

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ix
Formelzeichen	xi
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Entwicklung von Steuergeräten im Automobil	1
1.2 Ziele der Arbeit	5
1.3 Gliederung	6
2 Grundlagen	9
2.1 Algebro-Differentialgleichungssysteme	9
2.2 Numerische Integration	12
2.2.1 Das Euler-Cauchy-Verfahren	12
2.2.2 Runge-Kutta-Verfahren	13
2.2.3 Weitere Ansätze	14
2.3 Rechnergestützte Simulation physikalischer Systeme	14
2.3.1 Diskrete Ereignissysteme	17
2.3.2 Zeitgetriebene Systeme	19
2.3.3 Zeitkontinuierliche Systeme	20
2.3.4 Hybride Systeme	22
2.4 Modelica	23
2.4.1 Merkmale	23
2.4.2 Übersetzung und Simulation	28
2.5 Elektrische Motoren	30
2.5.1 Kommutatormaschinen	30
2.5.2 Asynchronmaschinen	33
2.5.3 Synchronmaschinen	38
2.5.4 Reluktanzmaschinen	41
2.6 Field-Programmable Gate Arrays	41
2.6.1 Übersicht	41
2.6.2 Programmierung	45
2.6.3 High-Level Synthese	49
2.7 Hardware-in-the-Loop Testmethodik	52
2.8 Grundbegriffe des Übersetzerbaus	54
3 Stand der Technik	59
3.1 HiL-Test elektrifizierter Antriebsstränge	59
3.1.1 Testmethoden	59
3.1.2 FPGA-basierte Simulation elektrischer Maschinen	60

3.2	Sprachen und Werkzeuge für ODE- und DAE-Simulationen	65
3.2.1	MATLAB/Simulink und Stateflow	65
3.2.2	SimScape	66
3.2.3	Modelica-fähige Werkzeuge	66
3.2.4	AMS-Erweiterungen	67
3.2.5	SPICE	68
3.2.6	Saber/MAST und SystemVision	68
3.3	Beschleunigung physikalischer Simulationen	69
3.3.1	Parallelisierung	69
3.3.2	GPGPU	71
3.3.3	FPGA	72
3.4	High-Level Synthese	73
3.4.1	Ansätze	73
3.4.2	Werkzeuge	85
4	Analyse	87
4.1	Anforderungen	87
4.1.1	Modellierungsanforderungen	87
4.1.2	Zeitliche Anforderungen	93
4.1.3	Fazit	94
4.2	Entwurfsunterstützung durch existierende Werkzeuge	95
4.2.1	Modelica und Werkzeuge	95
4.2.2	SimScape	96
4.2.3	Simulink und HDL Coder	96
4.2.4	C to Gates?	97
5	Konzeption	101
5.1	Entwurfsfluss	101
5.1.1	Gesamtkonzept	101
5.1.2	Übergabeformat: Anforderungen	102
5.1.3	Functional Mockup Interface	103
5.2	Extensible Intermediate Language	104
5.2.1	Typsystem	104
5.2.2	Domänenpezifische Operatoren	105
5.2.3	Scheduling-Restriktionen	106
5.2.4	Serialisierung	106
5.3	Kopplung mit FPGA Werkzeugkette	107
5.3.1	Zieltechnologie	107
5.3.2	Generate	107
5.4	Methodik	108
5.4.1	FPGA-freundliches Modellieren	108
5.4.2	Synthesekonzept	109

6 Umsetzung	111
6.1 Das System#-Framework	111
6.1.1 Übersicht	111
6.1.2 SysDOM	112
6.1.3 Die generative Modellierungsebene	116
6.1.4 Die deskriptive Modellierungsebene	116
6.1.5 Elaboration	122
6.1.6 Typsystem	122
6.1.7 Simulationskernel	124
6.1.8 Code-Generierung	126
6.2 Dekompilierung von deskriptivem Code	127
6.2.1 Strukturelle Analyse	127
6.2.2 Isolation des Laufzeitverhaltens	128
6.2.3 Methoden ohne „async“ Modifier	129
6.2.4 Methoden mit „async“ Modifier	137
6.3 High-Level Synthese in System#	139
6.3.1 Übersicht	139
6.3.2 Programmtransformationen	140
6.3.3 Komponentenbibliothek	143
6.3.4 Scheduling	144
6.3.5 Ressourcen-Allokation und Binding	145
6.3.6 Interconnect-Allokation	146
6.3.7 Kontrollpfad-Synthese	147
6.3.8 Syntheseplan	152
6.4 Domänen-spezifische Bausteine	154
6.4.1 Behandlung linearer Systeme	154
6.4.2 Behandlung nichtlinearer Systeme	157
6.4.3 Xilinx IP Cores	157
6.5 Automatisierte Auslegung von Festkommadatentypen	158
6.5.1 Einführung	158
6.5.2 Verwandte Arbeiten	160
6.5.3 Bestimmung der Wertebereiche	161
6.5.4 Sensitivitätsanalyse	162
6.5.5 Wortbreitenbestimmung	166
6.6 Synthesewerkzeug	169
6.6.1 Übersicht	169
6.6.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle	170
6.6.3 Verifikation und Logiksynthese	173
7 Praxis-Erprobung: Elektromotoren	175
7.1 Ausgewählte Beispiele	175
7.2 Inbetriebnahmen bei Projektpartnern	178
7.3 Parametrierung von Festkommaarithmetik	180
7.4 Synthese-Ergebnisse	186
7.4.1 Latenzkonfiguration arithmetischer Operatoren	187

7.4.2	FSM vs. HMA	192
7.4.3	Performanz-steigernde Maßnahmen	195
7.5	Vergleich mit existierenden Lösungen	197
7.5.1	E/A-Schnittstelle zur Signalkonditionierung	198
7.5.2	E/A-Schnittstelle zur Teststeuerung	198
7.5.3	Sicherheitsebene	199
7.5.4	Motorsimulation	199
7.5.5	Inverter	200
7.5.6	Fazit	200
8	Zusammenfassung	203
9	Ausblick	207
A	Verzeichnisse	211
A.1	Eigene Veröffentlichungen (E)	211
A.2	Betreute studentische Arbeiten (B)	213
A.3	Fremdliteratur	215
A.4	Standards und Normen (Std)	238
A.5	Webquellen (WWW)	239
A.6	Abbildungsverzeichnis	242
A.7	Tabellenverzeichnis	243