

Springer-Lehrbuch

# Digitaltechnik

Ein Lehr- und Übungsbuch

von

Roland Voitowitz, Klaus Urbanski

erweitert, überarbeitet

Springer 2007

Verlag C.H. Beck im Internet:

[www.beck.de](http://www.beck.de)

ISBN 978 3 540 73672 1

Zu [Leseprobe](#)

schnell und portofrei erhältlich bei [beck-shop.de](http://beck-shop.de) DIE FACHBUCHHANDLUNG

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zahlensysteme .....</b>	<b>1</b>
Allgemeines Zahlensystem.....	1
Dual-, Oktal- und Hexadezimalsystem .....	2
Konvertierung zwischen den Zahlensystemen.....	3
Arithmetische Operationen im Dualsystem .....	5
1.4.1 Die duale Addition .....	5
1.4.2 Die duale Subtraktion.....	5
1.4.3 Die Multiplikation von Dualzahlen (Booth-Algorithmus) .....	10
1.4.4 Die Division von Dualzahlen (Restoring-Methode).....	11
Die Darstellung gebrochener Zahlen im Dualsystem .....	13
Binäre Vorsätze für Zweierpotenzen .....	15
<b>Logische Funktionen .....</b>	<b>17</b>
Grundbegriffe .....	17
2.1.1 Logik-Pegel und Logik-Zustand einer binären Variablen .....	17
2.1.2 Zuordnungssysteme.....	18
2.1.3 Signalnamen in der Digitaltechnik .....	22
Vergleich zwischen analoger und digitaler physikalischer Größe .....	22
Schaltalgebra .....	24
2.3.1 Verknüpfungszeichen .....	24
2.3.2 Definition der logischen Funktionen .....	26
2.3.3 Schaltsymbole .....	27
2.3.4 Rechenregeln der Schaltalgebra .....	30
2.3.5 Logikstufen.....	32
2.3.6 Realisierung der Grundverknüpfungen in NAND- und NOR-Technik .....	33
2.3.7 Normalform einer logischen Funktion .....	35
Minimieren logischer Funktionen.....	37
2.4.1 Allgemeines.....	37
2.4.2 Minimierungsverfahren .....	39
2.4.3 Karnaugh-Veitch-Diagramm (KV-Diagramm) .....	40
2.4.3.1 KV-Diagramm für zwei Eingangsvariablen .....	41
2.4.3.2 KV-Diagramm für drei Eingangsvariablen.....	43
2.4.3.3 KV-Diagramm für vier Eingangsvariablen.....	46
2.4.3.4 KV-Diagramm für fünf Eingangsvariablen .....	48
<b>Technische Realisierung digitaler Schaltungen .....</b>	<b>51</b>

## Inhaltsverzeichnis

---

3.3.2	Störspannungsabstand .....	55
3.3.3	Schaltzeiten .....	56
4	Bausteinfamilien.....	58
3.4.1	Transistor-Transistor-Logik (TTL) .....	58
3.4.1.1	Digitale Schaltungen in Standard-TTL.....	58
3.4.1.2	Digitale Schaltungen in Schottky-TTL.....	59
3.4.1.3	TTL-Schaltungen mit spezieller Ausgangsstufe.....	61
3.4.1.4	Realisierung der Pegel-Zustände an TTL-Eingängen.....	63
3.4.2	Integrierte Schaltungen in MOS-Technik .....	66
3.4.3	Emitter Coupled Logic (ECL).....	71
3.4.4	Trends bei der technologischen Weiterentwicklung .....	73
5	Anwenderspezifische Bausteine (Application Specific ICs) .....	73
3.5.1	Fullcustom ICs .....	74
3.5.2	Gate Array.....	74
3.5.3	Standardzellen IC .....	75
6	Programmierbare Logik.....	75
3.6.1	Programmable Logic Device PLD .....	76
3.6.2	Complex Programmable Logic Device (CPLD) .....	82
3.6.3	Field Programmable Gate Array FPGA .....	84
3.6.3.1	Allgemeiner Aufbau eines FPGAs .....	84
3.6.3.2	FPGA mit Antifuse-Link .....	85
3.6.3.3	FPGA mit SRAM-Verbindungselement.....	87
	<b>HDL als Entwurfs- und Simulationssprache .....</b>	<b>95</b>
1	Einführung in VHDL.....	95
2	Motivation zum Erlernen von VHDL in einem Grundkurs.....	95
3	Grundlagen .....	96
4	Entity-Deklaration .....	97
4.4.1	Einfache Entity-Deklaration ohne Parameterübergabe .....	100
4.4.2	Erweiterte Entity-Deklaration mit Parameterübergabe .....	101
4.4.3	Entity-Declaration mit Entity-Anweisungen .....	101
5	Architecture .....	102
4.5.1	Verhaltensbeschreibung (Behavioral description) .....	102
4.5.2	Nebenläufige Anweisungen in der Verhaltensbeschreibung.....	102
4.5.2.1	Nebenläufige Signalzuweisung .....	103
4.5.2.2	When-Else-Anweisung.....	104
4.5.2.3	With-Select-When-Anweisung.....	104
4.5.2.4	Anwendungsbeispiele mit nebenläufigen Anweisungen .....	105
4.5.3	Prozess-Anweisung .....	107
4.5.4	Sequentielle Anweisungen in der Verhaltensbeschreibung.....	108
4.5.4.1	Sequentielle Signalzuweisung .....	108
4.5.4.2	Sequentielle Variablenzuweisung.....	109
4.5.4.3	If-Then-Else-Anweisung .....	109
4.5.4.4	Case-When-Anweisung.....	109
4.5.4.5	For-Loop-Anweisung .....	110
4.5.4.6	While-Loop-Anweisung .....	110
4.5.4.7	Next- und Exit-Anweisung.....	110

4.6.1	Prozeduren.....	114
4.6.2	Funktionen.....	115
Weiterführende Kapitel .....		
4.7.1	Assertion- und Report-Anweisung .....	117
4.7.2	Alias-Deklaration .....	118
4.7.3	Überladen (Overloading).....	118
4.7.4	Auflösungsfunktionen (Resolution functions).....	119
4.7.5	Package und Use-Anweisung .....	119
4.7.6	Bibliotheken .....	122
4.7.7	Generate-Anweisung .....	122
4.7.8	Block-Anweisung.....	123
4.7.9	Konfiguration .....	123
4.7.9.1	Konfiguration für VHDL-Modelle mit Verhaltensbeschreibung .....	124
4.7.9.2	Komponenten-Konfiguration.....	124
4.7.9.3	Block-Konfiguration.....	126
VHDL-Grundbegriffe zum Nachschlagen.....		
4.8.1	Bezeichner (Identifizier).....	128
4.8.2	Datenobjekte und Objektklassen .....	129
4.8.2.1	Konstanten.....	130
4.8.2.2	Variablen .....	130
4.8.2.3	Signale .....	130
4.8.3	Datentypen .....	131
4.8.3.1	Skalare Datentypen (Scalar types).....	132
4.8.3.2	Zusammengesetzte Datentypen (Composite types).....	134
4.8.3.3	Subtypes .....	137
4.8.3.4	Attribute.....	138
4.8.4	Operatoren und Operanden.....	139
Testen von VHDL-Modellen.....		
4.9.1	Simulationstechniken .....	141
4.9.2	Testbench mit Testvektoren .....	142
4.9.3	Testbench mit Ein- und Ausgabedatei.....	145
<b>Combinatorische Schaltungen .....</b>		<b>151</b>
Codierschaltungen .....		
5.1.1	Alphanumerischer Code .....	151
5.1.2	Numerischer Code .....	152
Multiplexer und Demultiplexer .....		
5.2.1	Multiplexer.....	157
5.2.2	Demultiplexer.....	159
Addierer .....		
<b>Combinatorische Schaltungen .....</b>		<b>165</b>
Elementare Schaltwerke .....		
6.1.1	Digitale Oszillatoren.....	165
6.1.2	Monostabile Kippstufen (Monoflops) .....	168
6.1.3	Bistabile Kippstufen (Flipflops).....	169

## Inhaltsverzeichnis

---

6.2.1	Asynchrone Zähler .....	184
6.2.1.1	Asynchroner Dualzähler .....	185
6.2.1.2	Asynchroner Modulo-m-Zähler .....	187
6.2.2	Synchrone Zähler .....	188
6.2.2.1	Synchroner Dualzähler .....	189
6.2.2.2	Synchroner Modulo-m-Zähler .....	194
6.3	Schieberegister .....	196
6.3.1	Realisierung mit flankengesteuerten D-Flipflops .....	197
6.3.2	Anwendungsgebiete .....	199
6.3.2.1	Serielle Datenübertragung .....	199
6.3.2.2	Rechenoperationen .....	199
6.3.2.3	Rückgekoppelte Schieberegister .....	200
6.4	Systematische Beschreibung der Schaltwerke .....	202
6.4.1	Grundlagen der Automatentheorie .....	202
6.4.2	Das Zustandsdiagramm und die Zustandsfolgetabelle .....	204
6.4.2.1	Zustandsdiagramm .....	204
6.4.2.2	Zustandsfolgetabelle .....	206
6.4.2.3	Zustandsreduzierung .....	208
6.5	Asynchrone Schaltwerke .....	209
6.6	Grundlagen synchroner Schaltwerke .....	211
6.6.1	Reset-Logik zur Vorgabe des Anfangszustands .....	211
6.6.2	Asynchrone und synchrone Eingabe .....	212
6.6.3	Kombinatorische Ausgabe und Registerausgabe .....	213
6.7	Beispiel für die Analyse synchroner Schaltwerke .....	214
6.8	Beispiele für den Entwurf synchroner Schaltwerke .....	216

## 7 Digitale Halbleiterspeicher .....

7.1	Schreib-/Lesespeicher (RAM) .....	228
7.1.1	Statisches RAM (SRAM) .....	229
7.1.2	Dynamisches RAM (DRAM) .....	232
7.1.3	Das Fast-Page-Mode-DRAM (FPM-DRAM) .....	237
7.1.4	Das Enhanced DRAM (EDRAM) .....	238
7.1.5	Das Extended-Data-Output-DRAM (EDO-DRAM) .....	239
7.1.6	Burst Extended Data Output DRAM (BEDO-DRAM) .....	240
7.1.7	Das Synchrone DRAM (SDRAM) .....	240
7.1.8	Das Enhanced SDRAM (ESDRAM) .....	243
7.1.9	Das Double Data Rate SDRAM (DDR SDRAM) .....	244
7.1.10	Das Quad Data Rate SDRAM (QDR SDRAM) .....	249
7.1.11	Quasistatisches dynamisches RAM .....	252
7.1.12	Dual-Port-RAM und Video-RAM .....	253
7.1.13	First-In/First-Out-Speicher (FIFO-Speicher) .....	256
7.1.14	Das FRAM .....	259
7.1.15	Das MRAM .....	264
7.2	Festwertspeicher (ROM) .....	267
7.2.1	Maskenprogrammiertes ROM .....	267
7.2.2	Programmierbares ROM (PROM) .....	269
7.2.3	UV-löschbares, programmierbares ROM (EPROM) .....	269

Entwurf komplexer Speichersysteme .....	276
Tabellarische Übersicht über verfügbare Speicherbausteine .....	280
<b>Analog-Digital- und Digital-Analog-Umsetzer.....</b>	<b>283</b>
Das Wesen von Analog-Digital-Umsetzern.....	283
Anwendungen von Analog-Digital- und Digital-Analog-Umsetzern .....	286
Systeme zur Umsetzung analoger in digitale Signale und digitaler in analoge Signale .....	287
8.3.1 Das Abtasttheorem .....	288
8.3.2 Das Abtasthalteglied (AHG) .....	289
8.3.2.1 Forderungen an ein Abtasthalteglied während der Abtastphase .....	292
8.3.2.2 Forderungen an ein Abtasthalteglied während der Haltephase.....	292
8.3.2.3 Forderungen an ein Abtasthalteglied bezüglich der Umschaltcharakteristik .....	294
8.3.3 Erreichbare Genauigkeit für ADUs mit einer Codewortlänge von n Bit .....	297
8.3.4 Digitalcodes für ADUs und DAUs .....	299
Prinzipien der Analog-Digital-Umsetzung .....	301
8.4.1 Das Parallelverfahren .....	301
8.4.2 Das Wägeverfahren .....	303
8.4.2.1 Analog-Digital-Umsetzer mit sukzessiver Approximation.....	305
8.4.2.2 Analog-Digital-Umsetzer nach dem Wägeprinzip in Kaskadenstruktur .....	306
8.4.3 Das Zählverfahren .....	308
8.4.4 Das erweiterte Parallelverfahren .....	309
8.4.4.1 Das allgemeine Prinzip des erweiterten Parallelverfahrens .....	309
8.4.4.2 Der Pipeline-Analog-Digital-Umsetzer .....	313
8.4.5 Das erweiterte Zählverfahren .....	315
8.4.6 Sonderformen von Analog-Digital-Umsetzern.....	316
8.4.6.1 Indirekte Verfahren.....	316
8.4.6.2 Der Sigma-Delta-Umsetzer .....	321
8.4.6.3 Die nichtlineare Analog-Digital-Umsetzung .....	323
Prinzipien der Digital-Analog-Umsetzung .....	324
8.5.1 Die Summation gewichteter Ströme .....	325
8.5.2 Umsetzer mit R-2R-Leiternetzwerk .....	326
Eigenschaften realer AD- und DA-Umsetzer .....	328
8.6.1 Statische Fehler .....	328
8.6.1.1 Die Quantisierungsfehler .....	328
8.6.1.2 Der Offsetfehler .....	330
8.6.1.3 Der Verstärkungsfehler.....	330
8.6.1.4 Die Nichtlinearität .....	331
8.6.1.5 Die differentielle Nichtlinearität .....	331
8.6.1.6 Der Monotoniefehler .....	332
8.6.1.7 Die Betriebsspannungsabhängigkeit der Wandlerparameter ...	332
8.6.2 Dynamische Fehler.....	332

## Inhaltsverzeichnis

---

8.6.2.5	Glitch-Fläche .....	336
7	Betrieb von Analog-Digital-Umsetzern .....	336
8.7.1	Betrieb von Universal-Analog-Digital-Umsetzern .....	336
8.7.2	Betrieb von Analog-Digital-Umsetzern mit Mikroprozessor-Interface .....	338
	<b>Mikroprozessoren und Mikrocontroller .....</b>	<b>343</b>
1	Grundlagen der Mikroprozessortechnik .....	343
2	Anwendungsbereiche und Trends .....	345
3	Die Struktur eines Mikrorechners .....	347
4	Aufbau und Funktion eines 8-Bit-Mikroprozessors .....	351
9.4.1	Die Hardware-Struktur des Mikroprozessors 8085 .....	352
9.4.2	Die Arbeitsweise des Mikroprozessors 8085 .....	356
9.4.2.1	Die zeitliche Struktur der Befehlsausführung .....	356
9.4.2.2	Beispiel für einen Befehlszyklus im Liniendiagramm .....	359
5	Aufbau und Funktion des Mikrocontrollers 8051 .....	360
9.5.1	Die Hardware des Mikrocontrollers 8051 .....	361
9.5.1.1	Die Zentraleinheit .....	363
9.5.1.2	Die Speichereinheit .....	363
9.5.1.3	Parallele I/O-Ports (8 Bit) .....	372
9.5.1.4	Die Timer des Mikrocontrollers 8051 .....	376
9.5.1.5	Grundlagen der seriellen Datenübertragung gemäß V.24 und RS-232C .....	380
9.5.1.6	Die serielle Schnittstelle des Mikrocontrollers 8051 .....	384
9.5.1.7	Interrupts des Mikrocontrollers 8051 .....	386
9.5.1.8	Betriebsarten mit reduziertem Stromverbrauch beim Controller 80C51 .....	403
9.5.1.9	Die Anschluss-Belegung des Mikrocontrollers 8051 .....	404
9.5.2	Die zeitliche Struktur bei der Befehlsausführung .....	405
9.5.3	Die Software-Struktur des Mikrocontrollers 8051 .....	410
9.5.3.1	Die Adressierungsarten des Mikrocontrollers 8051 .....	410
9.5.3.2	Der Befehlssatz des Mikrocontrollers 8051 .....	411
9.5.4	Die modulare Programmentwicklung für den Mikrocontrollers 8051 ..	425
9.5.4.1	Prinzipien des Software Engineering .....	425
9.5.4.2	Der Mikrocomputer-Design-Zyklus .....	429
9.5.4.3	Beispiele für 8051-Assembler- und -C-Programme .....	449
9.5.4.4	Die Einbindung von Assembler-routinen in C-Programme .....	459
6	Die Mikrocontroller-Familie MCS51 .....	465
9.6.1	Der 8-Bit-Mikrocontroller 80515 mit internem Analog- Digital-Umsetzer .....	466
9.6.2	Mikrocontroller-Applikationen .....	467
	<b>Übungsaufgaben mit Lösungen .....</b>	<b>471</b>
Aufgabe 1:	Minimieren logischer Gleichungen .....	472
Aufgabe 2:	Minimieren logischer Gleichungen .....	472
Aufgabe 3:	Minimieren logischer Gleichungen .....	472
Aufgabe 4:	Minimieren logischer Gleichungen .....	473

Übungsangabe 9:	VHDL-Entwurf eines Addierers, Test mit einer Testbench mit Testvektoren .....	479
Übungsangabe 10:	Darstellung von Hexadezimalziffern auf einer 7-Segment-Anzeige...	482
Übungsangabe 11:	Zustands- und flankengesteuertes D-Flipflop.....	484
Übungsangabe 12:	Analyse eines Schaltwerks mit D-Flipflops .....	485
Übungsangabe 13:	Entwurf eines JK- und eines T-Flipflops mit Hilfe eines D-Flipflops.	486
Übungsangabe 14:	Steuerung einer Ampelanlage.....	487
Übungsangabe 15:	Testbench für einen synchronen Dualzähler.....	490
Übungsangabe 16:	VHDL-Entwurf des programmierbaren Synchronzählers 74163 .....	495
Übungsangabe 17:	Synchroner Modulo-5-Zähler .....	496
Übungsangabe 18:	Entwurf eines synchronen Schaltwerks (Moore-Automat) .....	499
Übungsangabe 19:	Entwurf eines synchronen Schaltwerks (Mealy-Automat).....	503
Übungsangabe 20:	Entwurf eines synchronen Schaltwerks mit Registerausgabe.....	508
Übungsangabe 21:	Entwurf eines SRAMs 1Ki x 8 Bit (VHDL-Modell mit Testbench)...	510
Übungsangabe 22:	Entwurf eines Speichersystems mit 8-Bit-Wortbreite .....	515
Übungsangabe 23:	Speichersystem mit 16-Bit-Datenbus .....	519
Übungsangabe 24:	Mikrocontrollersystem mit externer Speichererweiterung .....	521
Übungsangabe 25:	Tastendecodierung mit dem Mikrocontroller 8051 .....	522
<b>11.11.11</b>	<b>Übersicht .....</b>	<b>529</b>
11.1	Schaltsymbole in der Digitaltechnik .....	529
11.1.1	Funktionsblöcke .....	529
11.1.2	Beschreibungsfelder.....	532
11.1.3	Abhängigkeitsnotation .....	533
11.1.3.1	UND-Abhängigkeit (G) .....	534
11.1.3.2	ODER-Abhängigkeit (V).....	535
11.1.3.3	Negations-Abhängigkeit (N).....	535
11.1.3.4	Verbindungs-Abhängigkeit (Z).....	536
11.1.3.5	Setz- und Rücksetz-Abhängigkeit (S, R) .....	536
11.1.3.6	Steuer-Abhängigkeit (C).....	537
11.1.3.7	Freigabe-Abhängigkeit (EN) .....	537
11.1.3.8	Mode-Abhängigkeit (M).....	537
11.1.3.9	Adressen-Abhängigkeit (A).....	538
<b>11.11.12</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>543</b>
<b>11.11.13</b>	<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>547</b>