
Inhaltsverzeichnis

1	Modellbildung und Simulation	1
1.1	Entwurf digitaler Schaltungen	1
1.1.1	Der Umgang mit großen Schaltungen	1
1.1.2	Modelle und Entwurfsraum	4
1.1.3	Entwurfsablauf	6
1.1.4	VHDL als formale Beschreibungsplattform	9
1.1.5	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	15
1.2	Funktion, Struktur und Simulation	16
1.2.1	Signale und Datentypen	17
1.2.2	Signalflussplan	20
1.2.3	Imperative Funktionsmodelle	22
1.2.4	Ereignisgesteuerte Simulation	33
1.2.5	Strukturbeschreibung	37
1.2.6	Testrahmen	40
1.2.7	Instanziierung von Komponenten	41
1.2.8	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	41
1.3	Laufzeittoleranz	44
1.3.1	Glitches	44
1.3.2	Das Verzögerungsmodell einer Signalzuweisung	46
1.3.3	Simulation mit Halte- und Verzögerungszeiten	48
1.3.4	Laufzeitanalyse	51
1.3.5	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	52
1.4	Register	55
1.4.1	Register als Abtastelemente	56
1.4.2	VHDL-Abtastprozesse	57
1.4.3	Verarbeitung plus Abtastung	60
1.4.4	Register-Transfer-Funktion	61
1.4.5	Taktversatz	62
1.4.6	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	64
1.5	Asynchrone Eingabe	66
1.5.1	Abtasten asynchroner Signale	66

1.5.2	Entprellen von Tasten	67
1.5.3	Asynchrone Initialisierung	68
1.5.4	Asynchrone parallele Schnittstelle	70
1.5.5	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	72
1.6	Sequenzielle Schaltungen	74
1.6.1	Endlicher Automat	74
1.6.2	Vom Zustandsgraph zur VHDL-Beschreibung	78
1.6.3	Unzulässige Zustände, Systemabsturz und Watchdog	82
1.6.4	Entwurf eines Zahlenschlosses	84
1.6.5	Operationsablaufgraph	86
1.6.6	Beispiel Wegemessung mit Quadratur-Encoder	89
1.6.7	Software-orientierte Ablaufbeschreibung	91
1.6.8	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	92
2	Synthese und Logikoptimierung	95
2.1	Register-Transfer-Synthese	96
2.1.1	Beschreibung und Extraktion von Registern	97
2.1.2	Kombinatorische Schaltungen	99
2.1.3	Kombinatorische Schaltungen mit Abtastregistern	106
2.1.4	Latches	111
2.1.5	Constraints	116
2.1.6	Entwurfsfehler und Fehlervermeidung	119
2.1.7	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	122
2.2	Schaltungsvereinfachung auf Basis der Schaltalgebra	125
2.2.1	Umformungs- und Vereinfachungsregeln	125
2.2.2	Optimierungsziele	128
2.2.3	Schaltungsvereinfachung mit Konjunktionsmengen	129
2.2.4	KV-Diagramm	131
2.2.5	Verfahren von Quine und McCluskey	138
2.2.6	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	141
2.3	Binäre Entscheidungsdiagramme	143
2.3.1	Vereinfachung binärer Entscheidungsdiagramme	144
2.3.2	Zweistellige Operationen mit ROBDDs	146
2.3.3	Umsetzung von ROBDDs in minimierte Schaltungen	148
2.3.4	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	149
2.4	Zahlendarstellung	150
2.4.1	Stellenwertsystem	151
2.4.2	Vorzeichenbehaftete Zahlen im Zweierkomplement	153
2.4.3	Festkommazahlen	155
2.4.4	Gleitkommazahlen	156
2.4.5	Zahlendarstellung und -verarbeitung in VHDL	158
2.4.6	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	159
2.5	Addierer	161
2.5.1	Ripple-Addierer	161
2.5.2	Serieller Addierer	163

2.5.3	Schneller Übertragsdurchlauf	167
2.5.4	Hierarchische Addierer	168
2.5.5	Carry-Save-Addierer	171
2.5.6	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	172
2.6	Weitere Rechenwerke	173
2.6.1	Subtrahierer	173
2.6.2	Zähler	174
2.6.3	Negation und Betragsbildung	174
2.6.4	Multiplizierer	176
2.6.5	Dividierer	177
2.6.6	Vergleicher	182
2.6.7	Verschiebung und Rotation	182
2.6.8	Synthese-Suchmuster und Optimierung	184
2.6.9	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	187
3	VHDL im Detail	189
3.1	Imperative Beschreibungsmittel	189
3.1.1	Operatoren, Ausdrücke und Zuweisungen	191
3.1.2	Fallunterscheidungen	194
3.1.3	Schleifen	195
3.1.4	Funktionen	198
3.1.5	Unreine Funktionen und globale Variablen	204
3.1.6	Operatorfunktionen	205
3.1.7	Prozeduren	206
3.1.8	Nebenläufige Prozeduren	209
3.1.9	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	212
3.2	Anwendungsspezifische Datentypen	214
3.2.1	Zahlentypen	214
3.2.2	Aufzählungstypen	218
3.2.3	Physikalische Typen	219
3.2.4	Attribute von elementaren Datentypen	220
3.2.5	Felder	221
3.2.6	Zuordnungslisten für Feldelemente	224
3.2.7	Bitvektoren	226
3.2.8	Verbund	230
3.2.9	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	233
3.3	Ein- und Ausgabe	235
3.3.1	Das Dateikonzept von VHDL	235
3.3.2	Textausgabe	236
3.3.3	Texteingabe	240
3.3.4	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	242
3.4	Beschreibungsschablonen für digitale Schaltungen	244
3.4.1	Auslagerung kombinatorischer Funktionen in Packages	244
3.4.2	Bäume statt Ketten	250
3.4.3	Blockspeicher	252

3.4.4	Ein objektorientiertes FIFO-Modell	262
3.4.5	UART – schrittweise Modellentwicklung	265
3.4.6	Entwicklung eines CORDIC-Rechenwerks	278
3.4.7	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	286
3.5	Methoden und Funktionsbausteine für den Test	288
3.5.1	Pseudo-Zufallstest und Mehrversionsvergleich	289
3.5.2	Vorab berechnete Eingaben und Soll-Werte	294
3.5.3	Spezifikationstest	296
3.5.4	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	300
4	Vom Transistor zur Schaltung	301
4.1	Entwurf und Modellierung von CMOS-Gattern	301
4.1.1	MOS-Transistoren als Schalter	301
4.1.2	Geschaltete Transistornetzwerke	305
4.1.3	Signale mit mehreren Quellen	307
4.1.4	FCMOS-Gatter	309
4.1.5	Bussignale und deaktivierbare Treiber	312
4.1.6	Gatter mit Pull-Up- und Pull-Down-Elementen	313
4.1.7	Transfergatter und Multiplexer	315
4.1.8	Geometrische Beschreibung	317
4.1.9	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	320
4.2	Zeitverhalten	322
4.2.1	Simulation des elektrischen Verhaltens	323
4.2.2	Verzögerungsparameter	329
4.2.3	Parameterbestimmung mit Ringinvertern	332
4.2.4	Gatter mit mehreren Eingängen	333
4.2.5	Simulation mit geschalteten Transistorbreiten	335
4.2.6	Reduktion auf zwei Zeitparameter	339
4.2.7	Gepufferte CMOS-Gatter	341
4.2.8	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	342
4.3	Speicherzellen, Latches und Register	344
4.3.1	Dynamische Speicherzellen	344
4.3.2	RS-Flipflop	345
4.3.3	D-Flipflops und Latches	346
4.3.4	Übernahme an der Taktflanke	347
4.3.5	Register aus Master-Slave-Flipflops	349
4.3.6	Taktversorgung	351
4.3.7	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	355
4.4	Schreib-Lese-Speicher	357
4.4.1	SRAM	358
4.4.2	Mehrportspeicher	365
4.4.3	Assoziativspeicher	369
4.4.4	Dynamische Speicher (DRAM)	371
4.5	Festwertspeicher	375
4.6	Programmierbare Logikschaltkreise	376

4.6.1	Programmierbare Tabellenfunktionen	377
4.6.2	Programmierbare UND-Matrix	378
4.6.3	Weitere programmierbare Elemente	379
4.6.4	Zusammenfassung	380
5	Komplexe Beispielentwürfe	381
5.1	Pipeline-Verarbeitung und Speicherengpass	381
5.1.1	Prinzip der Pipeline-Verarbeitung	381
5.1.2	Ausbalancieren einer Pipeline	383
5.1.3	Engpass Speicher	384
5.2	FIR-Filter mit Blockspeichern	384
5.2.1	Planung der Speicherstruktur und der Pipeline-Abläufe	385
5.2.2	Der gesamte Operationsablauf	387
5.2.3	Datentypen und Bearbeitungsmethoden	388
5.2.4	Das erste komplette Simulationsmodell	390
5.2.5	Ersatz der Zahlentypen durch Bitvektortypen	393
5.2.6	Ein- und Ausgabe über Signale	395
5.2.7	Umformung in eine Automatenbeschreibung	397
5.2.8	Zusammenfassung und Übungsaufgaben	402
5.3	Point-of-Interest-Berechnung	402
5.3.1	Die Zielfunktion	403
5.3.2	Grobkonzept der Hardware-Struktur	403
5.3.3	Optimierung der 2D-FIR-Filter	405
5.3.4	Entwurf der Filter-Pipeline	406
5.3.5	Nachladen des Bildausschnittsspeichers	408
5.3.6	Suche der betragsmäßig größten Filterantworten	410
5.3.7	Klassifikation	412
5.3.8	Sortieren der klassifizierten Punkte	412
5.3.9	Zusammenfassung	414
5.4	Entwurf eines RISC-Prozessors	414
5.4.1	Die Pipeline für Verarbeitungsbefehle	415
5.4.2	Lade- und Speichereinheit	417
5.4.3	Sprung-Pipeline	418
5.4.4	Entwurf eines Befehlssatzes für einen Minimalprozessor	420
5.4.5	Konstanten- und Datentypdefinitionen	423
5.4.6	Das Rechenwerk	424
5.4.7	Test des Rechenwerks	427
5.4.8	Schaltung zur Auswertung der Sprungbedingung	429
5.4.9	Das Pipeline-Objekt	430
5.4.10	Die Übergangsfunktion für einen Pipeline-Schritt	432
5.4.11	Test der Übergangsfunktion	435
5.4.12	Zusammenfassung	438

6	Lösungen zu den Übungsaufgaben	439
6.1	Modellbildung und Simulation	439
6.1.1	Entwurf digitaler Schaltungen	439
6.1.2	Funktion, Struktur und Simulation	440
6.1.3	Laufzeittoleranz	442
6.1.4	Register	444
6.1.5	Asynchrone Eingabe	446
6.1.6	Sequenzielle Schaltungen	447
6.2	Synthese und Logikoptimierung	450
6.2.1	Register-Transfer-Synthese	450
6.2.2	Schaltungsvereinfachung auf Basis der Schaltalgebra	452
6.2.3	Binäre Entscheidungsdiagramme	456
6.2.4	Zahlendarstellung	457
6.2.5	Addierer	459
6.2.6	Weitere Rechenwerke	459
6.3	VHDL im Detail	463
6.3.1	Imperative Beschreibungsmittel	463
6.3.2	Anwendungsspezifische Datentypen	465
6.3.3	Ein- und Ausgabe	466
6.3.4	Beschreibungsschablonen für digitale Schaltungen	469
6.3.5	Methoden und Funktionsbausteine für den Test	471
6.4	Vom Transistor zur Schaltung	472
6.4.1	Entwurf und Modellierung von CMOS-Gattern	472
6.4.2	Zeitverhalten	474
6.4.3	Speicherzellen, Latches und Register	476
6.5	Komplexe Beispielenwürfe	476
6.5.1	FIR-Filter mit Blockspeichern	476
A	Ergänzungen zu VHDL	479
A.1	Syntax, Schlüsselworte, Bezeichner, Konstanten	479
A.1.1	Syntaxregeln für die Beschreibung von Sprachkonstrukten	479
A.1.2	Schlüsselworte	479
A.1.3	Syntaxregeln für Bezeichner	480
A.1.4	Zeichen- und Zeichenkettenkonstanten	481
A.1.5	Darstellung von Zahlenwerten	481
A.1.6	Vordefinierte Attribute	482
A.2	Die Bibliothek »Tuc«	484
A.2.1	Textausgabe (Tuc.Ausgabe)	484
A.2.2	Kontrollierter Simulationsabbruch (Tuc.StopSim_pack)	486
A.2.3	Texteingabe (Package Tuc.Eingabe)	487
A.2.4	Arithmetische Operationen (Tuc.Numeric_Sim und Tuc.Numeric_Synth)	489
A.2.5	Pseudo-Zufallstest (Tuc.Zufallstest)	492

Sachverzeichnis 493

Literaturverzeichnis 501



<http://www.springer.com/978-3-642-17446-9>

Technische Informatik

Band 2: Entwurf digitaler Schaltungen

Kemnitz, G.

2011, XIII, 503 S. 372 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-642-17446-9