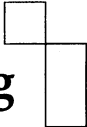


Springer-Lehrbuch

Engineering  **ONLINE LIBRARY**
springeronline.com

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Wolfram Schiffmann · Robert Schmitz

Technische Informatik 1

Grundlagen der digitalen Elektronik

5., neu bearbeitete und ergänzte Auflage

Mit 238 Abbildungen und 39 Tabellen



Springer

Univ.-Prof. Dr. Wolfram Schiffmann
FernUniversität Hagen
Technische Informatik I, Rechnerarchitektur
Universitätsstr. 1
58097 Hagen
Wolfram.Schiffmann@FernUni-Hagen.de

Dipl.-Phys. Robert Schmitz
Universität Koblenz-Landau
Institut für Physik
Universitätsstr. 1
56070 Koblenz
schmitz@uni-koblenz.de

ISBN 978-3-540-40418-7

ISBN 978-3-642-18894-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-18894-7

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

<http://www.springer.de>

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1992, 1993, 1996, 2001 and 2004

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2004

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch 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. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Umschlaggestaltung: design & production, Heidelberg

Satz: Digitale Druckvorlage der Autoren

Gedruckt auf säurefreiem Papier

07/3020/M - 5 4 3 2 1 0

Vorwort zur 5. Auflage

Der vorliegende Band 1 des Buches *Technische Informatik* entstand aus Skripten zu Vorlesungen, die wir an der Universität Koblenz für Informatikstudenten gehalten haben. Es ist unser Anliegen zu zeigen, wie man elektronische Bauelemente nutzt, um Rechnerysteme zu realisieren. Mit dem dargebotenen Stoff soll der Leser in die Lage versetzt werden, die technischen Möglichkeiten und Grenzen solcher Systeme zu erkennen. Dieses Wissen hilft ihm einerseits, die Leistungsmerkmale heutiger Rechnerysteme zu beurteilen und andererseits künftige Entwicklungen richtig einzuordnen.

Jeder, der heute Computer einsetzt, muss aus einem breiten Angebot von Rechnerkomponenten eine Konfiguration auswählen, die seine persönlichen Anforderungen erfüllt und gleichzeitig kostengünstig ist. Die richtige Auswahl anhand der Kenngrößen von Computern und Peripheriegeräten setzt ein solides Grundwissen über deren technische Realisierung voraus. Dieses Grundwissen wird hier vermittelt. Der Stoff ist vom Konzept her auf das Informatikstudium ausgerichtet – aber auch für alle diejenigen geeignet, die Computer einsetzen und sich intensiver mit der Hardware auseinandersetzen möchten. Wir beschränken uns sowohl in den beiden Lehrbüchern als auch in dem zugehörigen Übungsband auf die *Grundlagen* der Technischen Informatik und schließen dabei auch die Grundlagen der Elektronik ein, obwohl diese strenggenommen nicht zur Technischen Informatik gehören. Somit können z.B. auch Elektrotechniker oder Maschinenbauer von dem vorliegenden Text profitieren.

Für die Lektüre genügen Grundkenntnisse in Physik und Mathematik. Die Darstellung des Stoffes erfolgt bottom up, d.h. wir beginnen mit den grundlegenden physikalischen Gesetzen und beschreiben schließlich alle wesentlichen Funktionseinheiten, die man in einem Rechnerystem vorfindet.

Der Stoff wurde auf drei Bände aufgeteilt: Der vorliegende Band 1 *Grundlagen der digitalen Elektronik* führt zunächst in die für die Elektronik wesentlichen Gesetze der Physik und Elektrotechnik ein. Im zweiten Band werden die *Grundlagen der Computertechnik* behandelt. Im *Übungsband* findet man schließlich Aufgaben und Musterlösungen zu dem in den Lehrbüchern dargebotenen Stoff. Im folgenden wird ein Überblick über den Inhalt des vorliegenden ersten Bandes gegeben:

Im ersten Kapitel *Grundlagen der Elektrotechnik* werden Begriffe zur Beschreibung elektrischer und magnetischer Vorgänge eingeführt und durch Experimente veranschaulicht. Diese Begriffe sind notwendig für das Verständnis der Gesetze der Elektrotechnik, der Funktionsprinzipien von Halbleiterbauelementen und Datenträgern auf *ferromagnetischer* und *magneto-optischer* Basis. Auch physikalische Einflüsse bei der Datenübertragung werden mit diesen Begriffen erläutert; z.B. Reflexionserscheinungen auf *langen Leitungen* und *Moden*-Ausbildung bei Lichtwellenleitern. *Halbleiterbauelemente* bilden die technische Voraussetzung für den Bau von Computern. In diesem Kapitel werden Aufbau und Funktion der gebräuchlichsten Bauelemente beschrieben: Bipolar- und Unipolartransistoren (MOS-FETs) und optoelektronische Halbleiterbauelemente.

Die Grundverknüpfungen der Schaltalgebra werden mit *Verknüpfungsgliedern* realisiert. Es werden die elektronischen Konzepte zur Realisierung der Verknüpfungsglieder beschrieben, die zu den verschiedenen Schaltkreisfamilien führten: TTL, ECL, NMOS, PMOS und CMOS.

Mit Verknüpfungsgliedern werden *Schaltnetze* realisiert. Theoretische Grundlage dafür ist die Schaltalgebra. Das Kapitel beginnt mit einer Einführung der Begriffe der Schaltalgebra. Dann werden Funktionseinheiten von Rechenwerken – Codierer, Addierer, Multiplexer – in Analyse und Synthese beschrieben. Verschiedene Realisierungsformen von Schaltnetzen ROM, PROM, EPROM und PAL-Bausteine werden vorgestellt. Zum Schluß wird die Entstehung von Hazards erläutert.

Speicherglieder sind Voraussetzung für den Aufbau von Schaltwerken. In diesem Kapitel wird das Funktionsprinzip von Speichergliedern beschrieben. Nach Wirkung der Eingangsvariablen auf die Ausgangsvariablen und Wirkungsweise des Taktsignals gibt es unterschiedliche Arten von Flipflops, deren Eigenschaften erläutert werden.

Im letzten Kapitel werden einfache *Schaltwerke* behandelt. In Analyse und Synthese werden die Komponenten und die Funktion von Schaltwerken exemplarisch an Beispielen dargestellt. Jedes Schaltwerk ist ein Datenverarbeitungssystem. Auf der Grundlage einfacher Schaltwerke hat sich die Rechnerarchitektur entwickelt.

Bei der Einführung von Begriffen, der Beschreibung der Bauelemente und der Bauglieder wird die Bedeutung und der Einfluß auf die Eigenschaften der Rechnerkomponenten aufgezeigt. Begriffe und Definitionen wurden möglichst nach DIN verwendet; z.B. Verknüpfungsglieder statt Gatter.

Der Band 2 *Grundlagen der Computertechnik* schließt mit den komplexen Schaltwerken an Band 1 an. Ausgehend vom Operationsprinzip des von-Neumann-Rechners werden sowohl CISC- als auch RISC-Architekturen, Kommunikationskanäle, Speicherorganisation und Peripheriegeräte behandelt.

Wir haben uns bemüht, zu den einzelnen Themen nur die grundlegenden Prinzipien auszuwählen und durch einige Beispiele zu belegen. Wir hoffen,

dass es uns gelungen ist, den Stoff klar und verständlich darzustellen. Trotzdem möchten wir die Leser auffordern, uns ihre Ergänzungs- und Verbesserungsvorschläge oder Anmerkungen mitzuteilen. Für die zahlreichen Hinweise zu den ersten vier Auflagen möchten wir uns bei unseren Lesern herzlich bedanken. Wir werden uns auch weiterhin bemühen, ihre Anregungen in nachfolgende Auflagen aufzunehmen.

In der vorliegenden Neuauflage ist der Abschnitt *Vom Addierer zum Prozessor* im Kapitel Schaltwerke neu konzipiert worden. Die Schaltungen in diesem Kapitel können mit HADES (Hamburg Design System) simuliert werden. Beispielentwürfe sind unter der Webadresse zu den Lehrbüchern *Technische Informatik*:

Technische-Informatik-Online.de

zu finden. In den Simulationen werden die Eigenschaften und Fähigkeiten der realen Bauelemente nachgebildet. So wäre es möglich, die Schaltungen, die dort simuliert werden, später in Hardware zu realisieren. Die Simulation ist deshalb ein Bindeglied zwischen der graphischen Darstellung einer Funktionseinheit (z.B. RALU) und ihrer technischen Realisierung.

Unter der angegebenen Webadresse sind weitere Schaltungen zu Schaltnetzen, Speichergliedern und Schaltwerken zu finden. Sie enthält außerdem Links auf weitere nützliche Materialien und Simulationsprogramme zur Digitalelektronik und Computertechnik.

Im Text werden immer dann englischsprachige Begriffe benutzt, wenn uns eine Übersetzung ins Deutsche nicht sinnvoll erschien. Wir denken, dass diese Lösung für den Leser hilfreich ist, da die Literatur über Computertechnik überwiegend in Englisch abgefaßt ist.

Bei der mühevollen Arbeit, das Manuskript mit dem L^AT_EX-Formatiersystem zu setzen, zu korrigieren und Bilder zu zeichnen, wurden wir von Frau Sabine Döring, Frau Christa Paul, Herrn Jürgen Weiland und Herrn Dirk Beerbohm unterstützt. Frau Hestermann-Beyerle und Herrn Dr. Merkle vom Springer-Verlag sei für die gute und freundliche Zusammenarbeit gedankt. Unsere Kollegen Prof. Dr. Alois Schütte und Prof. Dr. Dieter Zöbel ermunterten uns zum Schreiben dieses Textes und gaben uns wertvolle Hinweise und Anregungen. Prof. Dr. Herbert Druxes, Leiter des Instituts für Physik, förderte unser Vorhaben. Herr Dr. Norman Hendrich von der Universität Hamburg unterstützte uns bei der Arbeit mit dem von ihm entwickelten HADES-Simulator. Für ihre Mitarbeit und Unterstützung möchten wir allen herzlich danken.

Auch unseren Familien sei an dieser Stelle für Ihre Geduld und Ihr Verständnis für unsere Arbeit gedankt.

Hagen und Koblenz, im Sommer 2003

Wolfram Schiffmann

Robert Schmitz

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlagen der Elektrotechnik	1
1.1 Historischer Überblick	1
1.2 Elektrische Ladungen und elektrisches Feld	3
1.2.1 Elektrische Ladungen	3
1.2.2 Das Coulombsche Gesetz	6
1.2.3 Das elektrische Feld und der elektrische Fluss	7
1.2.4 Elektrische Spannung und Potential	11
1.2.5 Der Kondensator	14
1.3 Gleichstromkreis	17
1.3.1 Stromstärke	17
1.3.2 Das Ohmsche Gesetz	18
1.3.3 Arbeit und Leistung des elektrischen Stromes	21
1.3.4 Kirchhoffsche Sätze	22
1.3.5 Quellenspannung und Klemmenspannung	32
1.4 Elektromagnetisches Feld	34
1.4.1 Magnetisches Feld elektrischer Ströme	34
1.4.2 Das Durchflutungsgesetz	36
1.4.3 Kraftwirkung magnetischer Felder auf stromdurchflossene Leiter	38
1.4.4 Lorentzkraft und Halleffekt	41
1.4.5 Elektromagnetische Induktion	44
1.4.6 Materie im Magnetfeld	50
1.4.7 Datenspeicher auf magnetischer Basis	52
1.5 Wechselstromkreis	57
1.5.1 Wechselspannung und Wechselstrom	58

1.5.2	Kennwerte von Wechselgrößen	59
1.6	Schaltvorgänge	62
1.6.1	Schaltverhalten an einem Widerstand	62
1.6.2	Schaltverhalten an einer Kapazität	63
1.6.3	Schaltverhalten an einer Induktivität	66
1.7	Datenübertragung	68
1.7.1	Physikalische Darstellung	69
1.7.2	Übertragungsmedien	70
2.	Halbleiterbauelemente	85
2.1	Halbleiterphysik	86
2.1.1	Aufbau der Materie	86
2.1.2	Energiebändermodell	88
2.1.3	Kristallstruktur von Germanium und Silizium	89
2.1.4	Eigenleitfähigkeit	90
2.1.5	Störstellenleitfähigkeit (Dotierte Halbleiter)	91
2.1.6	<i>pn</i> -Übergang	93
2.2	Halbleiterdioden	95
2.2.1	<i>pn</i> -Übergang mit äußerer Spannung	95
2.2.2	Kennlinie des <i>pn</i> -Übergangs	96
2.2.3	Halbleiterdioden mit besonderen Eigenschaften	98
2.3	Optoelektronische Halbleiterbauelemente	100
2.3.1	Kenngrößen der optischen Strahlung	101
2.3.2	Strahlungsempfänger	103
2.3.3	Strahlungssender	106
2.4	Bipolartransistoren	111
2.4.1	Aufbau und Funktionsprinzip	111
2.4.2	Kennlinienfelder	115
2.4.3	Verstärkerschaltung und Arbeitspunkt	117
2.5	Feldeffekttransistoren	119
2.5.1	Sperrschicht-Feldeffekttransistor (FET)	119
2.5.2	Isolierschicht-Feldeffekttransistoren (MOSFET)	119

3. Elektronische Verknüpfungsglieder	125
3.1 Elektronische Schalter	125
3.1.1 Der ideale Schalter	126
3.1.2 Modell eines realen Schalters	126
3.1.3 Bipolartransistor als Schalter	127
3.1.4 Unipolartransistor als Schalter	129
3.1.5 Kenngrößen	130
3.2 Verknüpfungsglieder mit bipolaren Transistoren	135
3.2.1 TTL-Schaltkreise	136
3.2.2 ECL-Schaltkreise	145
3.3 Verknüpfungsglieder mit unipolaren Transistoren	146
3.3.1 PMOS Schaltkreise	147
3.3.2 NMOS Schaltkreise	148
3.3.3 CMOS-Schaltkreise	149
4. Schaltnetze	153
4.1 Schaltalgebra	154
4.1.1 Definition der Booleschen Algebra	155
4.1.2 Schaltalgebra – ein Modell der Booleschen Algebra ...	156
4.2 Schaltfunktionen	157
4.2.1 Definitionen	157
4.2.2 Darstellung	161
4.2.3 Minimierung von Schaltfunktionen	169
4.3 Analyse von Schaltnetzen	177
4.4 Synthese von Schaltnetzen	179
4.5 Code-Umsetzer	180
4.5.1 Schaltnetzentwurf für die 8421-BCD zu 7-Segment Umsetzung	181
4.5.2 Schaltnetzentwurf für die 8421-Dual-Code zu Gray- Code Umsetzung	185
4.5.3 Schaltnetzentwurf für einen Adressdecoder	186
4.6 Addierglieder	187
4.6.1 Halbaddierer	187
4.6.2 Volladdierer	188

4.6.3	Paralleladdierer	190
4.7	Komparatoren	196
4.8	Multiplexer	198
4.9	Arithmetik-Logik Einheit (ALU)	204
4.9.1	Zahlendarstellung und Zweierkomplement	204
4.9.2	Addierer/Subtrahierer	206
4.10	Schaltnetze mit programmierbaren Bausteinen	211
4.10.1	ROM	213
4.10.2	PROM, EPROM	214
4.10.3	PAL	218
4.10.4	PLA	218
4.11	Laufzeiteffekte in Schaltnetzen	219
5.	Speicherglieder	225
5.1	Funktionsprinzip einer bistabilen Kippschaltung	225
5.2	Funktionsprinzip von RAM-Speicherzellen	227
5.3	RS-Kippglied	230
5.3.1	Kippglied aus NOR-Schaltgliedern	231
5.3.2	Kippglied aus NAND-Schaltgliedern	232
5.4	RS-Kippglied mit Zustandssteuerung	236
5.5	D-Kippglied mit Zustandssteuerung	238
5.6	RS-Kippglied mit Zwei-Zustandssteuerung	240
5.7	JK-Master-Slave-Kippglied	244
5.8	Master-Slave T-Kippglied	246
5.9	Kippglieder mit Taktflankensteuerung	247
5.9.1	Taktflankensteuerung durch RC-Differenzierglieder	248
5.9.2	Taktflankensteuerung realisiert durch Verknüpfungsschaltungen	248
5.10	Zusammenfassung	252

6. Schaltwerke	255
6.1 Automaten	256
6.2 Funktionelle Beschreibung von Schaltwerken	259
6.3 Analyse von Schaltwerken	261
6.3.1 Beispiel 1	261
6.3.2 Beispiel 2	263
6.4 Synthese von Schaltwerken	265
6.4.1 Beispiel 1: Umschaltbarer Zähler	266
6.4.2 Beispiel 2: Schieberegister als Schaltwerk	268
6.5 Realisierung von Schaltwerken	272
6.5.1 Schaltwerke mit diskreten Baugliedern	273
6.5.2 Schaltwerke mit programmierbaren Logikbausteinen ..	274
6.6 Vom Addierer zum Prozessor	277
6.6.1 4-Bit Paralleladdierer	278
6.6.2 Arithmetisch-Logische Einheit mit Registern (RALU) ..	279
6.6.3 RALU mit Eingabeeinheit, Ausgabeeinheit und Da- tenbus	282
6.6.4 RALU mit Leitwerk	284
6.6.5 RALU und Leitwerk mit RAM	288
6.6.6 Der Miniprozessor	292
7. Integrierte Schaltungen	297
7.1 Schaltungsentwurf	298
7.1.1 Entwurfsebenen	299
7.1.2 Darstellung	301
7.1.3 Werkzeuge und Entwurfsschritte	302
7.1.4 ASICs	305
7.2 Herstellung	315
7.2.1 Herstellung der Siliziumscheibe (Wafer)	318
7.2.2 Herstellung der Masken	318
7.2.3 Scheibenprozesse	319
7.2.4 Test	328
7.2.5 Montage	330
Abkürzungen	333

Schaltzeichen für binäre Verknüpfungsglieder	335
Literaturverzeichnis	336
Sachverzeichnis	341

Auszug des Inhalts der vierten Auflage von Band 2

1. Komplexe Schaltwerke
2. von NEUMANN-Rechner
3. Hardware-Parallelität
4. Prozessorarchitektur
5. CISC-Prozessoren
6. RISC-Prozessoren
7. Aktuelle Computersysteme
8. Kommunikation
9. Speicher
10. Ein-/Ausgabe und Peripheriegeräte