungsvorgänge auf Leitungen	559
10.4.2	Wellenleiter	583
10.4.3	Lichtwellenleiter	584
10.4.4	Ausbreitung im freien Raum. Funkwellen	591
10.5	Datenkommunikation	592
10.5.1	Datenübertragung, Merkmale	598
10.5.2	Schnittstellen	607
10.5.3	Bussysteme	620
10.5.4	Kommunikationsnetze	646
	Lernorientierungen, Wiederholungsfragen	658
	Literaturverzeichnis	663
	Übungsaufgaben	665
	Lösungen	680
	Sachverzeichnis	698