

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Arbeitsweise digitaler Schaltungen	2
1.1.1	Darstellung von Informationen	2
1.1.2	Logik-Pegel und Logik-Zustand	2
1.1.3	Verarbeitung von Informationen	3
1.1.4	Beispiel: Einfacher Grafikcontroller	4
1.1.5	Beispiel: Zähler im Grafikcontroller	6
1.2	Technische Realisierung digitaler Schaltungen	7
1.2.1	Logikbausteine	7
1.2.2	Kundenspezifische Integrierte Schaltung	8
1.2.3	Standardbauelemente	8
1.2.4	Programmierbare Schaltung	9
1.2.5	Mikrocontroller	10
1.3	Digitale und analoge Informationen	11
1.3.1	Darstellung von Informationen	11
1.3.2	Vor- und Nachteile der Darstellungen	11
1.3.3	Wert- und zeitdiskret	12
1.4	Übungsaufgaben	13
2	Digitale Codierung von Informationen	17
2.1	Grundlagen	18
2.2	Vorzeichenlose Zahlen	18
2.2.1	Stellenwertsysteme	19
2.2.2	Darstellung vorzeichenloser Zahlen in der Digitaltechnik	20
2.2.3	Umwandlung zwischen Zahlensystemen	22
2.2.4	Beispiele zur Umwandlung zwischen Zahlensystemen	22
2.2.5	Wertebereiche und Wortbreite	24
2.2.6	Zahlendarstellung mit begrenzter Wortbreite	25
2.2.7	Binäre vorzeichenlose Addition	26
2.2.8	Binäre vorzeichenlose Subtraktion	27

2.2.9	Binäre vorzeichenlose Multiplikation und Division	29
2.3	Vorzeichenbehaftete Zahlen.	30
2.3.1	Vorzeichen-Betrag-Darstellung	30
2.3.2	Zweierkomplement-Darstellung	32
2.3.3	Addition und Subtraktion in Zweierkomplement-Darstellung.	34
2.3.4	Multiplikation und Division in Zweierkomplement-Darstellung.	35
2.3.5	Bias-Darstellung.	35
2.3.6	Darstellbare Zahlenbereiche	36
2.4	Reelle Zahlen	36
2.4.1	Festkomma-Darstellung	37
2.4.2	Gleitkomma-Darstellung	38
2.4.3	Reelle Zahlen in digitalen Systemen	39
2.5	Codes	40
2.5.1	BCD-Code	40
2.5.2	Gray-Code	41
2.5.3	1-aus-N-Code.	43
2.5.4	ASCII-Code	44
2.5.5	7-Segment-Code.	46
2.6	Übungsaufgaben.	47
3	Einführung in VHDL	51
3.1	Designmethodik im Überblick.	52
3.2	Grundstruktur eines VHDL-Moduls	54
3.2.1	Bibliotheken	54
3.2.2	Entity und Architecture	56
3.2.3	Bezeichner	57
3.3	Grundlegende Datentypen	58
3.3.1	Integer	58
3.3.2	Std_logic	59
3.3.3	Std_logic_vector	60
3.3.4	Signed und Unsigned	61
3.3.5	Konstanten	62
3.3.6	Umwandlung zwischen Datentypen.	63
3.3.7	Datentyp Bit	64
3.4	Operatoren	65
3.5	Signale	67
3.5.1	Definition und Verwendung von Signalen	67
3.5.2	Signalzuweisungen.	68
3.6	Prozesse	69
3.6.1	Syntaktischer Aufbau von Prozessen	70

3.6.2	Ausführung von Prozessen.	71
3.6.3	Variablen	73
3.6.4	Signalzuweisungen in Prozessen	74
3.6.5	Wichtige Sprachkonstrukte in VHDL-Prozessen.	76
3.7	Hierarchie.	79
3.8	Übungsaufgaben.	82
4	Kombinatorische Schaltungen.	85
4.1	Schaltalgebra	86
4.1.1	Schaltfunktion und Schaltzeichen	87
4.1.2	Funktionstabelle.	87
4.1.3	Funktionstabelle mit Don't-Care	88
4.2	Funktionen der Schaltalgebra	89
4.2.1	UND-Verknüpfung	89
4.2.2	ODER-Verknüpfung.	90
4.2.3	Negation, Inverter.	90
4.2.4	NAND-Verknüpfung	91
4.2.5	NOR-Verknüpfung	91
4.2.6	XOR-Verknüpfung	92
4.2.7	XNOR-Verknüpfung	92
4.2.8	Weitere Verknüpfungen	93
4.2.9	Logikstufen	93
4.2.10	US-amerikanische Logiksymbole	94
4.3	Rechenregeln der Schaltalgebra.	94
4.3.1	Vorrangregeln.	94
4.3.2	Rechenregeln	95
4.4	Schaltungsentwurf durch Minimieren	98
4.4.1	Minterme	98
4.4.2	Schaltungsentwurf mit Mintermen.	98
4.4.3	Minimierung von Mintermen.	99
4.4.4	Maxterme	100
4.4.5	Schaltungsentwurf mit Maxtermen	100
4.4.6	Minimierung von Maxtermen	100
4.5	Schaltungsminimierung mit Karnaugh-Diagramm	101
4.5.1	Grundsätzliche Vorgehensweise.	101
4.5.2	Karnaugh-Diagramm für zwei Variablen	102
4.5.3	Karnaugh-Diagramm für drei Variablen	103
4.5.4	Karnaugh-Diagramm für vier Variablen	104
4.5.5	Auswahl der erforderlichen Terme.	106
4.5.6	Ermittlung der minimierten Funktion	106
4.5.7	Karnaugh-Diagramm mit Don't-Care	107
4.5.8	Karnaugh-Diagramm für mehr als vier Variablen	109

4.5.9	Karnaugh-Diagramm der konjunktiven Normalform	109
4.6	VHDL für kombinatorische Schaltungen	110
4.6.1	Beschreibung logischer Verknüpfungen.	110
4.6.2	Beschreibung der Funktion	111
4.7	Übungsaufgaben.	112
5	Sequenzielle Schaltungen	115
5.1	Speicherelemente	116
5.1.1	RS-Flip-Flop	116
5.1.2	Taktsteuerung von Flip-Flops	118
5.1.3	D-Flip-Flop	122
5.1.4	Erweiterung des D-Flip-Flops	125
5.1.5	Weitere Flip-Flops	128
5.1.6	Kippstufen	128
5.2	Endliche Automaten.	129
5.2.1	Automatentheorie.	130
5.2.2	Beispiel für einen Automaten.	132
5.2.3	Entwurf von Automaten.	135
5.2.4	Codierung von Zuständen	143
5.2.5	Entwurf von Mealy-Automaten	149
5.2.6	Vergleich von Mealy- und Moore-Automat.	153
5.2.7	Registerausgabe	154
5.2.8	Asynchrone Automaten	156
5.3	Entwurf sequenzieller Schaltungen mit VHDL	158
5.3.1	Grundform des getakteten Prozesses	158
5.3.2	Erweiterte Funktion des getakteten Prozesses	159
5.3.3	Steuerleitungen für Flip-Flops	160
5.3.4	Entwurf von Automaten.	162
5.3.5	Programmierstile für VHDL-Code	166
5.4	Übungsaufgaben.	166
6	Schaltungsstrukturen	171
6.1	Grundstrukturen digitaler Schaltungen	171
6.1.1	Top-Down Entwurf	171
6.1.2	Darstellung von Schaltungsstrukturen	172
6.2	Kombinatorische Grundstrukturen.	173
6.2.1	Multiplexer.	173
6.2.2	Demultiplexer.	174
6.2.3	Addierer	175
6.3	Sequenzielle Grundstrukturen	178
6.3.1	Zähler.	178
6.3.2	Schieberegister.	180

6.3.3	Rückgekoppeltes Schieberegister	181
6.4	Zeitverhalten	182
6.4.1	Verzögerungszeit realer Schaltungen	182
6.4.2	Transiente Signalzustände	182
6.4.3	Signalübergänge in komplexen Schaltungen	183
6.5	Taktkonzept in realen Schaltungen	184
6.5.1	Register-Transfer-Level (RTL).	184
6.5.2	Beispiel für Entwurf mit Register-Transfer-Level: Ampelsteuerung	185
6.5.3	Kritischer Pfad	188
6.5.4	Pipelining	189
6.5.5	Taktübergänge	191
6.5.6	Metastabilität von Flip-Flops	193
6.5.7	Taktübergang mehrerer Signale	194
6.6	Spezielle Ein-/Ausgangsstrukturen	195
6.6.1	Schmitt-Trigger-Eingang	195
6.6.2	Tri-State-Ausgang	196
6.6.3	Open-Kollektor-Ausgang	197
6.7	Übungsaufgaben.	198
7	Realisierung digitaler Systeme.	201
7.1	Standardisierte Logikbausteine	202
7.1.1	Charakteristische Eigenschaften digitaler Schaltkreise	204
7.1.2	Lastfaktoren	204
7.1.3	Störspannungsabstand	206
7.1.4	Schaltzeiten	206
7.1.5	Logikfamilien.	207
7.2	Komponenten für digitale Systeme	207
7.2.1	ASICs.	208
7.2.2	ASSPs.	209
7.2.3	FPGAs und CPLDs	210
7.2.4	Mikrocontroller	210
7.2.5	Vergleich der Alternativen	212
7.2.6	Kombination von Komponenten	213
7.3	VHDL-basierter Systementwurf	213
7.3.1	Designflow	214
7.3.2	VHDL-Eingabe	215
7.3.3	Simulation	216
7.3.4	Synthese	217
7.3.5	Platzierung und Verdrahtung	218
7.3.6	Timinganalyse	219
7.3.7	Inbetriebnahme.	220

	7.3.8	Der digitale Entwurf als iterativer Prozess.	221
7.4		Übungsaufgaben	221
8		VHDL-Vertiefung	225
8.1		Weitere Datentypen	225
	8.1.1	Natural und Real	225
	8.1.2	Boolean	226
	8.1.3	Time	226
	8.1.4	Std_ulogic, Std_ulogic_vector	227
	8.1.5	Benutzerdefinierte Datentypen.	227
	8.1.6	Zeichen und Zeichenketten	228
	8.1.7	Subtypes.	229
	8.1.8	Arrays.	229
	8.1.9	Records.	230
8.2		Sprachelemente zur Code-Strukturierung	231
	8.2.1	Function	232
	8.2.2	Procedure	233
	8.2.3	Entity-Deklaration mit Generics	235
	8.2.4	Generate-Anweisung	237
	8.2.5	Attribute	239
	8.2.6	Instanziierung mit der Component-Anweisung.	241
	8.2.7	Pakete.	243
	8.2.8	Einbindung von Spezialkomponenten	245
8.3		Sprachelemente zur Verifikation	252
	8.3.1	Binäre Ein-/Ausgabe	252
	8.3.2	Ein-/Ausgabe mit Textdateien	253
	8.3.3	Wait-Anweisungen in Testbenches	255
	8.3.4	Testbench mit interaktiver Überprüfung	256
	8.3.5	Testbench mit Assert-Anweisungen.	257
	8.3.6	Testbench mit Dateiein-/ausgabe	258
8.4		Übungsaufgaben.	262
9		Programmierbare Logik.	267
9.1		Grundkonzepte programmierbarer Logik	268
	9.1.1	Zweistufige Logik	268
	9.1.2	Tabellenbasierte Logikimplementierung	271
9.2		Simple Programmable Logic Device (SPLD)	273
9.3		Complex Programmable Logic Device (CPLD)	275
9.4		Field Programmable Gate Arrays.	277
	9.4.1	Allgemeiner Aufbau eines FPGAs.	278
	9.4.2	Taktverteilung im FPGA	280
	9.4.3	Typische Spezialkomponenten.	282

9.5	FPGA-Familien	286
9.5.1	Vergleich ausgewählter FPGA-Familien	287
9.6	Hinweise zum Selbststudium	290
9.7	Übungsaufgaben.	292
10	Halbleitertechnik.	295
10.1	CMOS-Technologie	296
10.1.1	Prinzipieller Aufbau	296
10.1.2	Feldeffekttransistoren.	298
10.1.3	Layout	300
10.2	Grundsaltungen in CMOS-Technik	302
10.2.1	Inverter	302
10.2.2	Logikgatter.	303
10.2.3	Transmission-Gate	304
10.2.4	Flip-Flop.	305
10.3	Verlustleistung	306
10.3.1	Statische Verlustleistung	307
10.3.2	Dynamische Verlustleistung	308
10.3.3	Entwurf energieeffizienter Schaltungen.	309
10.4	Integrierte Schaltungen	310
10.4.1	Logiksynthese und Layout.	310
10.4.2	Herstellung.	313
10.4.3	Packaging.	314
10.4.4	Gehäuse	315
10.4.5	Chiplets	317
10.5	Miniaturisierung der Halbleitertechnik	317
10.5.1	Moore'sches Gesetz.	318
10.5.2	FinFET- und Nanosheet-Transistoren	318
10.5.3	Weitere Technologieentwicklung.	319
10.6	Übungsaufgaben.	320
11	Speicher	323
11.1	Übersicht	324
11.1.1	Begriffe und Abkürzungen.	324
11.1.2	Grundstruktur.	325
11.1.3	Physikalisches Interface.	326
11.2	Speichertechnologien.	327
11.2.1	SRAM	327
11.2.2	DRAM	329
11.2.3	ROM.	331
11.2.4	OTP-Speicher.	331
11.2.5	EEPROM	332

11.2.6	Innovative Speichertechniken	335
11.3	Eingebetteter Speicher	337
11.3.1	SRAM	338
11.3.2	DRAM	339
11.3.3	ROM.	339
11.3.4	NVRAM.	340
11.4	Diskrete Speicherbausteine	341
11.4.1	Praktischer Einsatz.	341
11.4.2	QDR-II-SRAM.	343
11.4.3	DDR3-SDRAM	346
11.4.4	EEPROM	349
11.4.5	FRAM mit seriellm Interface	353
11.5	Speichersysteme.	354
11.5.1	Adressdecodierung.	354
11.5.2	Multiplexing des Datenbusses	356
11.5.3	Ansteuerung diskreter Speicherbausteine	358
11.6	Übungsaufgaben.	359
12	Analog-Digital- und Digital-Analog-Umsetzer	363
12.1	Grundprinzip von Analog-Digital-Umsetzern	363
12.1.1	Systeme zur Umsetzung analoger in digitale Signale	366
12.1.2	Abtasttheorem	366
12.1.3	Abtasthalteglied (AHG)	367
12.1.4	Erreichbare Genauigkeit für ADUs abhängig von der Codewortlänge	369
12.1.5	Codierung der ADU-Werte	371
12.2	Verfahren zur Analog-Digital-Umsetzung	372
12.2.1	Parallelverfahren	372
12.2.2	Wägeverfahren	374
12.2.3	Zählverfahren	376
12.2.4	Erweitertes Parallelverfahren	377
12.2.5	Erweitertes Zählverfahren	380
12.2.6	Single- und Dual-Slope-Verfahren.	380
12.2.7	Sigma-Delta-Umsetzer.	382
12.3	Verfahren zur Digital-Analog-Umsetzung	385
12.3.1	Direktverfahren	386
12.3.2	Summation gewichteter Ströme	386
12.3.3	R-2R-Leiternetzwerk	388
12.3.4	Pulsweitenmodulation	389
12.4	Eigenschaften realer AD- und DA-Umsetzer.	390
12.4.1	Statische Fehler	391
12.4.2	Dynamische Fehler	395

12.5	Ansteuerung von diskreten AD- und DA-Umsetzern	398
12.5.1	Serielle Ansteuerung	399
12.5.2	Parallele Ansteuerung	401
12.5.3	Serielle Hochgeschwindigkeitsschnittstelle JESD204B	404
12.6	Übungsaufgaben.	405
13	Grundlagen der Mikroprozessortechnik	409
13.1	Grundstruktur eines Rechnersystems.	410
13.2	Befehlsabarbeitung in einem Mikroprozessor.	413
13.3	Typische Befehlsklassen	414
13.3.1	Arithmetische und logische Befehle	415
13.3.2	Transferbefehle	415
13.3.3	Befehle zur Programmablaufsteuerung	416
13.3.4	Spezialbefehle	417
13.4	Codierung von Befehlen	417
13.5	Adressierung von Daten und Befehlen	419
13.5.1	Unmittelbare Adressierung	419
13.5.2	Absolute Adressierung.	419
13.5.3	Indirekte Adressierung.	420
13.5.4	Indirekte Adressierung mit dem Stackpointer	422
13.5.5	Befehlsadressierung	423
13.6	Maßnahmen zur Steigerung der Rechenleistung	423
13.6.1	Erhöhung der Taktfrequenz	423
13.6.2	Parallelität	424
13.6.3	Pipelining	425
13.6.4	Befehlssatzerweiterungen	427
13.7	Grundlegende Mikroprozessorarchitekturen	428
13.7.1	CISC.	429
13.7.2	RISC.	429
13.7.3	RISC und Harvard-Architektur	430
13.8	Mikroprozessor Arm Cortex-M0+	432
13.8.1	Arm Cortex Kurzübersicht.	432
13.8.2	Register des Cortex-M0+	433
13.8.3	Befehlssatz des Cortex-M0+	435
13.9	Programmierung des Arm Cortex-M0+ in Assembler.	446
13.9.1	Einfaches Assembler-Programm	447
13.9.2	Assembler-Direktiven	448
13.9.3	Verzweigungen.	451
13.9.4	Schleifen.	452
13.9.5	Arithmetische Grundoperationen.	453
13.9.6	Unterprogrammaufrufe	456
13.9.7	Pseudobefehle	459

13.9.8	Übersetzung von Programmen.....	460
13.10	Hinweise zum Selbststudium.....	461
13.10.1	Hardware und Software für eigene Experimente.....	462
13.10.2	Anlegen eines Assembler-Projektes.....	463
13.10.3	Hinweise zur Erstellung und dem Debuggen von Assembler-Programmen.....	464
13.11	Übungsaufgaben.....	465
14	Mikrocontroller.....	469
14.1	Aufbau von Mikrocontrollern.....	470
14.2	STM32-Mikrocontroller.....	472
14.2.1	Übersicht über die Mikrocontroller-Familie STM32.....	472
14.2.2	Beispiel: STM32G0-Serie.....	474
14.2.3	Architektur der STM32G0-Mikrocontroller.....	475
14.2.4	Address Map des STM32G0.....	477
14.2.5	Pinbelegung des STM32G071.....	479
14.2.6	Mikrocontrolleranschlüsse mit besonderen Funktionen....	481
14.3	General Purpose Input Output (GPIO).....	482
14.3.1	Hardware-Struktur.....	482
14.3.2	GPIO-Register.....	483
14.4	Grundlagen der Programmierung von Peripheriemodulen.....	489
14.4.1	Datentypen.....	490
14.4.2	Setzen und Löschen von Bits.....	491
14.4.3	Abfragen von Bits.....	494
14.4.4	Beispiel: Eine blinkende LED.....	495
14.4.5	Struct-basierte Programmierung in C.....	496
14.5	C-Programmierung mit der Entwicklungsumgebung STM32CubeIDE.....	500
14.5.1	Anlegen von C-Projekten.....	500
14.5.2	Projekttyp Empty.....	501
14.5.3	Projekttyp STM32Cube.....	502
14.5.4	Wahl des Projekttyps.....	504
14.5.5	Debuggen von Projekten.....	504
14.6	Bibliotheken für die STM32-Programmierung.....	505
14.6.1	CMSIS.....	507
14.6.2	LL-Bibliothek.....	508
14.6.3	HAL-Bibliothek.....	511
14.7	Grundlagen der Interruptverarbeitung.....	512
14.7.1	Interrupts und Exceptions.....	514
14.7.2	Systick.....	515
14.7.3	Nested Vectored Interrupt Controller (NVIC).....	515
14.7.4	Interruptvektoren.....	517

14.7.5	Interruptfreigabe und Priorisierung	520
14.7.6	Extended Interrupt/Event Controller (EXTI)	521
14.7.7	Beispiel zur Interruptprogrammierung.	525
14.7.8	Atomare Datenzugriffe.	529
14.7.9	Stacking, Unstacking und Tailchaining	533
14.7.10	Ausführungszeiten von Interrupt-Service-Routinen	534
14.8	Callback-Funktionen	535
14.8.1	Callback-Funktionen am Beispiel des EXTI-Interrupts.	536
14.8.2	Default-Implementierung von Callback-Funktionen	538
14.8.3	Callback-Funktion für den SysTick-Interrupt.	539
14.9	Übungsaufgaben.	540
15	Peripherie des STM32	543
15.1	Registertypen	544
15.2	Serielle Datenübertragung	545
15.2.1	UART/USART	546
15.2.2	USARTs im STM32G0xx	550
15.2.3	SPI	560
15.2.4	SPI-Schnittstelle des STM32G071	563
15.2.5	I ² C	571
15.2.6	I ² C-Interface des STM32G071-Mikrocontrollers	576
15.2.7	Ausgewählte HAL-Funktionen für die serielle Datenübertragung.	582
15.2.8	Formatierte Ein-/Ausgabe	585
15.3	Direct Memory Access (DMA)	586
15.3.1	Adressierungsarten.	587
15.3.2	Zirkuläre Transfers und Double Buffering.	587
15.3.3	DMA im STM32G071.	588
15.3.4	Ausgewählte HAL-Funktionen für den DMA-Betrieb	596
15.4	Timer	598
15.4.1	Aufbau von Timern	598
15.4.2	Typische Timerregister.	599
15.4.3	Übersicht über die STM32-Timer	601
15.4.4	General-Purpose-Timer TIM2 und TIM3	601
15.4.5	Output-Compare-Modus	611
15.4.6	PWM-Modi	617
15.4.7	Input-Capture-Modus.	625
15.4.8	Timer mit DMA	631
15.4.9	Weitere Funktionen der STM32-Timer	633
15.4.10	Watchdog-Timer.	635
15.4.11	Ausgewählte HAL-Funktionen für die Timer- Programmierung.	636

15.5	Analoge Ein-/Ausgabe-Komponenten	638
15.5.1	Analog/Digital-Umsetzer	638
15.5.2	Digital/Analog-Umsetzer	645
15.5.3	Analogkomparator	650
15.5.4	Ausgewählte HAL-Funktionen für analoge Komponenten	651
15.6	Hinweise zum praktischen Selbststudium	654
15.6.1	Hardwareauswahl	655
15.6.2	Software-Empfehlungen	655
15.6.3	Ergänzende Literatur zum Mikrocontroller STM32G071	656
15.7	Übungsaufgaben	657
16	Lösungen der Übungsaufgaben	663
	Literaturhinweise	689
	Stichwortverzeichnis	693