

Systementwurf und Systemsimulation mit VHDL-AMS am Beispiel der Rundumprojektion mit 2D-Mikrospiegelarray

Michael Schlegel, Dietmar Müller

Professur Schaltungs- und Systementwurf, TU Chemnitz, Deutschland

Kurzfassung

Im Rahmen des SFB 379 „Mikromechanische Sensor- und Aktorarrays“ entstand an der TU Chemnitz ein mikromechanisches 2D-Spiegelarray, welches im Demonstrator „Rundumprojektion“ zum Einsatz kommt. Das gesamte System, bestehend aus Delta-Sigma-Demodulator, Hochspannungsverstärker, Mikrospiegelarray und optischem Strahlengang, wurde komplett in VHDL-AMS auf hohem Abstraktionsniveau modelliert und simuliert. Der Vortrag beschreibt die Besonderheiten von VHDL-AMS, die entstandenen System-Level-Modelle, die angewandten Entwurfsmethoden, Entwurfsstile und die erzielten Resultate. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den analog-digitalen und elektrisch-mechanischen Schnittstellen und der VHDL-untypischen Beschreibung des optischen Verhaltens.

1. Einleitung

Beim Entwurf von Mikrosystemen und deren Applikation gewinnt die komponentenübergreifende Simulation und die Simulation gesamter Systeme ständig an Bedeutung. Nur auf diese Art und Weise können die zum Teil sehr komplizierten Zusammenhänge zwischen den Komponenten erfaßt und ausgewertet werden. Dies ist von Bedeutung, da einzelne, auf ihre Funktionalität simulierte Komponenten eines Systems in ihrem Zusammenspiel ein schwer vorhersagbares Verhalten zeigen können. Werden diese unerwünschten Eigenschaften zu spät im Entwurfsprozeß erkannt, entstehen unnötigerweise hohe Kosten.

Mikrosysteme können aus analogen Komponenten mit unterschiedlichsten physikalischen Domänen (elektrisch, mechanisch, thermisch, optisch usw.) und aus umfangreichen digitalen Komponenten bestehen. Für die Simulation kompletter derartiger Systeme sind weder FEM-, Netzwerk- noch Digital simulatoren als einzelne Simulatoren, wie sie bei der Simulation mikrosystemtechnischer Komponenten eingesetzt werden, geeignet. Durch eine Kopplung von Simulatoren ist man in der Lage, derartige Systeme im Ganzen zu simulieren, allerdings verfügt man nicht über einheitliche Schnittstellen zum Austausch der Modelle. Werden Teilsysteme in FEM beschrieben, ergeben sich lange Rechenzeiten. Für die Gesamtsystemsimulation ist es daher vorteilhaft, das Verhalten von Komponenten zu abstrahieren, indem z. B. durch Vereinfachung oder Parameterreduktion ein FEM-Modell auf eine Menge gekoppelter algebraischer Differentialgleichungen abgebildet wird. Damit ist zur Gesamtsystemsimulation nur noch ein Simulator not-

wendig, der Netzwerke mit Differentialgleichungen und digitales Verhalten simulieren kann. Weitere Anforderungen an Simulatoren zur Systemsimulation bestehen hinsichtlich der Zeitschrittsteuerung. Es ist von Vorteil, wenn der Simulator digitale Komponenten und die verschiedenen analogen physikalischen Domänen mit unterschiedlichen Zeitschritten berechnet. So kann es sein, daß eine getaktete digitale Komponente mit kürzeren Zeitschritten berechnet werden muß, als eine elektrische Komponente, die die von der digitalen Komponente erzeugte Spannung verarbeitet. Wird von dieser verarbeiteten Spannung über einen Motor eine mechanische Komponente angetrieben, so sind zur Berechnung der Mechanik oft größere Rechenschrittweiten möglich als zur Berechnung der elektronischen Komponente.

Mit der Verabschiedung des IEEE Standards 1076.1-1999 für VHDL-AMS steht seit 1999 eine international standardisierte Beschreibungssprache zur Verfügung, mit der eine geschlossene, netzwerkbasierte Simulation verschiedenster physikalischer Sachverhalte ohne Analogietransformation gemeinsam mit digitalen Systemen möglich ist. Dem Anwender steht es dabei frei, ob er sein System auf hohem Abstraktionsniveau oder als detailliertes Netzwerkmodell beschreibt.

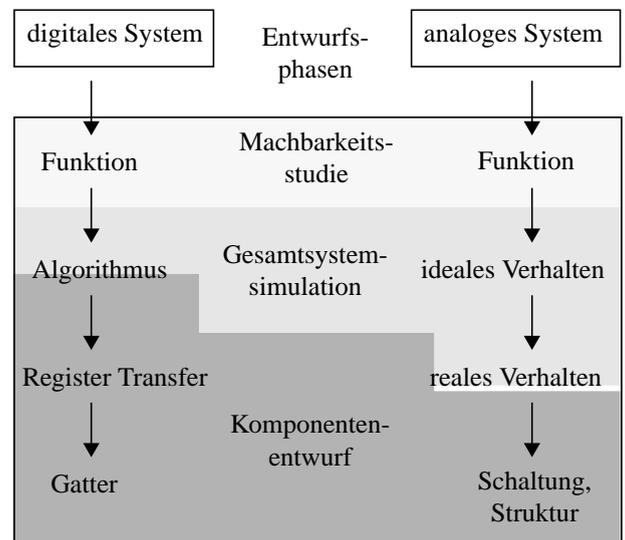


Bild 1 Abstraktionsebenen im Systementwurf (nach [11])

2. Eigenschaften von VHDL-AMS

Die Hardwarebeschreibungssprache VHDL ist eine in großem Umfang genutzte Beschreibungsform für digitale Systeme. Zu den wesentlichsten Eigenschaften von VHDL zählen:

- *sequential* und *concurrent* Statements
Zuweisungen die nacheinander bzw. quasiparallel abgearbeitet werden
- Trennung von Interface und Verhalten eines Modells durch *Entity* und *Architecture*
- modulare und flexibel änderbare Modelle
- ereignisorientierte Simulation, diskrete Zeitachse
- international standardisiert

Zur Simulation analoger Netzwerke eignet sich VHDL jedoch nicht. Daher fanden seit Mitte der 90er Jahre seitens des IEEE Aktivitäten statt, die Sprache VHDL für analoge und Mixed-Signal Anwendungen zu erweitern. Das Resultat ist der 1999 verabschiedete Standard für VHDL-AMS (VHDL Analog and Mixed Signal).

VHDL-AMS besitzt zusätzlich zu VHDL folgende erweiterte Eigenschaften [1]:

- *simultaneous* Statements
Die *simultaneous* Statements bilden ein Netzwerk nichtlinearer gekoppelter algebraischer Integro-differentialgleichungen, das von einem Netzwerksimulator gelöst wird.

- konservative kirchhoffsche Knoten (TERMINAL), nichtkonservative Knoten (QUANTITY)
- dynamische Schrittweitenregulierung, kontinuierliche Zeitachse
Der Netzwerksimulator bestimmt unabhängig von digitalen Events den nächsten Rechenzeitpunkt für die *simultaneous* Statements und erzeugt nur mittels des ABOVE-Statements Events für die die digitale Simulation.
- Simulation von Diskontinuitäten mittels BREAK-Statement

Gegenüber Systemen mit Simulorkopplung bzw. klassischen SPICE- oder VHDL-Simulatoren besitzt VHDL-AMS folgende Vorteile:

- Simulation von netzwerkbasierter Mixed-Signal- und Multi-Domain-Systemen und analytisch beschreibbaren Feldern
- Modelle sind global austauschbar
- nicht an Simulator bzw. Hersteller gebunden

Allerdings ergeben sich auch einige Nachteile wie:

- derzeit wenige Simulatorhersteller
- FEM-Problematiken (elektromagnetische Felder, flexible Körper etc.) müssen stark abstrahiert werden
- analytische Herleitung von Modellen erfordert sehr viel know-how beim Entwerfer

3. Demonstrator „Rundumprojektion“

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 379 an der TU Chemnitz beschäftigte sich der Teilbereich A2 „Systementwurf“ u. a. mit der Modellierung, Simulation und dem Aufbau eines Demonstrators für ein 360°-

Bewegtbild-Rundumprojektionssystem. Das System besteht aus der Ansteuerelektronik, einem in Si-Bulk-Mikromechanik gefertigten Mikrospiegelarray mit 7x7 Einzelspiegeln und einem optischen System zur Laserstrahlführung.

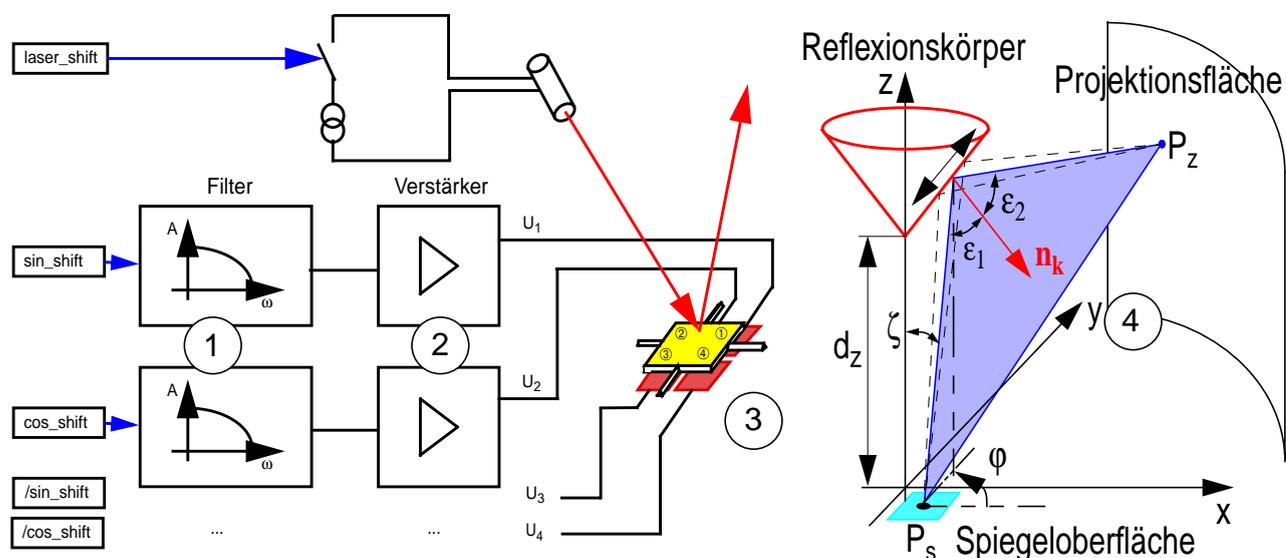


Bild 2 Teilsysteme des Demonstrators „Rundumprojektion“
1-Tiefpaßfilter zur Delta-Sigma-Demodulation, 2-Hochspannungsverstärker,
3-Mikrospiegelarray, 4-optisches Projektionssystem

Ein PC generiert mit Hilfe eines Bildeditors und einer ISA-Einsteckkarte vier Delta-Sigma modulierte Ansteuersignale. Diese werden anschließend mittels eines Tiefpasses zu einem analogen Signal demoduliert und mit einem Hochspannungsverstärker auf Amplituden, je nach verwendetem Spiegelarray, von 100...400 V verstärkt. Mit diesen Hochspannungssignalen werden die Einzelspiegel des Spiegelarrays angesteuert, und damit ein Laserstrahl in x- und y-Richtung abgelenkt. Dieser trifft anschließend auf einen Reflexionskörper, der ihn auf den Projektionszylinder wirft.

4. Systemmodellierung und System-simulation

Entwurfsablauf

Der Entwurfsablauf bei dem hier vorgestellten System vollzieht sich zunächst ähnlich dem Entwurf digitaler Systeme nach einer Top-Down-Strategie. Ausgehend von einer Systemspezifikation wird das System in Teilsysteme partitioniert. Für den Demonstrator „Rundumprojektion“ ergeben sich so die folgenden Teilsysteme:

- Software zur Bilderzeugung
- Hardware zur Spannungserzeugung
 - PC-Einsteckkarte
 - Digital-Analog-Wandler
 - Hochspannungsverstärker
- Projektor
 - Laserquelle
 - Spiegelarray aus 7×7 Einzelspiegeln: elektrisches, mechanisches und optisches Teilsystem (Laser-Reflexion am Spiegel)
 - Reflexionskörper
 - Projektionsfläche

Im nächsten Schritt erfolgt der Entwurf dieser Teilsysteme. Im Gegensatz zum digitalen Entwurf kann hier nicht weiter nach der Top-Down-Methode vorgegangen werden. Für den Entwurf der elektrischen Teilsysteme müssen zunächst die Modelle der zu verwendenden Bauteile selbst entwickelt werden, sofern man sie nicht aus Bibliotheken entnehmen kann. Bevor diese Modelle in die Gesamtsystemsimulation eingefügt werden, ist es zweckmäßig, sie auf korrekte Funktionalität zu testen. Für die Modellierung des Spiegelarrays wurden vorhandene MATLAB und HDL-A Modelle entsprechend angepaßt und zunächst einzeln getestet und mit den Original-Modellen verglichen. Für die optischen Komponenten wurden abstrakte, auf Vektormathematik beruhende, in MATLAB beschriebene Modelle nach VHDL-AMS portiert. Diese Bottom-Up-Schritte sind notwendig, da zum einen die Fehlersuche in selbst entwickelten Teilmodellen innerhalb eines großen Gesamt-

systems sehr schwierig ist und zum anderen eine Top-Down basierte Vorgabe an die Eigenschaften des Spiegelarrays dessen technologische Machbarkeit überschreitet.

Modellierung

Die Ansteuersignale für den Demonstrator werden von einer mit VHDL entworfenen PC-Einsteckkarte und der dazugehörigen Software erzeugt. Da Software und Einsteckkarte zu Beginn der Arbeiten zur Gesamtsystemsimulation bereits weitgehend fertig gestellt waren, und durch die digitale Signalgenerierung keine ungewöhnlichen Effekte bezüglich der anderen Systemkomponenten zu erwarten waren, konnte die Stimuli-Erzeugung für die Systemsimulation erheblich abstrahiert werden. Die amplitudenmodulierten, phasenverschobenen Sinussignale werden in einem „digitalen“ Algorithmus berechnet, mittels eines

```
analog_QUANTITY==digital_SIGNAL'RAMP(
t_rise, t_fall)
```

Statements abstrakt digital/analog-gewandelt und von einem Delta-Sigma-Modulator wieder digitalisiert. Die Modellierung des Delta-Sigma-Modulators erfolgte dabei als eine ideale Nachbildung eines Prinzipschaltbildes aus [2], bestehend aus OPVs und einem D-Flipflop. Als Resultat entsteht ein Signal, welches mit dem von der Einsteckkarte gelieferten realen Signal vergleichbar ist.

Die elektrischen Komponenten der Ansteuerung – Delta-Sigma-Demodulator und Hochspannungsverstärker – entstanden als klassische elektrische Netzwerke mit idealisierten Bauteilen.

Das Modell des Spiegelarrays besteht aus einem elektrischen, einem mechanischen und einem optischen Teilmodell. Thermische Aspekte wurden bei der Gesamtsystemsimulation vernachlässigt, da die Komponentensimulation gezeigt hat, daß keine nennenswerten Einflüsse auf das Verhalten bestehen. Um die Spiegeldaten allen Teilmodellen zur Verfügung zu stellen, wurden die geometrischen und physikalischen Daten des Spiegelarrays in einem *Package* beschrieben, das von jedem Spiegel-Teilmodell geladen wird. Dabei wurde die Eigenschaft von VHDL genutzt, Konstanten *deferred* zu deklarieren, d. h. im *Package* ist nur die Konstante ohne Wert beschrieben. Dieser wird erst im *Package Body* zugewiesen. Damit ist es möglich, die Daten des Spiegelarrays zu ändern, ohne die eigentlichen Modelle des Spiegelarrays neu compilieren zu müssen.

Die an die Spiegelelektroden angelegten Spannungen erzeugen ein elektrisches Feld, das ein mechanisches Moment auf die Spiegelplatte ausübt. Für die Berechnung dieser Momente auf die Spiegelplatte gibt es mehrere Ansätze [9]. Der einfachste Ansatz ohne Berücksichtigung der Abhängigkeit der Momente von der Auslenkung ist nicht anwendbar, da hier elementare Eigenschaften des Spiegelarrays nicht berücksichtigt werden. Ein aus der Spiegelgeometrie abgeleiteter analytischer Ansatz zur auslenkungsabhängigen Berech-

nung der Momente ist schwer simulierbar, da der Auslenkwinkel im Nenner der Gleichung für die Momente auftritt und die Gleichung bei Auslenkung 0° somit nicht lösbar ist. Zur Lösung dieses Problems wurden zwei Ansätze gewählt: Beim ersten Ansatz „springt“ der Spiegel mittels der folgenden Anweisung über diese Stelle hinweg:

```
IF phi_1<1.0e-7 AND phi_1>=0.0 USE
    phi == 1.0e-7;
ELSIF phi_1>-1.0e-7 AND phi_1<=0.0 USE
    phi == -1.0e-7;
ELSE
    phi == phi_1;
END USE;
```

Dabei entstanden jedoch Probleme beim Anlauf des Spiegels. Der zweite Ansatz beruht auf einer Diskretisierung der Spiegelplatte in viele kleine, parallel zur Gegenelektrode angeordnete, Teilflächen [9]. Die auf diese Teilflächen wirkenden Teil-Momente werden in einem Process berechnet und dort mittels Loop-Schleifen addiert.

Das mechanische Teilmodell eines Spiegels des Spiegelarrays besteht aus den Bewegungsdifferentialgleichungen für die Bewegung bezüglich der x- und y-Achse. Aus Rechenzeitgründen und aufgrund der in der Komponentensimulation ermittelten sehr geringen Kopplung zwischen den Einzelspiegeln des Arrays wurde die Kopplung nicht berücksichtigt.

Der optische Teil des Modells für das Spiegelarray besteht aus Gleichungen zur Berechnung der Reflexion des Laserstrahls an der Spiegeloberfläche. Diese Gleichungen sind zusammen mit den Spiegeldaten im gleichen *Package Body* modelliert, wodurch man den Ansatz einer objektorientierten Modellierung erhält. Für die Modellierung des optischen Teilsystems wurden vorhandene MATLAB-Modelle nach VHDL-AMS konvertiert. Wenn die MATLAB-Modelle keine speziellen Funktionen benutzen, ist dies relativ einfach durchführbar, indem man ein MATLAB-Modell in einen Prozeß einfügt und die Syntax anpaßt. Da der Strahlengang keine Rückwirkung auf Laser oder Spiegelarray hat, kann hier das Verhalten wieder als „digitaler“ Algorithmus beschrieben werden. Da eine Zuweisung wesentlich schneller ausgeführt wird als das Lösen eines Gleichungssystems, ergeben sich enorme Rechenzeitvorteile gegenüber einer Implementierung mit *simultaneous* Statements. Die analogen Winkelverläufe des Spiegelarrays müssen dafür digitalisiert werden. Dies geschieht wie folgt:

```
clk<=NOT clk AFTER 100 ns;
AD_abstrakt: PROCESS(clk)
BEGIN
    digital_SIGNAL<=analog_QUANTITY;
END PROCESS;
```

Die analogen Werte in *analog_QUANTITY* werden mit jedem Pegelwechsel auf *clk* auf dem digitalen Signal *digital_SIGNAL* übernommen. Dieses Verfahren ist sehr einfach zu beschreiben und weist bezüg-

lich der Rechenzeit keine Nachteile gegenüber der Beschreibung eines AD-Wandlers (z. B. als ungetakteter Flash- oder getakteter Sukzessive-Approximation-Wandler) auf.

Die optischen Modelle beruhen auf reiner Strahlenoptik und der Strahlverlauf wird mittels Vektormathematik berechnet. Zur Bestimmung der Strahlaufweitung wurde der Laser als ein Bündel von Strahlen beschrieben. Da dies aber keinen direkten Einfluß auf das Verhalten des Gesamtsystems hat, wurde aus Rechenzeitgründen nur der Mittelpunktstrahl berücksichtigt. Die Modellierung des Lasers als Gauß'scher Strahl ist mit VHDL-AMS zwar prinzipiell möglich, aber sehr aufwendig. Wellenoptische Eigenschaften wie Interferenzen können mit VHDL-AMS nicht mit vertretbarem Aufwand simuliert werden.

Als Ergebnis der Modellierung des Gesamtsystems „Demonstrator Rundumprojektion“ ergibt sich das im Anhang (Bild 5) befindliche Modellschema:

Detaillösungen zu Komponentenmodellen und zur Teilsystems simulation sind in [3] bis [9] zu finden. Alle vorgestellten Modelle der Teilsysteme stellen eine Kompromiß zwischen Genauigkeit und Simulationssgeschwindigkeit dar.

Als Simulator wurde ADVance MS v1.1_2.1 von Mentor Graphics sowie hAMster der Firma SIMEC (ohne optische Modelle) eingesetzt. Durch die konsequente Abstraktion der Modelle kann die Simulation des Gesamtsystems auf einer SUN Ultra 10 in weniger als 5 Minuten Rechenzeit durchgeführt werden, wodurch das System interaktiv optimiert werden konnte. Die entstandenen Modelle sind übersichtlich, leicht änderbar und beschreiben trotz hoher Abstraktion das Verhalten hinreichend genau.

5. Ergebnisse und Ausblick

Ergebnisse

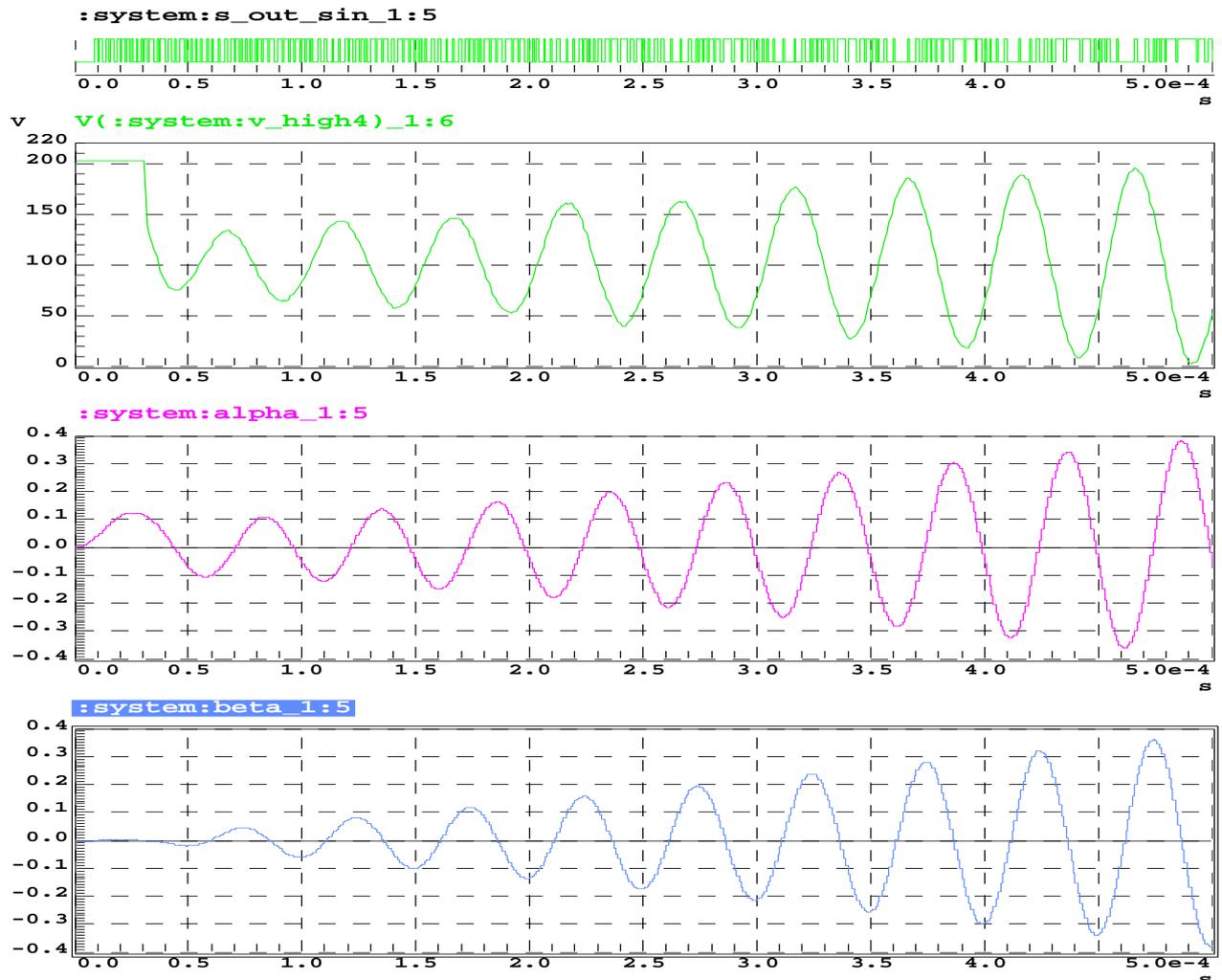


Bild 3 Verlauf von Ansteuerspannung und resultierenden Winkelverläufen

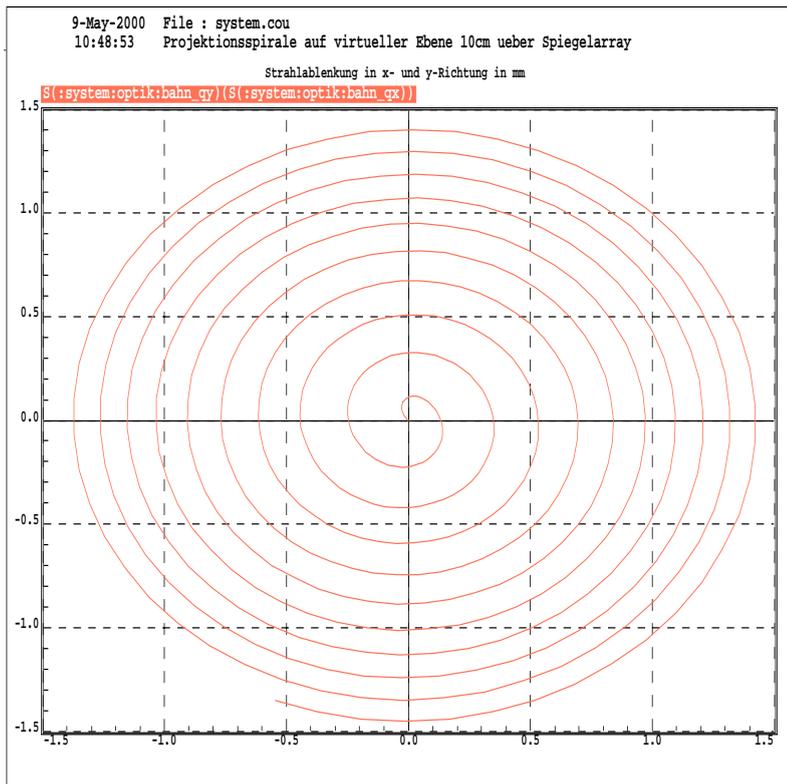


Bild 4 Strahlverlauf auf virtueller Ebene über dem Spiegelarray

Die Arbeiten zur Gesamtsystemsimulation des Demonstrators „Rundumprojektion“ haben gezeigt, daß der Entwurf von Mikrosystemen derzeit oft nicht vollständig nach der Top-Down-Strategie erfolgen kann, da die physikalischen und geometrischen Grenzen der eingesetzten Komponenten häufig die Eigenschaften des Systems bestimmen. Der daraus resultierende Meet-in-the-Middle-Ansatz [10], der sowohl die Top-Down- als auch die Bottom-Up-Strategie gleichberechtigt in sich vereint, hat sich dagegen auch bei diesem Entwurf bewährt.

Der Aufbau des Demonstrators hat die in der Simulation vorhergesagten qualitativen Eigenschaften des Systems bestätigt. So konnte z. B. gezeigt werden, daß die bei einem um 45° geneigten Einbau des Spiegels entstehenden optischen Verzerrungen nicht durch die Ansteuerungen kompensiert werden können. Eine frühere Simulation des optischen Verhaltens hatte diese Option als möglich ergeben. Desweiteren konnte gezeigt werden, daß die Ansteuerlektronik eine Spannungsspitze beim Einschalten erzeugt, so daß im Aufbau die entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden konnten.

Ausblick

Mit dem Aufbau des Demonstrators und der geschlossenen Gesamtsystemsimulation werden die Arbeiten des Teilprojektes A2 „Systementwurf“ des SFB 379 zur Modellierung und Simulation von Systemen mit Mikrospiegelarrays beendet.

Im Mittelpunkt der Arbeiten des Teilprojekts A2 steht zukünftig u. a. die Entwicklung und Verfeinerung von methodischen Ansätzen für den Entwurf von Mikrosystemen.

Dazu zählen:

- Multi-Architecture-Modellierung (MAM)
Optimierung der Zusammenarbeit zwischen Komponenten- und Systementwerfern
Entity: Schnittstelle des Modells zu seiner Umgebung
multiple Architectures: Beschreibung des Verhaltens oder der Struktur des Modells auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen (High Level-, Makro- und Komponentenebene) bei einheitlicher Schnittstelle.
- Kosten-Modellierung
Unterstützung einer effizienten Variantendiskussion bei der Exploration von Entwurfsalternativen und einer darauf aufbauenden Komponentenauswahl, Attributieren von Komponenten- und Teilsystemmodellen mit nichtfunktionalen Größen wie Leistungsaufnahme, Chipfläche, Fehlertoleranz, Testbarkeit u. a.
- Constraint-Modellierung
Überwachung der Parameter von Komponenten auf Einhaltung von physikalischen oder technologischen Grenzen mittels der in der künstlichen Intelligenz (KI) genutzten Methodik des *Constraint Programming*.

6. Literatur

- [1] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.: *IEEE Standard VHDL Language Reference Manual (Integrated with VHDL-AMS changes)*, IEEE Std 1076.1, 1999. – ISBN 0-7381-1640-8
- [2] Mäusl, R.: *Digitale Modulationsverfahren*. Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1988
- [3] Albrecht, J.; Seidel, R.; Melzer, L.; Müller, D.: *System-level Optical Models of 3-D Laser Projection Systems using Micromirror Arrays*. Proc. International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems MSM 99, San Juan, Puerto Rico, U.S.A., 19.–21. Apr. 1999. – ISBN 0-9666135-4-6, S. 679–682
- [4] Albrecht, J.; Melzer, L.; Müller, D.; Seidel, R.: *Approaches to System-level Modeling and Simulation of Laser Projection Systems using Micromirror Arrays and Rotation-symmetric Reflectors*. MICRO SYSTEM Technologies 98/6th International Conference on Micro Electro, Opto, Mechanical Systems and Components, Potsdam, 1.–3. Dez. 1998, S. 639–641, VDE-Verlag Berlin, Offenbach 1998. – ISBN 3-8007-2421-9, S. 639–641
- [5] Albrecht, J.; Melzer, L.; Müller, D.; Seidel, R.: *System-level Modeling and Simulation of Laser Projection Systems using Micromirror Arrays*. 1998 Microsystem Symposium TU Delft, Niederlande, 10.–11. September 1998, S. 127–128
- [6] Seidel, R.; Albrecht, J.; Melzer, L.; Müller, D.: *Laser Beam Deflection using Micromirror Arrays – System level Modeling and Simulation*. Int. Open Project Workshop on System Design Automation – SDA '98, Dresden, 30.–31. März 1998, S. 119–126
- [7] Seidel, R.; Albrecht, J.; Melzer, L.; Müller, D.: *Modelle zur Berechnung der Strahlreflexion bei Mikrospiegeln und rotationssymmetrischen Reflexionskörpern*. Fachtagung Informations- und Mikrosystemtechnik, Magdeburg, 25.–27. März 1998. – ISBN 3-930385-14-7, S. 55–62
- [8] Kurth, S.; Kehr, K.; Mehner, J.; Kaufmann, Ch.; Hahn, R.; Seidel, R.; Doetzel, W.; Gessner, Th.: *Synchronously Working Micromirrors for Beam Steering – Design and Application Aspects*. 1999 Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation (SPIE Annual Meeting), Denver, July 1999; In: Proc. of SPIE Vol. 3787-06, S. 63–73
- [9] Seidel, R.; Müller, D.: *Ansätze zur Drehmomentberechnung bei Mikrospiegeln*. it+ti Informationstechnik und Technische Informatik, Heft 4/99, S. 39–44
- [10] Müller-Glaser, K. D.; Rauch, H.: *Ablaufstrategien und Rechnerunterstützung beim Mikrosystementwurf*. Abschlußbericht des Verbundprojektes „Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen“, Reihe: Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 19, November 1994

- [11] Huss, S. A.; Klupsch, S.; Rosenberger, R.: *Modellierung gemischt analog/digitaler Schaltungen mit VHDL-AMS*. Nachtrag zum Tagungsband, 8. GMM-Workshop Methoden und Werkzeuge zum Entwurf von Mikrosystemen, Berlin, 2.–3. Dezember 1999. – ISSN 0947-1413

Die hier vorgestellten Arbeiten entstanden im Rahmen des Teilprojektes A2 „Systementwurf“ des SFB 379 „Mikromechanische Sensor- und Aktorarrays“, der von der DFG gefördert wird.

Anhang

Als Ergebnis der Modellierung des Gesamtsystems „Demonstrator Rundumprojektion“ ergibt sich folgendes Modellschema:

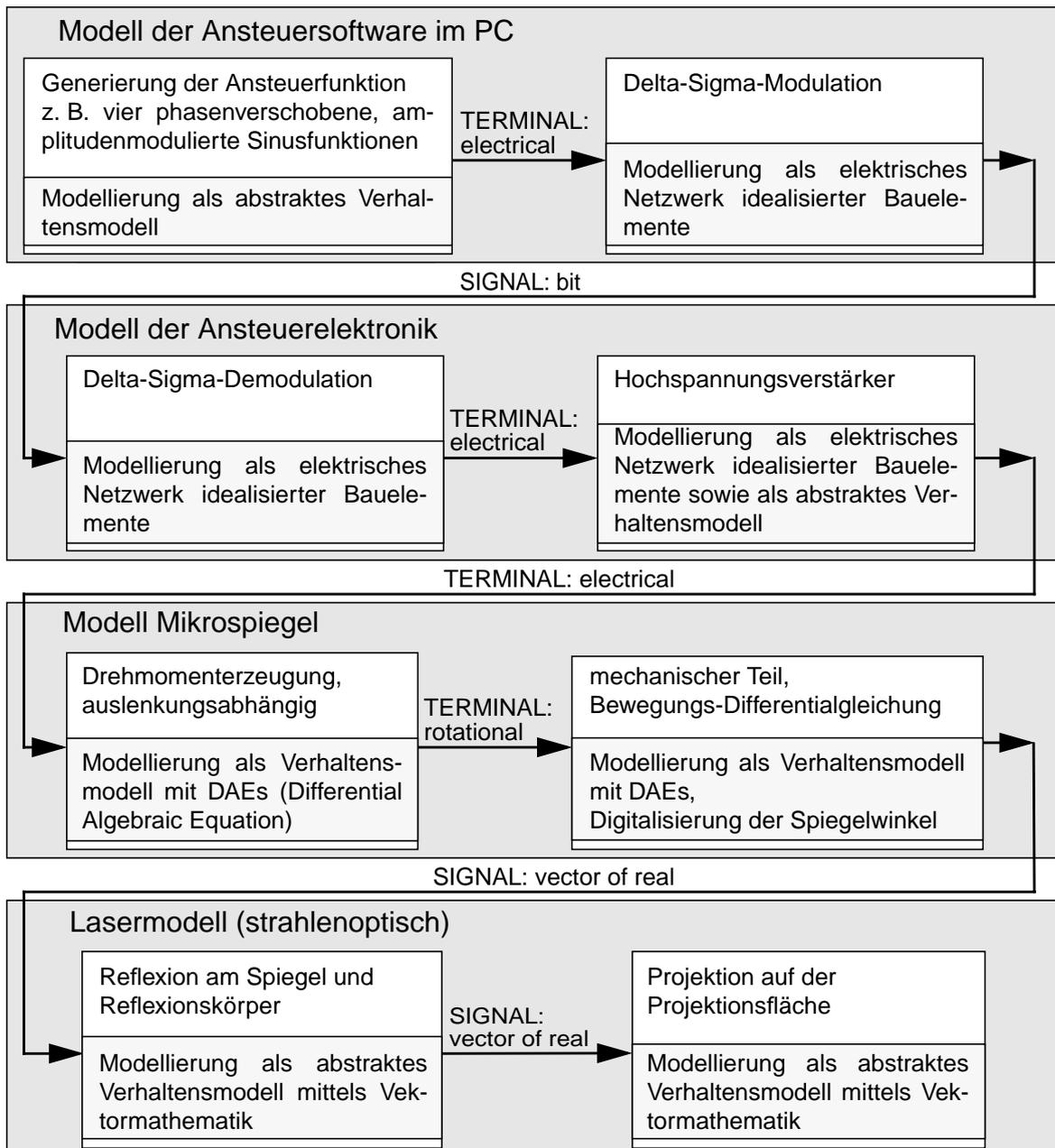


Bild 5 Modellschema der Gesamtsystemsimulation mit VHDL-AMS