

8664684

Georg Durcansky

Digitaltechnik

Eine Einführung
in Logik, Schaltkreise, Systemaufbau

Zweite, neu gestaltete Auflage



D2
(2)

8664684

Georg Durcansky

Digitaltechnik

Eine Einführung
in Logik, Schaltkreise, Systemaufbau

Zweite, neu gestaltete Auflage



Dr. Georg Durcansky
Mittelstr. 33
D-5161 Merzenich-Girbolstath

1. Auflage 1975 („Digitale Elektronik“)
2., neu gestaltete Auflage 1983

Dieses Buch enthält 224 Abbildungen und 15 Tabellen.

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Durcansky, Georg:

Digitaltechnik: e. Einf. in Logik, Schaltkreise, Systemaufbau /

Georg Durcansky. – 2., neu gestaltete Aufl. –

Weinheim: Physik-Verlag, 1983.

1. Aufl. u. d. T.: Durcansky, Georg: Digitale Elektronik

ISBN 3-87664-067-9



© Physik-Verlag GmbH, D-6940 Weinheim, 1983.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into foreign languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprint, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Druck: betz-druck gmbh, D-6100 Darmstadt

Bindung: Wilh. Osswald + Co., D-6730 Neustadt

Printed in the Federal Republic of Germany

Vorwort zur 2. Auflage

Die sich überstürzende Entwicklung der Mikroelektronik und die Vielfalt an preiswerten Mikroprozessoren, Halbleiterspeichern und anderen „intelligenten“ Schaltkreisen führen dazu, daß diese Komponenten immer stärker zur Bewältigung relativ einfacher Aufgaben eingesetzt werden. Durch die gleichzeitige Verwendung der peripheren Geräte der Datenverarbeitung (Drucker, Bildschirmgeräte, Massenspeicher) entsteht eine untrennbare Verbindung zwischen der Digitaltechnik und der Datenverarbeitungstechnik. Zum Verständnis der Digitaltechnik sind damit erweiterte Grundlagen nötig. Die Absicht, diese Grundlagen zu vermitteln, zwang zur Umarbeitung dieses Werkes und zur Änderung des Titels (vormals „Digitale Elektronik“), unter Beibehaltung der ursprünglichen Zielsetzung.

Der Hardware und Software von Rechnern ist jetzt ein eigenes Kapitel gewidmet, mit dem Schwerpunkt auf dem Mikrorechner und seinen Komponenten. Der Abschnitt über Halbleiterspeicher wurde neu geschrieben und auf den neuesten Stand – bis zum elektrisch löschbaren Schaltkreis – gebracht. Daneben wurde der Abschnitt über Magnetspeichersysteme wesentlich erweitert. Neue Inhalte sind die Behandlung der Kommunikation zwischen peripheren Komponenten, wozu Probleme des Spannungspegels, der Leitungsführung, des Datenaustausch-Protokolls sowie der Fehlererkennung und Fehlerkorrektur gehören. Neu eingebracht wurden Betrachtungen über die Lebensdauer und die Ausfallhäufigkeit von Bauelementen und eine kurze Beschreibung der wichtigsten Meßgeräte für die Digitaltechnik. Daneben wurde überall versucht, die Information über Existenz und Funktionsweise von speziellen Schaltungen und Schaltkreisen auf den aktuellen Stand zu bringen. Neu aufgenommen wurde auch die Einführung der neuen AS-, F- und ALS-TTL-Reihen, sowie die B-Serie und die HC- und HCT-Reihen in CMOS.

Nach einer kurzen Einleitung behandeln die Kapitel 2 und 3 die Darstellung und Verknüpfung von digitalen Größen. Die Codierungen sowie die logischen Schaltsymbole und ihre Wirkungen werden hier erklärt. Im Kapitel 4 werden die elektronischen Bauelemente und ihre Schaltungen besprochen, sofern sie für die Anwendung in der Digitaltechnik oder für das Verständnis der Funktionsweise der integrierten Schaltkreise nötig sind. Kapitel 5 beschreibt die Spezifikationen und die Arbeitsweise der heute gebräuchlichen Logikfamilien. Der Schwerpunkt liegt hier auf den TTL- und den CMOS-Reihen. Im Kapitel 6 werden einige wichtige Schaltungstypen mit Verknüpfungen vorgestellt, z.B. der Codierer, der Multiplexer und die Additionsstufe. Kapitel 7 behandelt die Speicherelemente, die vom Flip-Flop über Zähler und Schieberegister bis zum Halbleiter- und Massenspeicher reichen. Im Kapitel 8 wird die Wirkungsweise von Oszillator- und anderen Zeitschaltungen erklärt. Danach werden Meßschaltungen für Uhrzeit und Frequenz vorgeführt. Kapitel 9 befaßt sich mit Schnittstellen zur Umwelt. Hier findet man die Wandlung zwischen analogen und digitalen Signalen, die Elemente zur Positionierung, sowie optische Anzeigen, Schalter, Tastaturen, Drucker und Plotter als Schnittstellen zum Menschen. Kapitel 10 enthält elementares über Leitungen und Busse sowie über Übertragungsprotokolle. Die V.24-Schnittstelle und der IEC-Bus werden hier gesondert besprochen. Im Kapitel 11 werden die elektrischen Störungen und die Ausfälle von Bauelementen behandelt und es wird gezeigt, wie Übertragungsfehler erkannt oder korrigiert werden können. Kapitel 12 befaßt sich mit dem digitalen Rechner, insbesondere mit dem Aufbau und der Funktionsweise von Mikroprozessoren, und weist auf die Strukturen, Anforderungen und Probleme der

Software hin. Im letzten Kapitel werden die wichtigsten Meßgeräte für die digitale Elektronik und ihre Wirkungsweise erwähnt.

Nach jedem Kapitel finden sich Hinweise auf die zugehörige Literatur. Der Anhang enthält Informationen über Codes, Normungen, Abkürzungen, Schaltzeichen, Schaltkreistypen und Bauelemente-Hersteller, die für die Einarbeitung und für die Praxis wertvoll sein können.

Merzenich, im Oktober 1982

Georg Durcansky

Aus dem Vorwort zur 1. Auflage

Diese Einführung in die digitale Elektronik entstand aus dem Bedürfnis nach einem Werk, das Mathematikern, Informatikern, Physikern, Chemikern, Medizinern, Biologen und Studierenden der elektrotechnischen Berufe die Möglichkeit bietet, sich über die Grundlagen dieses Zweiges der Elektronik zu informieren. Sie ist vor allem für solche Interessenten geschrieben worden, die sich auf dem digitalen Sektor praktisch betätigen wollen und daher in die Grundlagen der Schaltungs- und Gerätetechnik eingeführt werden möchten. Vorausgesetzt werden dabei nur die allgemeinen Gesetze des elektrischen Stromes und die Rechenregeln der Algebra. Spezialausdrücke werden im Text weitgehend erklärt.

Es wird hier nicht versucht, den umfangreichen Stoff lückenlos darzustellen. Vielmehr werden die einzelnen Teilgebiete und Probleme nach Schwerpunkten so behandelt, wie sie auch in der praktischen Anwendung vorkommen. Es wird angestrebt, den Sprung zwischen Theorie und Praxis anschaulich zu vollziehen und dem Leser das Verständnis der Grundzusammenhänge so zu vermitteln, daß er sich danach auch in der weiterführenden Spezialliteratur zurechtfindet. Besonderer Wert wird auf die Beschreibung des heutigen Standes der Technik – unter besonderer Berücksichtigung der verfügbaren integrierten Logikfamilien – gelegt.

Jülich, im September 1974

Inhalt

- 1 Einleitung 1
- 2 Die Zahlensysteme und ihre Darstellung 3
 - 2.1 Die Darstellung der digitalen Information 3
 - 2.2 Das duale Zahlensystem 4
 - 2.2.1 Herleitung 4
 - 2.2.2 Die Umwandlung zwischen Dezimal- und Dualcode 5
 - 2.2.3 Die Addition 6
 - 2.2.4 Die Subtraktion 6
 - 2.2.5 Die Multiplikation und Division 9
 - 2.2.6 Gleitkommadarstellung von Zahlen 10
 - 2.3 Andere binäre Codes 11
 - 2.3.1 Der BCD-Code (8-4-2-1-Code) 11
 - 2.3.2 Der Gray-Code 14
 - 2.3.3 Der Exzeß-3-Code (Stibitz-Code) 14
 - 2.3.4 Der Aiken-Code (2-4-2-1-Code) 15
 - 2.4 Das oktale und das hexadezimale Zahlensystem 16
 - 2.5 Codes für Datenverarbeitungs- und Prozeßsteuerungsgeräte 16
- 3 Binäre Verknüpfungen und Boole'sche Algebra 18
 - 3.1 Die Verknüpfung als Sonderfall einer Transformation 18.
 - 3.2 Die logische Inversion (NICHT-Verknüpfung) 19
 - 3.3 Logische Verknüpfungen zwischen zwei Variablen 20
 - 3.3.1 Mögliche Verknüpfungsarten 20
 - 3.3.2 Die UND-Verknüpfung 21
 - 3.3.3 Die NAND-Verknüpfung 24
 - 3.3.4 Die ODER-Verknüpfung 24
 - 3.3.5 Die NOR-Verknüpfung 26
 - 3.3.6 Inversion vor Verknüpfungen (Implikation) 27
 - 3.3.7 Die Exklusiv-ODER-Verknüpfung (Antivalenz) 28
 - 3.3.8 Die Exklusiv-NOR-Verknüpfungen (Äquivalenz) 29
 - 3.4 Das Dualitätsprinzip (Morgan'sche Regel) 30
 - 3.5 Logische Verknüpfungen zwischen 3 und mehr Variablen 30
 - 3.6 Reduktion der Darstellung von Funktionen 32
 - 3.6.1 Die Rechenregeln der Boole'schen Algebra 32
 - 3.6.2 Problemstellung der Reduktion 34
 - 3.6.3 Die Karnaugh-(Veitch)-Darstellung 35
 - 3.6.4 Das Quine-Mc Cluskey-Verfahren (QMC) 37
 - 3.7 Schwellwert-Logikelemente 37
 - 3.7.1 Allgemeine Verknüpfungsvorschrift 37
 - 3.7.2 Die Majoritätslogik 38
 - 3.7.3 Das gerade und das ungerade Verknüpfungsglied 39

4 Bauteile und diskrete Schaltungen

- 4.1 Der Widerstand 40
- 4.2 Der Kondensator (Kapazität) 42
- 4.3 Die Aufladung eines Kondensators mit konstantem Strom 43
- 4.4 Die Widerstands-Kondensator-Schaltung (RC-Glied) 43
- 4.5 Die Diode (Gleichrichter) 46
- 4.6 Die Widerstand-Dioden-Schaltung 47
 - 4.6.1 Allgemeine Wirkungsweise 47
 - 4.6.2 Die Diode als digitales Verknüpfungsglied 48
- 4.7 Der Transistor 50
 - 4.7.1 Der bipolare Transistor und seine Grundschaltungen 50
 - 4.7.2 Der Feldeffekt-Transistor und seine Grundschaltungen 53
- 4.8 Logische Verknüpfungen mit Einzeltransistoren 55
 - 4.8.1 Die Inversion 55
 - 4.8.2 Das NAND- und das NOR-Glied 57

5 Die integrierten digitalen Schaltkreise

- 5.1 Der Grad der Integration 59
- 5.2 Gehäusetypen und Bezeichnungsweise von Funktionseingängen 59
- 5.3 Die Logikfamilien 61
 - 5.3.1 Die TTL-Familie 61
 - 5.3.1.1 Aufbau und Eigenschaften 61
 - 5.3.1.2 Die verschiedenen TTL-Reihen 65
 - 5.3.2 Die LSL-Familie 67
 - 5.3.3 Die ECL-Familie 68
 - 5.3.4 Die CMOS-Logikfamilie 71
 - 5.3.4.1 Aufbau und Eigenschaften 71
 - 5.3.4.2 Die verschiedenen CMOS-Reihen 76
- 5.4 Die Vielfalt von Bausteinfunktionen 77
 - 5.4.1 Puffer/Treiber 77
 - 5.4.2 Phantomverknüpfung und Tri-State-Ausgang 78
 - 5.4.3 Der Schmitt-Trigger 80
 - 5.4.4 Gatter-Felder (Gate-Arrays) 80
 - 5.4.5 Schwellwert-Logikbausteine 83
 - 5.4.6 Kopplung von Schaltkreisen verschiedener Logikfamilien 83

6 Schaltungen mit logischen Verknüpfungen

- 6.1 Codierer, Decodierer, Umcodierer 85
- 6.2 Die Erzeugung von Vielfachgattern 87
 - 6.2.1 Die Kaskadierung mit normalen Gattern 88
 - 6.2.2 Die Kaskadierung mit „Expander“-Gattern 89
- 6.3 Multiplexer, Demultiplexer 90
- 6.4 Der digitale Vergleich (Komparator) 91
- 6.5 Die Prioritätswahl (Prioritäts-Encoder) 94

- 6.6 Die Addierschaltung 95
 - 6.6.1 Die duale Addition 95
 - 6.6.2 Die duale Subtraktion 96
 - 6.6.3 Die Addition im BCD-Code 96
 - 6.6.4 Die BCD-Dual-Wandlung 98

- 7 Digitale Speicherelemente
 - 7.1 Das Flip-Flop 100
 - 7.1.1 Das RS-Flip-Flop 100
 - 7.1.2 Die dynamische Ansteuerung 102
 - 7.1.3 Das Master-Slave-Verhalten 103
 - 7.1.4 Das D-Flip-Flop 104
 - 7.1.5 Das JK-Flip-Flop 105
 - 7.1.6 Die Untersetzerschaltung (T-Flip-Flop) 106
 - 7.2 Grundschaltungen 107
 - 7.2.1 Der Parallelspeicher (Register) 107
 - 7.2.2 Das Schieberegister 108
 - 7.2.3 Der Frequenzuntersetzer 110
 - 7.2.3.1 Der duale Untersetzer 110
 - 7.2.3.2 Untersetzer von nichtdualen Teilungsverhältnissen 111
 - 7.2.4 Der Zähler 113
 - 7.2.4.1 Der dual codierte Zähler 113
 - 7.2.4.2 Der dekadische (BCD-)Zähler 113
 - 7.2.4.3 Die Kaskadierung von Zählereinheiten 114
 - 7.2.4.4 Der ladbare Vorwärts-/Rückwärts-Zähler 115
 - 7.2.4.5 Der dynamische BCD-Dual-Wandler 116
 - 7.3 Speichersysteme 117
 - 7.3.1 Vielfalt von Speicherelementen 117
 - 7.3.2 Schreib- und Lesespeicher (RAM) 119
 - 7.3.2.1 Der statische RAM 119
 - 7.3.2.2 Der dynamische RAM 121
 - 7.3.3 Festwertspeicher 122
 - 7.3.3.1 Der ROM 122
 - 7.3.3.2 Der PROM 123
 - 7.3.3.3 Der EPROM 123
 - 7.3.3.4 Der EEPROM bzw. EAROM 124
 - 7.3.4 Serienspeicher 124
 - 7.3.4.1 Allgemeine Schaltungen 124
 - 7.3.4.2 Der FIFO 126
 - 7.3.5 Der Kernspeicher 126
 - 7.3.6 Magnetische Massenspeicher 127
 - 7.3.6.1 Magnetblasenspeicher (Bubble Memory) 128
 - 7.3.6.2 Magnetbandspeicher 129
 - 7.3.6.3 Magnetplattenspeicher 131

8 Erzeugung von zeitabhängigen Signalen

- 8.1 Die Erzeugung von periodischen Impulsen 134
 - 8.1.1 Periode, Phase, Tastverhältnis 134
 - 8.1.2 Die Schwingungserzeugung 135
 - 8.1.3 Der RC-Oszillator 136
 - 8.1.4 Quarz-Oszillatoren 138
 - 8.1.5 Getastete Oszillatoren 140
 - 8.1.6 Spannungsgesteuerte Oszillatoren 140
 - 8.1.7 Oszillatorschaltungen mit integrierten Zeitgeber-Bausteinen 141
 - 8.1.8 Synchronisierbarer Oszillator (Phasenregelkreis/PLL) 142
- 8.2 Die Erzeugung von Einzelimpulsen von definierter Zeitdauer 144
 - 8.2.1 Die digitale Aufbereitung von Pulslängen 144
 - 8.2.2 Der Univibrator 145
- 8.3 Meßschaltungen für Zeit, Frequenz, Impulsdauer 147
 - 8.3.1 Die Zeitmessung 147
 - 8.3.2 Die Frequenz- und Impulsdauer-Messung 150

9 Schnittstellen zur artfremden Umwelt

- 9.1 Die Wandlung zwischen analogen und digitalen Größen 152
 - 9.1.1 Der DA- und der AD-Wandler 152
 - 9.1.2 Spannungs-Frequenz- und Frequenz-Spannungs-Wandler 155
- 9.2 Optische Darstellung von Information 155
 - 9.2.1 Lichtsender und ihre Anwendung 156
 - 9.2.1.1 Undifferenzierte Lichtquellen 156
 - 9.2.1.2 Die Anzeige von Ziffern 157
 - 9.2.1.3 Die Darstellung mit einer Punkte-Matrix 159
 - 9.2.1.4 Die Darstellung auf einem Bildschirm 160
 - 9.2.2 Lichtempfänger 161
 - 9.2.3 Optokoppler 162
- 9.3 Aufnahme und Abgabe mechanischer Information 163
 - 9.3.1 Schalter, Taster, Relais 163
 - 9.3.2 Positionsgeber 165
 - 9.3.3 Ausführung von mechanischer Bewegung 166
 - 9.3.4 Drucker, Plotter 168

10 Grundzüge digitaler Kommunikation

- 10.1 Eigenschaften von Leitungen 170
 - 10.1.1 Die Induktivität 170
 - 10.1.2 Wellenwiderstand von Leitungen und Reflexion von Signalen 171
- 10.2 Leitungstypen 173
 - 10.2.1 Kupferleitungen 173
 - 10.2.2 Lichtwellenleiter (LWL) 174
- 10.3 Der Verkehr zwischen mehreren Stationen 175
 - 10.3.1 Leitungstreiber und Leitungsempfänger 175
 - 10.3.2 Betriebsarten 177
 - 10.3.3 Netzstrukturen 178
 - 10.3.4 Übertragungspegel und Übertragungsraten 178

10.4	Die Übertragung von Information	179
10.4.1	Übertragungsformate	179
10.4.2	Die synchrone Übertragung	180
10.4.3	Die asynchrone Übertragung	182
10.4.4	Übertragungsstandards	183
10.4.4.1	Übersicht	183
10.4.4.2	Die V.24- und 20-mA-Schnittstellen	184
10.4.4.3	Der IEC-625- bzw. IEEE-488-Bus	185
11	Störungen	
11.1	Elektrische Störungen	188
11.1.1	Das Bezugspotential	188
11.1.2	Die Versorgungsspannungen	190
11.1.3	Störungen über das Netz	191
11.1.4	Störstrahlung	192
11.1.5	Das Übersprechen bei Signalleitungen	192
11.2	Zuverlässigkeit von Bauelementen und Schaltungen	194
11.3	Fehlerbehandlung	196
11.3.1	Redundante Schaltungen	196
11.3.2	Fehlererkennung und -korrektur durch Codierung	198
11.3.2.1	Das Paritätsbit	198
11.3.2.2	Zyklisch redundante Codes (CRC)	200
12	Der digitale Rechner	
12.1	Die Hardware	202
12.1.1	Struktur und Funktionsweise des Rechners	202
12.1.2	Die Peripherie	204
12.1.3	Der DMA-Transfer	206
12.1.4	Die Unterbrechung (Interrupt)	206
12.1.5	Integrierte Rechnerschaltkreise	207
12.2	Die Software	210
12.2.1	Der Maschinen- und der Assembler-Code	210
12.2.2	Höhere Programmiersprachen	211
12.2.3	Das Betriebssystem	213
12.2.4	Programmiertechniken	215
13	Meßgeräte für die Digitaltechnik	
	Literatur	219
Anhang:	A Die Potenzen von 2	221
	B Multiplikatoren für Einheiten	221
	C Der 7-Bit-Code nach DIN 66003 (Tastatur-Code)	222
	D Schaltbilder der wichtigsten logischen Elemente	224
	E Schaltzeichen der wichtigsten elektronischen Bauelemente	224
	F Physikalische Größen und Einheiten	225

- G Farbkennzeichnung von Bauelemente-Werten 225
- H Werte der Normreihe für passive Bauelemente und ihre Bezeichnungsweise in Schaltplänen 226
- I Kurzdaten von typischen Schalttransistoren 226
- K Wichtige DIN-Spezifikationen für die Digitaltechnik 227
- L Pinbelegung und Typenbezeichnung einiger vielbenutzter TTL- und CMOS-Schaltkreise 228
- M Die wichtigsten Hersteller von Halbleiter-Bauelementen für die Digitaltechnik 229
- N Stabilisierte Stromversorgung für digitale Anwendungen 229
- O Abkürzungen 230

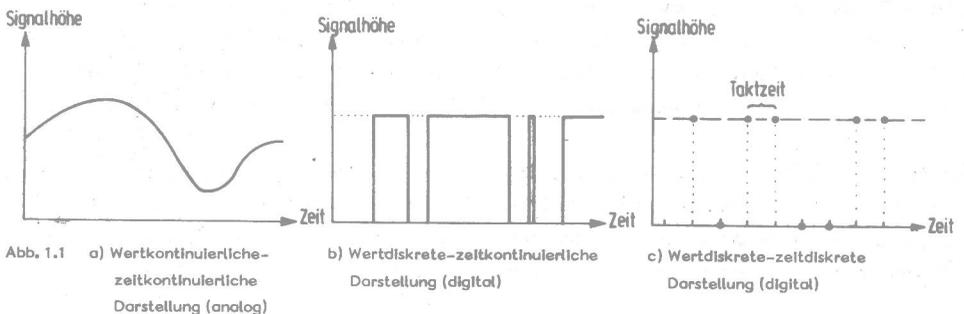
Stichwortverzeichnis 231

1 Einleitung

Zur Erfassung und zur Bewältigung der uns heute erdrückenden Informationsflut und zur Überwachung der immer komplexer werdenden Steuer- und Regelvorgänge in Technik, Wissenschaft, Betriebsführung und Politik bedient man sich immer mehr der Elektronik, wobei ihr digitaler Zweig durch seinen bedeutendsten Vertreter, den Computer, eine besondere Stellung einnimmt.

Die Elektronik bietet uns heute die einfachste Art, eine Information zu erfassen (zu speichern, anzuzeigen) oder sie zu verarbeiten (in Abhängigkeit zu anderen Größen zu setzen). Dabei ist es nicht notwendig, daß die ursprüngliche Größe eine unmittelbar elektrische Größe ist, denn man kann alle interessierenden Informationen oder physikalischen Größen durch ein geeignetes Eingabegerät oder einen Wandler in elektrische Information umwandeln.

Die Wandler physikalischer Größen liefern meistens elektrische Signale, deren *Amplitude* dem Wert der physikalischen Größe proportional ist. So liefert beispielsweise ein Thermoelement eine Spannung, deren Höhe dem Wert der am Element herrschenden Temperatur entspricht. Ändert sich diese Temperatur, so ändert sich auch die Spannung im gleichen Maße. Dieser Zusammenhang wird in Abb. 1.1a dargestellt. Dabei ist jedem Zeitpunkt ein Spannungswert zugeordnet, der alle möglichen Zwischenwerte annehmen kann. Es liegt eine wert- und zeitkontinuierliche oder analoge Darstellung vor. Anders ist es beispielsweise bei einer Lichtschranke bei der Aufgabe, auf einem Fließband zu beliebigen Zeiten ankommende Bauteile zu zählen. Hier besitzt das abgegebene elektrische Signal einen beliebigen aber festen Spannungswert, bei dem es aber lediglich auf sein Auftreten, nicht jedoch auf seine Höhe ankommt. Die relevante Information liegt in der Anzahl dieser Signale. Wir haben es mit einem wertdiskreten-zeitkontinuierlichen Vorgang gemäß Abb. 1.1b zu tun. Diese Signale werden meistens als digital bezeichnet.



Der Begriff *digital* wird hergeleitet vom lateinischen Wort "digitus" (= Finger) und deutet darauf hin, daß hier (ähnlich wie beim Abzählen mit Fingern) nur Änderungen von ganzen Zuständen möglich sind. Als digital bezeichnet man die Darstellung einer Information durch einen vereinbarten Satz von Zeichen, die mit der darzustellenden Größe durch irgendeinen Zusammenhang verknüpft sind. Solche Zeichen liegen beispielsweise in dem gewohnten Dezimalsystem

(0, 1, 2, 3, ...) vor. Wesentlich ist, daß ein Abzählen in Sprüngen von 1 erfolgt.

In der digitalen Elektronik beschränkt man sich in der Regel auf zwei Zeichen, denen zwei Wertebereiche, z. B. der Spannung oder des Stromes, zugeordnet sind. Man spricht dann von den zwei logischen Zuständen oder logischen Werten. Ein digitales System, bei dem jede "Leitung" zwei verschiedene logische Werte annehmen kann, bezeichnet man als ein binäres System (nicht zu verwechseln mit dem dualen Zahlencode (vgl. Abschn. 2.2.1)). Die binären logischen Werte sind in der Elektronik besonders einfach festzulegen, wenn man als den einen Wert die Spannung 0 V und als den anderen Wert die Höhe der Versorgungsspannung nimmt. Dann liegt an einem Draht, je nachdem, ob man ihn an die Versorgungsspannung zuschaltet, entweder eine Spannung an oder nicht - "ja" oder "nein". Diese zwei logischen Werte wollen wir in Zukunft als 0 und 1 bezeichnen, unabhängig vom Wert der ihnen zugeordneten physikalischen Größe. Wir müssen also unterscheiden zwischen einem logischen Wert (0,1) und einem logischen Pegel einer physikalischen Größe. Diese physikalische Größe ist meistens die Spannung, deren Wert jedoch bei den verschiedenen käuflichen logischen Bausteinreihen (Logikfamilien; vgl. Kap. 5) unterschiedlich sein kann. Nach DIN 41785-4 sind für die Bezeichnungen der logischen Pegel einheitliche, symbolische Buchstaben L (Low) und H (High) festgelegt worden. H soll demjenigen der beiden Spannungspegel zugeordnet sein, der näher an $+\infty$ liegt *). Wenn wir die logische 1 dem Pegel H zuschlagen, so sprechen wir von positiver Logik, im umgekehrten Fall ist die Logik negativ (vgl. Abschn. 3.4). In der Folge wird, wenn nicht anders vermerkt, die positive Logik stillschweigend vorausgesetzt.

Was den zeitlichen Ablauf eines digitalen Signals betrifft, so kann dieser sowohl zeitkontinuierlich oder zeitdiskret vorliegen (vgl. Abb. 1.1b und 1.1c). Der zeitkontinuierliche Vorgang läuft dann ab, wenn die Schaltung ständig "empfindlich" ist, d. h. wenn der Sprung zwischen zwei logischen Zuständen unmittelbar ereignisgesteuert auftritt. Der zeitdiskrete Vorgang liegt dann vor, wenn nur anlässlich eines inneren Taktsignals auf bestimmte Ereignisse oder Zustände reagiert wird, also wenn beispielsweise vom Computer nur 10 Mal pro Sekunde nach dem Zustand einer Lichtschranke "nachgesehen" wird. Hier kann also zwischen dem Ereignis selbst und seiner Erfassung eine Zeitverschiebung bis zur Größe des Abtast-Rasters liegen. Dieser Taktabstand muß aber nicht zwangsläufig unveränderlich sein.

Während sich bei der analogen Darstellung der Wert einer Größe aus der Höhe der (z. B.) Spannung angeben läßt, stellen die auf der Basis der diskreten Elektronik arbeitenden Geräte alle Größen und Zusammenhänge durch Kombination zweier logischer Werte dar. Dieses erfordert ein Zahlensystem, das wir uns im nächsten Abschnitt ansehen wollen.

*) Eine zwischenzeitlich angewandte Schreibweise mit den Zeichen L und 0 hat sich nicht durchgesetzt.

2 Die Zahlensysteme und ihre Darstellung

2.1 Die Darstellung der digitalen Information

Eine digitale Leitung (Draht), die wir z. B. zur Informationsübertragung benutzen, kann nur den logischen Wert 0 oder 1 besitzen. Will man mehr Information übertragen, so benötigt man (wie man zum Zählen mit Fingern mehrere Finger benötigt) mehrere Leitungen. So kann z. B. eine Leitung die Information übertragen, daß ein bestimmtes Gerät eingeschaltet ist, eine andere Leitung die Information übermitteln, daß der Meßwert eines anderen Gerätes einen Grenzwert überschritten hat. Wollen wir noch mehr Information übertragen, so benötigen wir noch mehr Leitungen. In der digitalen Elektronik, in der Programmieretechnik und in der Informationstheorie bezeichnet man eine solche Informationseinheit, die die Form von zwei möglichen Zuständen enthält, als ein *Bit* (engl.: *binary digit*). In einer Anordnung zur Informationsübertragung bezeichnet man die Summe der Leitungen selbst als den Datenbus oder einfach Bus (engl.: *bus*), die Summe der Informationsbits als das Datenwort. Ein besonders häufig verwendetes Wort von 8-Bit hat den eigenen Namen *Byte* erhalten.

Will man durch eine Datenleitung, die aus mehreren Bits besteht, ein Datenwort übertragen, z. B. die Zahl 4, so könnte man jeder einzelnen nummerierten Leitung einen um 1 höheren Wert zuweisen und bei der Informationsübertragung diese Bit-Nummer auf 1 legen, die übrigen Bits auf 0 lassen. Dieses Verfahren wird wegen der geringen Informationsdichte der Übertragung nur in Sonderfällen angewendet. Um die Zahl 987 darzustellen, müßten wir nach diesem Verfahren mindestens 987 Leitungen besitzen. Davon wären aber mindesten 986 mit 0, und nur eine wäre mit 1 belegt. Diese Darstellung besitzt ein hohes Maß an überflüssiger Information.

Wollen wir die Informationsdichte unserer Darstellung erhöhen, so müssen wir unsere Darstellung codieren. Wie dies geschehen kann, sehen wir am besten an den uns bekannten Dezimalzahlen. Dort haben wir pro "Bit" 10 Zustände, die Zahlen 0 . . . 9. Wenn wir bei einer Dezimalzahl ein "Bit" verändern oder weglassen, so ändert sich unsere Zahl in jedem Fall (außer bei führenden Nullen). Wir haben hier eine codierte Darstellung vorliegen. Diese Codierung besteht darin, daß man einem jeden Bit nicht nur einen Zahlenwert (0 . . . 9) zuweist, sondern, daß er auch einen fest zugeordneten Stellenwert besitzt. Die dezimale Zahl 2879 bedeutet $2 \cdot 1000 + 8 \cdot 100 + 7 \cdot 10 + 9 \cdot 1$. Der Zahlenwert ist hier 2, 8, 7, 9, der Stellenwert ist 1000, 100, 10, 1. Für die richtige Übertragung und Darstellung dieser Information benötigen wir alle "Bits", und jedes Weglassen auch nur eines "Bits" würde zu einer falschen Information führen.

In der Informationstheorie bezeichnet man das Maß des Überflusses an Information in einer bestimmten Darstellung, als die *Redundanz*. Die Größe der Redundanz wird angegeben als die Differenz zwischen der Anzahl der wirklich benötigten Bits zur Darstellung einer Information und der Anzahl der Bits, die man benötigen würde, wenn man diese Information in einer reencodierten Form bringen würde. Die reencodierte Form liegt, wie bei unseren Dezimalzahlen, dann vor, wenn in ihr keine überflüssige Information enthalten ist. In einer reencodierten Darstellung ist die Redundanz 0. In unserem obigen Beispiel bei der Darstellung der Zahl 987 hatten wir eine sehr hohe Redundanz, weil wir dort auf 986 0-führende Bits verzichten könnten, ohne den Wert der Information zu verändern.

2.2 Das duale Zahlensystem

2.2.1 Herleitung

Auch im Fall der binären digitalen Information können wir eine Codierung finden, bei der die Redundanz verschwindet. Wir machen es wie bei den Dezimalzahlen: wenn dort an einer Stelle die höchstmögliche Ziffer erreicht ist und eine 1 dazuaddiert wird, so geht der Inhalt wieder auf 0 zurück, und die nächsthöhere Stelle wird um 1 erhöht (Übertrag); z. B. $19+1=20$.

Die uns in der binären Darstellung verfügbaren Werte 0 und 1 wollen wir zur Darstellung der Zahlenwerte 0 und 1 benutzen. Zur Darstellung der Zahl 2 benötigen wir bereits ein zweites Bit. Mit dem ersten und diesem zweiten Bit können wir nun die Zahlen 0 ... 3 darstellen: $0=0 \cdot 2+0 \cdot 1$; $1=0 \cdot 2+1 \cdot 1$; $2=1 \cdot 2+0 \cdot 1$; $3=1 \cdot 2+1 \cdot 1$. Zur Vereinfachung der Schreibweise wählen wir eine Konvention wie im dezimalen Zahlensystem und schreiben nur die Zahlenwerte hin, unter der Annahme, daß sie mit dem jeweiligen Stellenwert multipliziert werden: $0=00$; $1=01$; $2=10$; $3=11$ (links steht die dezimale, rechts unsere neue Schreibweise).

Zur Darstellung der Zahl 4 benötigen wir ein neues Bit: $4=100$. Damit können wir die Zahlen 0 bis 7 (= 111) darstellen. Wenn wir weiter so fortfahren, so stellen wir fest, daß wir je ein neues Bit mit dem Stellenwert 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 usw. einführen mußten - das sind die Potenzen von 2 (vgl. Anhang A) (wie es beim Dezimalsystem 1, 10, 100, 1000 usw. die Potenzen von 10 sind). Wir haben uns damit das *duale* Zahlensystem geschaffen.*)

Aus der Abb. 2.1 sehen wir die Zuordnung zwischen dezimalen und dualen Zahlen und die Gesetzmäßigkeit, nach der sie entstehen. Die häufigen Überträge führen hier zu weit längeren Zahlen als im Dezimalsystem.

Dezimal	Binär
0	0
1	1
2	10
3	11
4	100
5	101
6	110
7	111
8	1000
9	1001
10	1010
11	1011
12	1100
13	1101
14	1110
15	1111
16	10000
·	·
·	·
·	·

Abb. 2.1 Aufbau der Dualzahlen und Ihre Zuordnung zu den dezimalen Werten. Führende Nullen haben keine Bedeutung.

*) Während das Wort *binär* lediglich auf eine Darstellung unter Verwendung von zwei Werten (hier: 0 und 1) hinweist, bedeutet das Wort *duale*, daß bei der binären Darstellung eine Stellenwertigkeit (... $2^1, 2^0$) vorliegt.

Das hier geschaffene Zahlensystem lässt sich auch mit Kommastelle zur Darstellung von gebrochenen Zahlen verwenden, wo z. B. dual $10,1 = 2^1 + 2^{-1} =$ dezimal $2,5$ wird. Es liegt dann die Festkommadarstellung vor. Die "Auflösung" der Information eines solchen Systems hat damit den Wert der kleinsten vorkommenden Zweierpotenz. Weil aber bei großen Zahlenwerten diese Differenz weniger wiegt, wird die relative Genauigkeit dort besser als bei kleinen Zahlenwerten, weswegen der Stellenzahl bzw. Wortlänge der Zahlendarstellung eine große Bedeutung zukommt. Beim Arbeiten mit dem Computer wird vielfach auf eine normierte Auflösung durch die sog. Gleitkommadarstellung (vgl. Abschn. 2.2.6) übergegangen. Bei der Festkommadarstellung wird meistens ganzzahlig (ohne Komma; engl.: integer) gearbeitet.

Das in einem Wort vorkommende Bit mit der höchsten Wertigkeit wird als das MSB (engl.: Most Significant Bit) und das mit der niedrigsten Wertigkeit als das LSB (engl.: Least Significant Bit) bezeichnet.

2.2.2 Die Umwandlung zwischen Dezimal- und Dualcode

Die Umwandlung einer Dualzahl in eine Dezimalzahl erfolgt durch Aufsummierung der Stellenwerte, bei denen 1 steht. So ist z. B. $110010 = 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 32 + 16 + 2 = 50$.

Die Umwandlung einer Dezimalzahl in eine Dualzahl kann auf mehrere Arten erfolgen. Man kann z. B. die größte Potenz von 2 suchen, die noch in der Dezimalzahl enthalten ist. Mit dem Rest wiederholt man dasselbe usw., bis der Rest verschwindet. Dann hat man die nicht verschwindenden (=1) Stellenwerte der Dualzahl gefunden. Man kann aber auch das Divisionsverfahren anwenden: Man dividiert die Dezimalzahl fortlaufend durch 2, bis im Endergebnis eine 0 erscheint. Die Dualzahl setzt sich zusammen aus den sich ergebenden Resten rückwärts gelesen. Die erste Methode eignet sich für nicht allzu große Zahlen, vor allem, wenn man im Kopf rechnen will; nach der zweiten Methode wird z. B. im Computer gearbeitet.

Beispiel 2.1

Umwandlung der Zahl 86 in eine Dualzahl:

1. Methode

$$\begin{aligned} 2^6 &= 64, & \text{Rest } 22 \\ 2^4 &= 16, & \text{Rest } 6 \\ 2^2 &= 4, & \text{Rest } 2 \\ 2^1 &= 2, & \text{Rest } 0 \end{aligned}$$

Die Dualzahl ist:

$$1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 1010110.$$

2. Methode

$86:2=43$	Rest 0	
$43:2=21$	Rest 1	
$21:2=10$	Rest 1	
$10:2=5$	Rest 0	
$5:2=2$	Rest 1	
$2:2=1$	Rest 0	
$1:2=0$	Rest 1	

Die Reste rückwärts gelesen: 1010110.

2.2.3 Die Addition

Die Regeln der dualen Addition haben wir bereits bei der Festlegung des Zahlensystems gesehen:

$0+0=0; \quad 0+1=1; \quad 1+1=10.$

Wenn wir uns an die Übertragsregel halten, können wir bei der Addition nichts falsch machen. Dabei ist zu beachten, daß die Überträge, wie im Dezimalsystem, auch über mehrere Stellen hinweg wirken können.

Beispiel 2.2

Dual	Dezimal
1010	10
+ 1101	+13
<u>+ 0111</u>	<u>+ 7</u>
11110	30

Beispiel 2.3

	10	2
	+ 11	+ 3
	+ 111	+ 7
	<u>+ 111</u>	<u>+ 7</u>
	1-Übertr.: 1	19
	1 -Übertr.:10	
	0 -Übertr.:10	
	<u>10011</u>	

Abweichend von dieser dualen Addition werden gelegentlich andere Vorschriften benutzt (Boolesche Algebra: $1 + 1 = 1$, vgl. Abschn. 3.3.4 und binäre Addition: $1 + 1 = 0$, vgl. Abschn. 11.3.2).

2.2.4 Die Subtraktion

Auch bei der dualen Subtraktion gelten die gleichen Regeln wie bei der dezimalen. Beim "Borgen" von einer höheren Stelle ist zu beachten, daß es sich hier um die Basis 2 handelt.

Beispiel 2.4

Dual	Dezimal
1101	13
<u>-1010</u>	<u>-10</u>
0011	3

Diese Subtraktionsmethode ist zwar für den "Handbetrieb" geeignet, doch nicht für die Elektronik. Dort wird ein anderes Verfahren angewendet: Das Subtrahieren mit Hilfe des Komplementärwertes.

Das Komplement einer Zahl ist die Ergänzung, die nötig ist, um ein "Ganzes" zu bilden. Ein "Ganzes" ist die größte Zahl, bis zu der wir zählen wollen bzw. können. Letztere ist meistens identisch mit der Wortlänge in der verwendeten Darstellung.