

Modellierung und Simulation heterogener Systeme

Peter Schwarz

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, Außenstelle EAS Dresden

Zeunerstraße 38, 01069 Dresden

Tel. / Fax (0351) 4640-730 / -703, email: schwarz@eas.iis.fhg.de

Schaltungs- und Systementwurf werden häufig zunächst nur aus der Sicht der Elektronik, speziell auch der Mikroelektronik, betrachtet. Das ist bei der Komplexität der zu entwerfenden Schaltungen, der Wichtigkeit analoger und digitaler Signalverarbeitung sowie der Leistungsfähigkeit von CAD-Systemen für den Schaltkreisentwurf durchaus verständlich. Daneben spielt aber die integrierte Betrachtung des *Gesamtsystems*, in das die elektronische Schaltung eingebettet ist, eine große Rolle.

Heterogene Systeme sind durch das Zusammenwirken von Teilsystemen aus verschiedenen Domänen (Mechanik, Elektronik, Optik, ...) charakterisiert. Konstruktion, Modellierung, Simulation und Optimierung sind die wichtigsten Felder der Rechnerunterstützung beim Entwurf heterogener Systeme in Nachrichtentechnik, Meß- und Automatisierungstechnik, Mikrosystemtechnik, Fahrzeugtechnik und im Maschinenbau. Die verschiedenen Formen der Informations- und Signalverarbeitung oder des Materialflusses sowie eine entsprechend große Vielfalt der Beschreibungsmittel, Modelle und Simulationsmöglichkeiten bereiten erhebliche Probleme beim rechnergestützten Entwurf.

In diesem Vortrag werden einige Ansätze zur Modellbildung und zur Simulation heterogener Systeme vorgestellt, für die in unserem Institut eigene Erfahrungen vorliegen. Dabei standen Probleme im Vordergrund, bei denen elektronische Teilsysteme eine wesentliche Rolle spielen. Daher wurden sehr oft Simulatoren aus dem Bereich der Elektronik auch für *allgemeinere* Simulationsaufgaben eingesetzt. Für den Entwurf steht grundsätzlich eine Vielzahl leistungsfähiger Simulatoren zur Verfügung:

- Matlab/Simulink, MATRIXx, ACSL, ... allgemeine kontinuierliche Systeme
- Statemate, Speedchart; PETRI-Netz-Simulatoren, ... allgemeine diskrete Systeme
- DYMOLA, ADAMS, ANSYS, ITI-SIM, ... mechanische Systeme
- COSSAP, SPW, DSPStation, ... Nachrichtentechnik
- Verilog, QuickSim, diverse VHDL-Simulatoren, ... digitale Elektronik
- SPICE, ELDO, Saber, SPECTRE, ... analoge Elektronik

Bewährt haben sich *Multi-Level-Simulatoren* (bei denen unterschiedliche Abstraktions- und Modellierungsebenen verwendet werden) und *Mixed-Mode-Simulatoren* (für analoge und digitale Teilsysteme). Mehrere der o.g. Simulatoren sind bereits für heterogene Systeme geeignet, z.B. durch Multi-Level-Simulation und Modellbibliotheken für verschiedene physikalische Domänen. Dabei sind es nicht nur die "großen" CAD-Hersteller, die diesen Trend verfolgen; auch preiswerte PC-Simulatoren wie beispielsweise ITI-SIM [1], SIMPLORER oder SMASH sind z.T. schon für kombinierte elektrische, mechanische, hydraulische, regelungstechnische, ... Systeme geeignet.

Bei der Vielfalt und Komplexität technischer Systeme gelangt man jedoch häufig an die Leistungsgrenzen von Standardsimulatoren und ihrer Modellbibliotheken. Es erscheint aussichtslos, von *einem* Simulator, *einem* Modellierungsansatz und *einem* Beschreibungsmittel die Behandlung komplexer Simulationsaufgaben zu erwarten. Zwei Ansätze haben sich als vielversprechende, gegenseitig ergänzende Wege herausgestellt:

- Modellierung: durch Zusammenführung verschiedener Modelle und Modelltransformation entsteht *ein* Gesamtsystem-Modell, das mit *einem* Simulator bearbeitet werden kann,
- Simulatorkopplung: die Teilsysteme werden mit unterschiedlichen, miteinander *gekoppelten* Simulatoren behandelt.

Im Bild 1 sind diese beiden Wege veranschaulicht. Gelegentlich (z. B. in der Mikrosystemtechnik) ist es auch nötig, zwei- und dreidimensionale Komponentenbeschreibungen und die Lösung partieller Differentialgleichungen mit Hilfe von FEM-Simulatoren einzubeziehen. Zunächst wird man versuchen, durch geeignete Modellbildung (vor allem durch Übergang zu abstrakteren oder einfacheren Beschreibungen auf den "oberen" Ebenen) mit *einem* Simulator auszukommen. Modellierung für heterogene Systeme ist ein komplizierter und aufwendiger Prozeß, der kaum automatisiert werden

kann. Nur für einzelne Systemklassen sind bereits Algorithmen [2] und Werkzeuge (z.B. Matlab Toolboxes) entwickelt worden:

- Approximationsverfahren für die Übertragungsfunktionen linearer Netzwerke im Frequenz- und Zeitbereich (Filterberechnung) [3],
- Identifikation linearer Systeme im Zeit- und Frequenzbereich (Regelungstechnik) [4],
- Parameteroptimierungs- und Approximationsverfahren [5],
- Ordnungsreduktion großer linearer Systeme,
- Neuronale Netze für statische nichtlineare Systeme .

Sie können bei heterogenen Systemen für deren Teilsysteme eingesetzt werden. Die ersten Etappen der Modellbildung aber (die Wahl der Modellstruktur und des Modellansatzes bzw. bei heterogenen Systemen der zu kombinierenden Ansätze, die Partitionierung in Teilmodelle und deren Kopplung, die Festlegung der Beschreibungsmittel) bleiben weitgehend der Intuition und Erfahrung überlassen.

Bei der Verwendung nur eines Simulators wird es nötig sein, unterschiedliche Modellformen durch *Modelltransformation* in die Eingabesprache des Simulators zu überführen. Auch die in der Elektronik bewährten Verfahren der *Makromodellierung*, die dort traditionell auf die verbreiteten SPICE-verwandten Simulatoren zugeschnitten sind [6], lassen sich auf andere Systemklassen erweitern. Bei der Vielfalt heterogener Systeme wäre es zuviel verlangt, in allen Fällen eine automatische Transformation zu erwarten. Die gegenwärtige Vielzahl an Beschreibungsmitteln wird sich verringern, wenn die Standardisierungsarbeiten zu VHDL-AMS (VHDL, mit Analog- und Mixed-Signal-Erweiterungen [7]) abgeschlossen sind und diese Sprache durch viele Simulatoren unterstützt wird.

Ist die Modellbildung zu aufwendig oder sind die Systeme so heterogen, daß eine einheitliche Beschreibung und Simulation nicht möglich ist, bleibt als Ausweg die *Simulatorkopplung*. Dafür werden zunehmend Lösungen für Standardsimulatoren angeboten. Es lassen sich aber auch über C-Schnittstellen, die eigentlich für das Einbringen neuer Modelle gedacht sind, Simulatoren durch den Anwender miteinander koppeln. Leider ist die Simulatorkopplung ebenfalls mit Problemen behaftet:

- der Umgang mit mehreren Beschreibungsmitteln, Kommandosprachen und Ausgabertools,
- die Organisation des Datentransfers (bei selbstprogrammierten Kopplungen),
- algorithmische Probleme bei eng gekoppelten Teilsystemen (z.B. unterschiedliche Integrationsalgorithmen und -schrittweiten, algebraische Schleifen).

Der grundsätzlich Vorteil liegt vor allem darin, daß für jedes Teilsystem der „optimal geeignete“ Simulator ausgewählt werden kann.

Diese recht allgemeinen Bemerkungen zur Modellierung und Simulatorkopplung sollen an **Beispielen heterogener Systeme** aus verschiedenen Anwendungsgebieten illustriert werden, die in unserem Institut bearbeitet wurden. Dabei wurde neben einigen der o.g. Simulatoren auch der selbstentwickelte experimentelle Multi-Level-Simulator KOSIM (Bild 2) eingesetzt. Er wurde ursprünglich für gemischt analog-digitale Schaltungen und Systeme entwickelt [8]. Nichtelektrische Komponenten - die durch Differentialgleichungen modelliert werden - können über eine dafür konzipierte Schnittstelle eingebunden werden [9]. Ähnliche Schnittstellen existieren auch für digitale/zeitdiskrete Modelle und für die Kopplung mit anderen Simulatoren, z.B. mit VHDL-Simulatoren.

1. Als Beispiel eines typischen **Mikrosystems** konnte durch die Kopplung eines FEM-Simulators mit einem Schaltungssimulator ein "gefesselter" Beschleunigungssensor [10], [11] simuliert werden (Bild 3). Die Auslenkung der an Biegebalken aufgehängten Masse bewirkt über einen Regler eine elektrostatische Gegenkraft. Daher ist die Wechselwirkung zwischen elektrostatischem Feld und bewegten mechanischen Komponenten zu simulieren. Für derartige Simulatorkopplungen [12], [13] und für eine *verteilte Simulation* wurden verschiedene Arten des Datentransfers erprobt: TCP/IP, Filetransfer und pvm (parallel virtual machine). In der Mikrosystemtechnik sind aber auch leistungsfähige Verfahren zur Modellierung mit einer auf die Systemsimulation *zugeschnittenen Genauigkeit* [14] entwickelt worden, die z.B. auf den Einsatz von Netzwerkanalyse-Programmen orientieren. Dabei werden Analogie-Beziehungen zwischen verschiedenen physikalischen Domänen ausgenutzt oder verallgemeinerte, also auch nicht-elektrische, Netzwerke verwendet [15], [16], [17], [18], [19], [20]. Bild 4 zeigt die Netzwerk-Modellierung eines komplizierten Beschleunigungssensors [21].

2. Bei temperaturempfindlichen Bauelementen in einem integrierten Schaltkreis muß die Wechselwirkung zwischen elektrischer Schaltung und der Temperaturverteilung im Chip berechnet werden. In Bild 5 ist dargestellt, wie durch Kopplung eines Schaltungssimulators (zur Berechnung der temperatur- und zeitabhängigen Verlustleistung) und eines FEM-Simulators (für die Wärmeausbreitung) eine genaue Berücksichtigung der **thermisch-elektrischen Wechselwirkungen** möglich wird [13]. Allerdings ist dieses Verfahren sehr rechenzeitaufwendig. Es empfiehlt sich, für das thermische System ein Modell zu konstruieren, das zusammen mit der elektronischen Schaltung von einem Schaltungssimulator berechnet werden kann (Bild 6). Für die *automatische* Modellgenerierung eines statischen thermischen Systems - ausgehend von einem FEM-Modell - ist ein Tool entwickelt worden [22].

3. Bei **nachrichtentechnischen Systemen** ist häufig eine gemeinsame System- und Schaltungssimulation zweckmäßig: Gesamtsystemsimulation, schrittweise Verfeinerung des schaltungstechnischen Entwurfs, Umgebungssimulation,... Es werden Standardsimulatoren für die jeweiligen Aufgabenklassen eingesetzt (Bild 7). Bei der Vorbereitung einer *Simulatorkopplung* liegen die Probleme einerseits in der Entwicklung einer weitgehend simulator-unabhängigen Koppelsoftware, andererseits in der Synchronisation von Simulatoren mit unterschiedlichen Zeitablaufsteuerungen (datenstromorientiert / getaktet / zeitkontinuierlich) [23]. Die Behandlung heterogener Systeme der Nachrichtentechnik mit nur *einem* Simulator ist möglich, wenn geeignete Modellbibliotheken und ein Multi-Level-Simulator zur Verfügung stehen [24].

4. Auch für die **Automatisierungstechnik** hat sich eine *Mehrebenen*-Betrachtung als zweckmäßig erwiesen [25], [26]. Besonders einfach wird auch hier die Simulation, wenn der einzusetzende Simulator bereits mehrere gekoppelte Simulationsalgorithmen besitzt und verschiedene Eingabesprachen zuläßt (Bild 8). Mit dem Simulator KOSIM konnte so eine Druckwalzensteuerung problemangepaßt modelliert und simuliert werden (hierarchische zeitbewertete PETRI-Netze für die Steuerung, Differentialgleichungen für die Mechanik, Blockschaltbilder für den Regler).

5. Für die *Performance-Analyse* von **verteilten Systemen mit Bus-Kopplung** werden oft bedienungstheoretische Methoden verwendet. Für Monte-Carlo-Analysen läßt sich auch ein VHDL-Simulator verwenden, wenn geeignete Bus-Modelle verfügbar sind. Ein zusätzlicher Vorteil besteht dann in der wesentlich höheren Modellierungsgenauigkeit, da das Verhalten der am Bus angeschlossenen Stationen, datenabhängige Signalverarbeitungszeiten u. dgl. berücksichtigt werden können (Bild 9). Für Feldbusse (CAN, PROFIBUS, LON) wurde eine Simulationsumgebung geschaffen [27], [28], [26]. Ein zusätzlicher Vorteil des VHDL-basierten Modellansatzes besteht darin, daß er durch Verfeinerung für die *Synthese* der Bus-Steuerung weiterentwickelt werden kann.

6. Bei der Systemsimulation eines *kamerageführten Fahrzeuges* (Bild 10) erwies sich der Leistungsumfang von analog/digitalen Schaltungs- und Systemsimulatoren wie Saber, ELDO oder KOSIM als ausreichend, da diese über Schnittstellen zum Einbringen neuer Modelle verfügen [29]. Es handelt sich um ein typisches Anwendungsbeispiel für Hardwarebeschreibungssprachen wie VHDL-AMS und Multi-Level-, Mixed-Mode-Simulatoren. Gerade bei lernenden Systemen ist der Einsatz von Simulatoren wesentlich, da dadurch Situationen berücksichtigt werden können, die aus Sicherheits- oder Aufwandsgründen in der Realität nicht herbeigeführt werden können.

7. Heterogene Systeme enthalten oft programmierbare Komponenten (embedded systems). Beim Entwurf großer digitaler Systeme und beim HW/SW-Codesign hat sich der Einsatz von **Emulatoren** und Hardware-Modellern bewährt. Wir haben eine Kopplung von VHDL-Simulatoren mit nutzerprogrammierbaren FPGA-Boards realisiert, die sowohl zur Simulationsbeschleunigung [30] als auch zur Unterstützung des Rapid Prototyping [31] eingesetzt werden kann (Bild 11). Eine Simulationsumgebung für heterogene HW/SW-Systeme zeigt Bild 12 - gegenwärtig ist eine derart umfassende Lösung jedoch mehr Vision als Realität

Diese Beispiele sollten zeigen, daß sich **Modellierung und Simulatorkopplung** beim Entwurf heterogener Systeme gut ergänzen. Methoden und CAD-Tools aus dem Bereich der Elektronik (VHDL, Netzwerk-Modelle, ...) lassen sich mit großem Nutzen einbringen. Die Entwicklung standardisierter Beschreibungssprachen wie VHDL-AMS wird diesen Prozeß unterstützen, problemspezifische Beschreibungsmittel und Simulatorkopplungen aber nicht überflüssig machen.

Die vorgestellten Arbeiten wurden teilweise von der DFG (z.B. im Sonderforschungsbereich 358 "Automatisierter Systementwurf") und vom BMBF in Verbundprojekten gefördert. Die FPGA-Prototyper-Umgebung wurde gemeinsam mit Mikroelektronik Design Dresden GmbH (MDD) im Rahmen eines Förderprojektes des Sächsischen Wirtschaftsministeriums entwickelt.

Literatur

- [1] Grossmann, K.; Uhlig, A.: Von der Hydrauliksimulation zur Systembewertung. *Ölhydraulik und Pneumatik* 40(1996)11, 766-770
- [2] Johansson, R.: *System modeling and identification*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1993
- [3] Unbehauen, R.: *Netzwerk- und Filtersynthese*. R. Oldenbourg, München 1992.
- [4] Isermann, R.: *Identifikation dynamischer Systeme*. Springer, Berlin 1992.
- [5] Box, G.E.P.; Draper, N.R.: *Empirical Model Building and Response Surfaces*. Wiley, 1987.
- [6] Conolly, J.A.; Choi, P.: *Macromodeling with SPICE*. Prentice Hall, Englewood Cliffs 1992.
- [7] VHDL-AMS: IEEE DASC 1076.1 WG Documents. See <http://www.vhdl.org/analog/>
- [8] Schwarz, P. u.a.: KOSIM - ein Mixed-Mode, Multi-Level-Simulator. In: *Informatik-Fachbericht 255*, Springer, Berlin 1990, 207-220
- [9] Clauß, C. u.a.: Anwendung des Multi-Level-Simulators KOSIM für die Simulation von Mikrosystemen. 1. Workshop "Methoden- und Werkzeugentwicklung für den Mikrosystementwurf", Karlsruhe 1994, 191-198
- [10] Clauß, C.; Gruschwitz, R.; Schwarz, P.; Wünsche, S.: Simulation mikrosystemtechnischer Aufgaben mit gekoppelten Simulatoren. 2. Fachtagung Mikrosystemtechnik, Chemnitz 1995, 92-101
- [11] Eccardt, P.C. et al.: Coupled finite element and network simulation for microsystem components. *Proc. MICRO SYSTEM Technologies (MST'96)*, VDI-Verlag, Potsdam 1996, 145-150.
- [12] Klein, A.; Schroth, A.; Blochwitz, T.; Gerlach, G.: Two approaches to coupled simulation of complex microsystems. *Proc. EUROSIM '95*, Vienna 1995, 639 - 644.
- [13] Wünsche, S.; Clauß, C.; Schwarz, P.; Winkler, F.: Electro-thermal circuit simulation using simulator coupling. *IEEE Trans. VLSI-5(1997)3*, 277-282.
- [14] Wachutka, G.: Tailored modeling: a way to the 'virtual microtransducer fab' ? *Sensor and Actuators A* 46-47 (1995), pp. 603-612.
- [15] Koenig, H. E.; Blackwell, W. A.: *Electromechanical System Theory*. McGraw-Hill, 1961.
- [16] Lenk, A.: *Elektromechanische Systeme* (3 Bände). Verlag Technik, Berlin 1971 - 1973.
- [17] Reinschke, K.; Schwarz, P.: *Verfahren zur rechnergestützten Analyse linearer Netzwerke*. Akademie-Verlag, Berlin 1976.
- [18] Voigt, P.; Wachutka, G.: Electro-fluidic microsystem modeling based on Kirchhoffian network theory. *Sensor and Actuators A* 66 (1998)1-3, pp. 6-14.
- [19] Klein, A.; Gerlach, G.: System modelling of microsystems containing mechanical bending plates using an advanced network description method. *Proc. MST'96*, Potsdam 1996, 299-304.
- [20] Pelz, G. et al.: MEXEL: Simulation of microsystems in a circuit simulator using automatic electromechanical modeling. *Proc. MICRO SYSTEM Technologies (MST'94)*, VDE-Verlag, Berlin 1994, 651-657.
- [21] Neul, R. et al.: A modeling approach to include mechanical microsystem components into system simulation. *Proc. Design, Automation & Test Conf. (DATE'98)*, Paris, 1998, 510-517.
- [22] Wünsche, S.: Ein Beitrag zur Einbeziehung thermisch-elektrischer Wechselwirkungen in den Entwurfsprozeß integrierter Schaltungen. *Dissertation TU Chemnitz*, 1998.
- [23] Einwich, C. u.a.: Simulatorkopplung für den Entwurf komplexer Schaltkreise der Nachrichtentechnik. 7. ITG-Fachtag. *Mikroelektronik für die Informationstechnik*, Chemnitz 1996, 139-144
- [24] Engelmann, F.; Jentschel, H.-J.; Schwarz, P. (Hrsg.): *Modellierung und Simulation in der Nachrichtentechnik*. *Proc. Workshop zum Abschluß des BMFT-Projektes*, Dresden 1995
- [25] Donath, U.; Haufe, J.; Schwarz, P.: Mehr-Ebenen-Simulation automatisierungstechnischer Prozesse und Steuerungen. 4. Tagung Entwurf komplexer Automatisierungssysteme, Braunschweig 1995, 543-553.
- [26] Donath, U.; Schwarz, P.: Modellierung und Simulation verteilter Automatisierungssysteme. 5. Fachtagung „Entwurf komplexer Automatisierungssysteme“ (EKA'97), Braunschweig, Juni 1997, 361-377
- [27] Altmann, S.; Donath, U.: Konfiguration und Leistungsbewertung verteilter Kommunikationssysteme mittels VHDL-Modellierung und Simulation. 7. ITG-Fachtagung "Mikroelektronik für die Informationstechnik", Chemnitz, März 1996, 133-138
- [28] Donath, U.; Hartenstein, D.; Kabitzsch, K.; Schwarz, P.: Simulationsunterstützung für den Entwurf von Feldbussystemen. *Proc. Feldbustagung FET'97*, Wien, Oktober 1997, Springer, Wien 1997, 263-270
- [29] Schneider, P.; Schwarz, P.: Systemsimulation unter Einbeziehung neuronaler Netze. *ITG-Fachtagung Mikroelektronik für die Informationstechnik*. *ITG-Fachbericht 127*, Berlin 1994, 135-140.
- [30] Schwarz, P.; Haufe, J.; Große, J.: Beschleunigung der Logiksimulation mit Low-Cost-Emulatoren. *Proc. 11. Symposium Simulationstechnik (ASIM'97)*, Dortmund, November 1997, Vieweg-Verlag, 249-254

Dresdener Arbeitstagung „Schaltungs- und Systementwurf“ DASS'98, Dresden, 26.5.1998

[31] Pika, J.: Prometheus Prototyping im Designprozeß. Diese Tagung .