

Dipl.-Phys. Andreas Laudenbach,  
Darmstadt

# **Strukturierte System- und Chipentwurfsmethodik für den Maschinenbau am Bei- spiel eines hochkomplexen Bausteines zur Ottomotor- Brennverlaufberechnung**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik      Nr. **343**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Aufgabenstellung und Lösungsansätze . . . . .	3
1.3	Inhaltsübersicht . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Mechatronische Systeme</b>	<b>8</b>
2.1	Mechatronik - Definition und Überblick . . . . .	8
2.2	Beispiele mechatronischer Systeme . . . . .	10
2.2.1	Intelligenter Sensor (smart sensor) . . . . .	10
2.2.2	Aktive magnetische Lagerung . . . . .	12
2.2.3	Regelung eines Roboterarmes . . . . .	14
2.3	Anforderungen an die Mikroelektronik . . . . .	16
2.3.1	Klassifizierung anhand der Informationsverarbeitung . . . . .	16
2.3.2	Prozessrechnersysteme . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Entwurf mikroelektronischer Komponenten für mechatronische Systeme</b>	<b>20</b>
3.1	Entwurf mechatronischer Systeme . . . . .	20
3.2	Entwurf mikroelektronischer Systeme . . . . .	24
3.2.1	Problemstellungen und Lösungsansätze . . . . .	24
3.2.2	Stand der Technik . . . . .	25
3.2.3	Entwickelte Systementwurfsmethodik . . . . .	27
3.3	Entwurf anwendungsspezifischer integrierter Schaltungen . . . . .	29
3.3.1	Überblick über Entwurfsmethoden . . . . .	30
3.3.2	ASIP-Entwurfsmethodik für Anwendungen in der Mechatronik . . . . .	38
3.4	Makrozellentwurf . . . . .	42

3.4.1	Modulgenerierung . . . . .	42
3.4.2	Physikalischer Chipentwurf . . . . .	45
<b>4</b>	<b>CAD-Unterstützung der Entwurfsmethodik</b>	<b>48</b>
4.1	Approximation von Funktionen . . . . .	49
4.1.1	Geeignete mathematische Methoden . . . . .	50
4.1.2	VLSI-Implementierung von Funktionen . . . . .	56
4.2	Funktionelle Simulation . . . . .	58
4.3	Analyse des Rauschens auf Versorgungsbahnen . . . . .	61
4.3.1	Makromodellierung und Extraktion von Teilschaltungen . . . . .	62
4.3.2	Power-Ground-Simulation . . . . .	64
4.4	Digitaltest . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Entwicklung komplexer Makrozellen</b>	<b>69</b>
5.1	Multiplikations/Divisionsrechenwerk für Gleitkommazahlen . . . . .	69
5.1.1	Optimiertes Gleitkommazahlenformat für mechatronische Anwendungen . . . . .	70
5.1.2	Multiplikation und Division von Gleitkommazahlen . . . . .	73
5.1.3	Funktionsbeschreibung des realisierten Mantissenrechenwerkes . . . . .	78
5.1.4	Funktionsbeschreibung des realisierten Exponentenrechenwerkes . . . . .	81
5.1.5	Parameterisierbarkeit und Test . . . . .	84
5.2	Additions/Subtraktionsrechenwerk für Gleitkommazahlen . . . . .	85
5.2.1	Berechnungsalgorithmen . . . . .	85
5.2.2	Realisierung des Rechenwerkes . . . . .	87
5.2.3	Parameterisierbarkeit und Test . . . . .	91
5.3	Register und Vektorspeicher . . . . .	92
5.3.1	Speichergrundzelle . . . . .	92
5.3.2	Statische und dynamische Register . . . . .	94
5.3.3	Vektorspeichermodul . . . . .	94
5.4	Programmable Logic Array . . . . .	96
5.5	Weitere Makrozellen . . . . .	97
5.5.1	Multiplexer . . . . .	97
5.5.2	Pads . . . . .	97
5.5.3	Logikschaltungen . . . . .	98

<b>6</b>	<b>Thermodynamische Analyse und Regelung von Verbrennungsmotoren</b>	<b>99</b>
6.1	Allgemeine Thermodynamik des Verbrennungsmotors . . . . .	99
6.2	Prozeßrechnung für den Ottomotor . . . . .	100
6.2.1	Verwendete thermodynamische Grundgleichungen . . . . .	100
6.2.2	Modellbildung zur Heizverlaufberechnung . . . . .	101
6.2.3	Modellbildung zur Brennverlaufberechnung . . . . .	103
6.3	Kontrolle von Zündzeitpunkt und Einspritzung . . . . .	108
6.3.1	Arbeitsweise existierender Systeme . . . . .	108
6.3.2	Neuer regelungstechnischer Ansatz . . . . .	109
<b>7</b>	<b>Funktionelle Verifikation durch die Berechnung des Heizverlaufs mit einem Signalprozessor</b>	<b>111</b>
7.1	Algorithmus und zeitliche Anforderungen . . . . .	112
7.2	Funktionen des Heizverlaufrechners . . . . .	114
7.3	Architektur des Heizverlaufrechners . . . . .	114
7.4	Softwareentwicklung . . . . .	117
7.5	Ergebnisse der Implementierung mit dem Signalprozessor . . . . .	118
<b>8</b>	<b>Chipentwurf zur Brennverlaufberechnung</b>	<b>121</b>
8.1	Entwicklung eines VLSI-gerechten Brennverlaufalgorithmus . . . . .	122
8.1.1	Integrationsverfahren und Iterationsverfahren . . . . .	122
8.1.2	Optimierung des Brennverlaufalgorithmus . . . . .	125
8.2	Architekturentwicklung . . . . .	128
8.2.1	Datenformat und Rechenleistung . . . . .	128
8.2.2	Auswahl einer Architektur zur Parallelverarbeitung . . . . .	130
8.2.3	Synthese der Vektorarchitektur . . . . .	137
8.3	Multichipprojekt . . . . .	143
8.3.1	Entwurf der Testchips . . . . .	143
8.3.2	Digitaltest . . . . .	146
8.4	Entwurf des Einchipvektorprozessors . . . . .	150
8.4.1	Layoutgenerierung . . . . .	150
8.4.2	Verifikation des Entwurfes . . . . .	153
8.4.3	Test des Vektorprozessors . . . . .	153

<b>9 Systementwicklung zur Brennverlaufberechnung</b>	<b>159</b>
9.1 Prototypgenerierung und Emulation des Vektorprozessors . . . . .	161
9.2 Brennverlaufrechner . . . . .	163
9.2.1 Systemanforderungen und Funktionen . . . . .	163
9.2.2 Hardwarekomponenten des Brennverlaufrechners . . . . .	165
9.2.3 Software zum Betrieb des Brennverlaufrechners . . . . .	170
9.3 Entwicklung eines Makro-Assemblers . . . . .	172
9.3.1 Struktureller Aufbau des Makro-Assemblers . . . . .	174
9.3.2 Eigenschaften des Makro-Assemblers . . . . .	176
9.4 Mechatronisches System . . . . .	178
9.5 Zusammenfassung der Systemaspekte . . . . .	181
<b>10 Einsatz des Brennverlaufrechners</b>	<b>183</b>
10.1 Inbetriebnahme am Motorprüfstand . . . . .	183
10.2 Verifikation des Brennverlaufalgorithmus . . . . .	186
10.3 Analyse der zyklischen Schwankungen im Verbrennungsmotor . . . . .	190
<b>11 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>192</b>
11.1 Ergebnisse der Arbeit . . . . .	192
11.2 Ausblick . . . . .	193
<b>Literaturangaben</b>	<b>195</b>
<b>A Syntaxdefinition der VPASS-Sprache für den Makro-Assembler</b>	<b>204</b>
<b>B Brennverlaufalgorithmus als Makro-Assemblerprogramm</b>	<b>207</b>
<b>C Architekturbeschreibung des Vektorprozessors in der ALGIC-HDL211</b>	