

EIN SYSTEM-LEVEL MODELL IN VHDL-AMS EINES MIKROMECHANISCHEN VIBRATIONSSENSOR-ARRAYS

Michael Schlegel, Göran Herrmann, Dietmar Müller

Professur Schaltungs- und Systementwurf
Technische Universität Chemnitz
Reichenhainer Str. 70, D-09126 Chemnitz

Kurzfassung/Abstract

An der TU Chemnitz wird zur Zeit im Rahmen des SFB 379 ein neuartiger kapazitiver Vibrationssensor entwickelt, der aus einem Array lateral beweglicher Feder-Masse-Systeme besteht [1]. Während der Entwicklung des Sensors wurde dieser mittels FEM Simulation simuliert und optimiert. Für eine Systemsimulation des Sensors einschließlich analoger und digitaler Signalverarbeitung und der Sensorumgebung ist eine FEM Simulation zu langsam. Außerdem wird eine Simulationsumgebung benötigt, die analoges und digitales elektrisches Verhalten sowie mechanisches Verhalten beschreiben und simulieren kann. Daher wurde ein Modell des Sensors auf hoher Abstraktionsebene mit VHDL-AMS entwickelt. Der Vortrag beschreibt Modelle für den Sensor sowie ein Modell der analogen Signalverarbeitung.

A new capacitive vibration sensor using an array of laterally moving mass-spring systems is being developed at Chemnitz University of Technology [1]. The sensor operation is based on narrow-band resonance of the mass-spring elements. The function of the sensor was simulated by FEM simulation during development of the sensor array. For simulation of the application of the sensor, including the sensor, analogue and digital signal processing, a FEM simulation takes too much time. Additionally a simulation environment is necessary which allows simulation of mechanical, analogue electrical and digital systems. So an abstract model on high abstraction level was developed with the hardware description language VHDL-AMS. The paper is focussing on high abstraction level CAD modeling of the sensor array and the analog signal processing.

Einleitung

Die Verschleißerkennung an stark beanspruchten Maschinenteilen spielt bei der Sicherung der Produktqualität und des Produktionsprozesses eine wichtige Rolle. Dazu werden u. a. Vibrationen der Maschinenteile gemessen und ausgewertet. Dabei kommen piezokeramische Breitbandsensoren zum Einsatz, die allerdings sehr teuer sind. Der an der TU Chemnitz entwickelte und hergestellte Sensor arbeitet dagegen schmalbandig in Resonanz. Dies verbessert das Signal zu Rauschverhältnis und vereinfacht den Aufbau der analogen Signalverarbeitung. Der Sensor selbst wird in SCREAM-Technologie hergestellt, was bei großen Stückzahlen eine kostengünstige Herstellung ermöglicht. Somit kann ein kostengünstiges Meßsystem zur Erfassung von Vibrationen aufgebaut werden.

Der Test des Sensors soll mittels des Demonstrators „Vibrationssensor-Array“ erfolgen. Zuvor muß aber die Funktion der einzelnen Komponenten und vor allem ihre Zusammenarbeit simuliert werden. Dafür werden abstrakte aber dennoch hinreichend genaue Modelle benötigt. Da die Simulation digitale, analoges und mechanisches Verhalten umfaßt, entstanden diese Modelle in VHDL-AMS.

Der Demonstrator „Vibrationssensor-Array“

Der Demonstrator besteht aus dem Sensor-Array mit acht einzelnen Feder-Masse-Schwingern, der analogen Signalverarbeitung und einem Hochspannungsverstärker. Die

Steuerung des Systems übernimmt ein Mikrocontroller. Zur Auswertung und Klassifizierung der gemessenen Vibrationen dient ein Fuzzy-Pattern-Klassifikator [2].

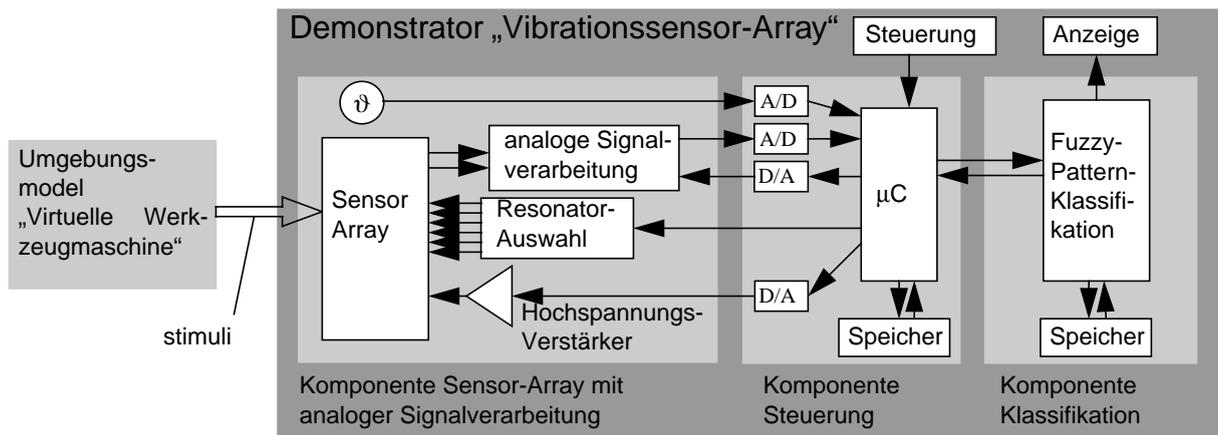


Bild 1 Block-Diagramm des Demonstrators „Vibrationssensor-Array“

Das Umgebungsmodell „Virtuelle Werkzeugmaschine“ stellt die Stimuli für die Simulation bereit. Diese Modell kann gemessene Daten im Zeit- oder Frequenzbereich wiedergeben oder fiktive Daten erzeugen. Der Vibrationssensor wandelt diese mechanische Anregung frequenzselektiv in ein elektrisches Signal, das zwar bandbegrenzt ist, aber immer noch Anteile in einem bestimmten Frequenzbereich enthält, und das von der analogen Signalverarbeitung zunächst verstärkt wird. Anschließend bestimmt die analoge Signalverarbeitung den Amplitudenwert einer bestimmten Frequenz in diesem Signal. Die Resonatoren des Sensors können einzeln aktiviert werden, wobei ihre Resonanzfrequenz elektrostatisch abgestimmt wird. Dazu dient eine Spannung von bis zu 40 V, die ein Hochspannungsverstärker erzeugt. Ein Mikrocontroller startet und stoppt die Messung, aktiviert und deaktiviert einzelne Resonatoren, startet die Selbstkalibrierung und überträgt die Daten an den Fuzzy-Pattern-Klassifikator. Der Klassifikator unterscheidet, ob die Vibrationen z. B. von einem scharfen oder verschlissenen Werkzeug erzeugt wurden. Der Algorithmus für den Klassifikator wird in einem FPGA in Hardware realisiert.

Sensormodelle

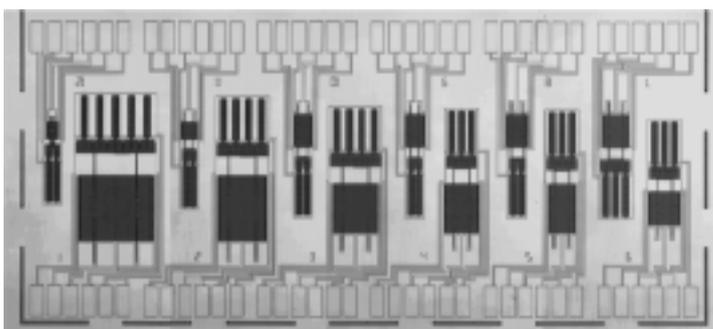


Bild 2 REM-Aufnahme einer Testversion des Sensors

Der Sensor besteht aus einem Array lateral beweglicher Feder-Masse-Resonatoren, die frequenz-selektiv in Resonanz arbeiten. Um eine Messung auf unterschiedlichen Frequenzen zu ermöglichen, können die Federkonstanten und damit die Resonanzfrequenzen durch eine elektrostatische Kraft verändert werden. Die Auslenkung der Masse wird kapazitiv mittels Kamm-Elektroden bestimmt.

Frequenz-Tuning mittels Stress-Stiffening-Effekt

Die erste Variante zur Abstimmung der Resonanzfrequenz ist die Ausnutzung des Stress-Stiffening-Effekts (Erhöhung der Federsteifigkeit bei Anlegen einer Normalkraft). Bild 3 zeigt ein Ersatzschaltbild des Sensors. Es besteht aus je acht Federn, Massen und Dämpfern. Der Vorteil der Modellierung dieser Komponenten in VHDL-AMS liegt nun darin, daß diese Komponenten direkt in ihrer mechanischen Domäne beschrieben werden können und nicht erst Analogietransformationen durchgeführt werden müssen.

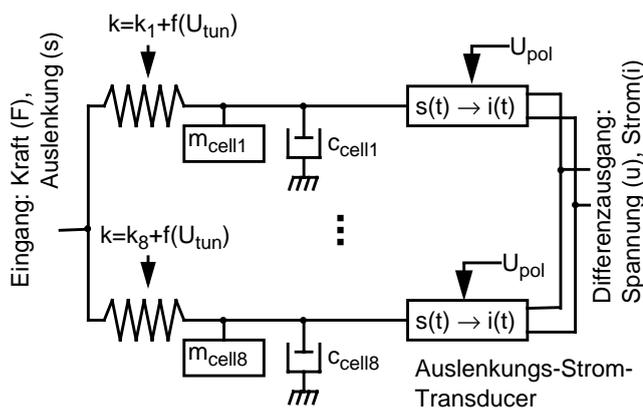


Bild 3 Ersatzschaltbild des Sensor-Arrays

Dies bedeutet, daß z. B. das Verhalten einer Feder direkt mittels $F = k \cdot s$ (Kraft, Federkonstante, Auslenkung) beschrieben werden kann. Mit einer Analogietransformationen ist die Beschreibbarkeit mechanischer Komponenten auf die Möglichkeit der Abbildung auf elektrische Äquivalente beschränkt, während in VHDL-AMS fast jeder lineare und nichtlineare Zusammenhang zwischen Kraft, Beschleunigung, Geschwindigkeit und Auslenkung beschrieben werden kann.

Bild 4 zeigt das Funktionsprinzip eines Feder-Masse-Resonators mit Resonanzfrequenzabstimmung mittels Stress-Stiffening-Effekt. Eine an die Kammstruktur angelegte Spannung U_{tun} ruft die elektrostatische Kraft F_{el} hervor. Unter der Vereinfachung des Feldes des Plattenkondensators als homogenes Feld gilt:

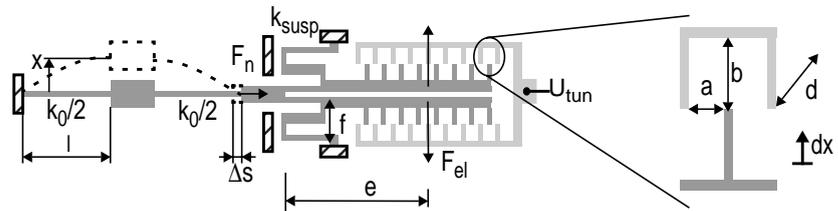


Bild 4 Detail eines Feder-Masse-Schwingers

$$F_{el} = \frac{dW}{dx}, \quad dW = \frac{1}{2} \cdot U_{tun}^2 \cdot dC \quad (GL 1)$$

$$C = 2n \cdot \epsilon \cdot \frac{x_{ss} \cdot d}{a}, \quad \frac{dC}{dx} = 2n \cdot \epsilon \cdot \frac{d}{a} \quad (GL 2)$$

$$F_{el} = U_{tun}^2 \cdot \frac{n \cdot \epsilon \cdot d}{a} \quad (GL 3)$$

wobei n die Anzahl der Kämmen ist. Die Kraft F_{el} erzeugt an dem Hebelmechanismus (e, f) eine Normalkraft F_n [1].

$$F_n = 2 \cdot \frac{e}{f} \cdot F_{el} + \frac{6 \cdot k_{susp}}{5 \cdot l} \cdot x^2 \quad (GL 4)$$

Diese Kraft beeinflusst die Federkonstante durch den Stress-Stiffening-Effekt:

$$k = k_0 + \frac{12 \cdot F_n}{5 \cdot l} \quad (GL 5)$$

Das folgende Stück Quellcode zeigt die Implementation dieser Stress-Stiffening beeinflussten Feder in VHDL-AMS:

```
ENTITY stress_stiffening_spring IS
  GENERIC(n,a,b,d,e,f,
    k0,ksusp,l,eps:real);
  PORT( TERMINAL t1,t2: mech_F_s;
    TERMINAL t_tun: electrical);
END;
```

```
ARCHITECTURE behav of stress_stiffening_spring IS
  QUANTITY x ACROSS f THROUGH t1 TO t2;
  QUANTITY u_tun ACROSS t_tun;
  QUANTITY fel,fn: real:=0.0;
  QUANTITY k: real:=k0;
BEGIN
  fel==u_tun**2 * eps*n*d/a;
  fn==2.0*2.0*e/f*fel + 6.0*ksusp/5.0/l*x**2
  --2 stress-stiffening actuators per spring
  k==k0+12.0/5.0*fn/l;
  f==k*x;
END;
```

Frequenz-Tuning mittels elektrostatischer Feder

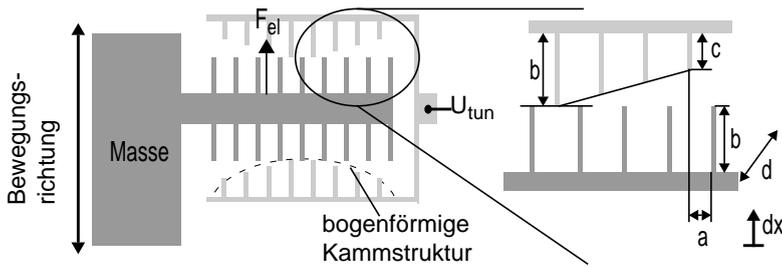


Bild 5 Detail der elektrostatischen Erweichung

Das Frequenz-Tuning mittels Stress-Stiffening hat zwei Nachteile. Die Herstellung dieser Strukturen ist kompliziert, da sich in den Hebeln Schichtspannungen aufbauen. Zum anderen verursacht der Hebelmechanismus Nichtlinearitäten im Verhalten (GL 4). Deshalb wurde ein anderer Ansatz getestet, bei dem die Federkonstante nicht verändert wird. Das Frequenz-Tuning wird hier mittels einer weiteren, bogenförmigen Kamm-Struktur (s. Bild 5) erreicht, bei der die Anziehungskraft eine lineare Funktion der Auslenkung ist.

Die optimale Krümmung des Bogens wurde mittels FEM Simulation ermittelt. Für die Systemsimulation kann sie aber als lineare Funktion vereinfacht werden. Die Kraft im elektrischen Feld berechnet sich analog zu (GL 1). Für den Bereich $-(b-c) \leq x \leq (b-c)$ gilt:

$$C = 2 \cdot \epsilon \cdot \frac{d \cdot x}{a} \cdot \frac{x}{b-c} \cdot n \cdot \frac{1}{2}, \quad \frac{dC}{dx} = 2 \cdot \epsilon \cdot \frac{d \cdot x}{a} \cdot \frac{n}{b-c} \quad (\text{GL 6})$$

$$F_{el} = U_{tun}^2 \cdot \epsilon \cdot \frac{d \cdot x}{a} \cdot \frac{n}{b-c} \quad (\text{GL 7})$$

Da F_{el} entgegengesetzt zur Kraft einer normalen Feder wirkt, kann man auch schreiben:

$$F = k \cdot x, \quad k = -\left(U_{tun}^2 \cdot \epsilon \cdot \frac{d}{a} \cdot \frac{n}{b-c} \right) \quad (\text{GL 8})$$

Für den Bereich $|x| > (b-c)$ gilt dann:

$$C = 2n \cdot \epsilon \cdot \frac{(x - (b-c)) \cdot d}{a} + C_0, \quad \frac{dC}{dx} = 2n \cdot \epsilon \cdot \frac{d}{a} \quad (\text{GL 9})$$

$$F_{el} = U_{tun}^2 \cdot n \cdot \epsilon \cdot \frac{d}{a} \quad \text{für } x > (b-c) \quad (\text{GL 10})$$

$$F_{el} = -U_{tun}^2 \cdot n \cdot \epsilon \cdot \frac{d}{a} \quad \text{für } x < -(b-c) \quad (\text{GL 11})$$

Auslenkungs-Strom-Transducer

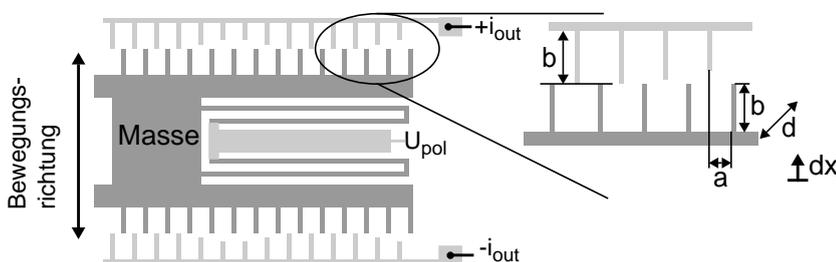


Bild 6 Auslenkungs-Strom-Transducer

Der Auslenkungs-Strom-Transducer besteht ebenfalls aus einer FEM optimierten, bogenförmigen Kamm-Struktur. Für die Systemsimulation wurde die Krümmung des Bogens allerdings vernachlässigt.

Die durch die Auslenkung hervorgerufenen Ströme berechnen sich unter der Annahme eines homogenen Feldes wie folgt:

$$i(t) = U_{pol} \cdot \frac{dC}{dt}, \quad C = 2n \cdot \epsilon \cdot \frac{x \cdot d}{a}, \quad \frac{dC}{dt} = 2n \cdot \epsilon \cdot \frac{d}{a} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (\text{GL 12})$$

$$i(t) = U_{pol} \cdot 2n \cdot \epsilon \cdot \frac{d}{a} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (\text{GL 13})$$

Analogsignalverarbeitung

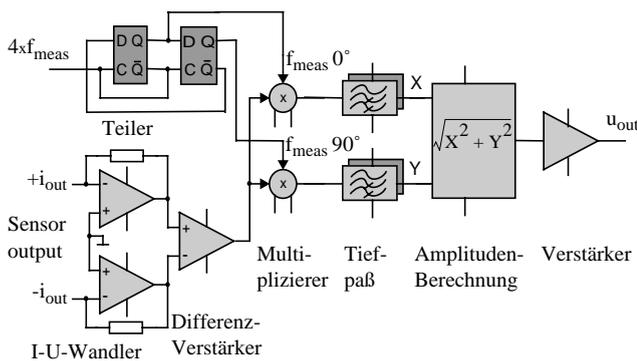


Bild 7 Block-Diagramm der analogen Signalverarbeitung

Für die Modellierung der analogen Signalverarbeitung, des Sensors und der Sensorumgebung wurde die neue Methode der **Multi Architecture Modellierung** [3] angewandt. Dabei wurden die Komponenten zuerst als funktionelle Blöcke beschrieben. Diese benutzen aber bereits auf dieser hohen Abstraktionsebene konservative Knoten (`TERMINAL`) anstelle von nichtkonservativen Knoten (`QUANTITY`) und enthalten auch Anschlüsse zur Spannungsversorgung. Dadurch ist es möglich die abstrakteren Modell später im Entwurfsprozeß gegen verfeinerte Modelle zu ersetzen, ohne Änderungen am Gesamtsystem vornehmen zu müssen.

Ergebnisse

Die oben beschriebenen Modelle wurden mittels Mentor Graphics' AdvanceMS auf einer SUN ULTRA60 Workstation mit UltraSPARC-II 296 MHz CPU simuliert.

Der erste Schritt war die Simulation der einzelnen Komponenten des Sensor-Arrays. Bild 8 und Bild 9 zeigen die Abstimmung der Federkonstante und damit der Resonanzfrequenz als Funktion der Tuningspannung.

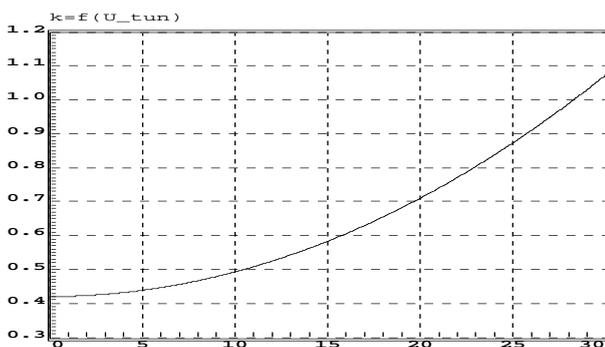


Bild 8 Federkonstante mit Stress-Stiffening-Effekt

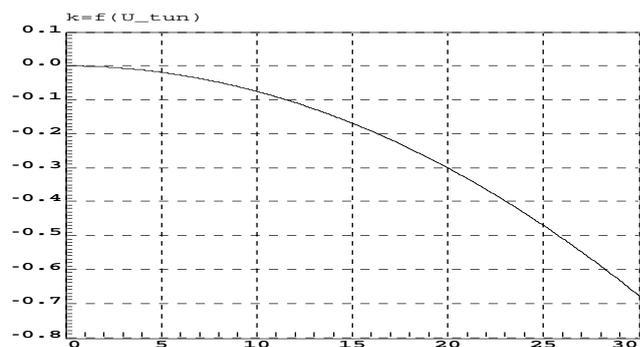


Bild 9 Federkonst. der elektrostatischen Erweichung

Wie zu erkennen ist, wird durch den Stress-Stiffening-Effekt die Federkonstante erhöht. Im Gegensatz dazu stellt die elektrostatische Erweichung eine Feder mit negativer Federkonstante dar. Dies bedeutet, daß diese Feder eine Anziehungskraft erzeugt, wenn sie zusammen gedrückt wird. Für die Abstimmung der Resonanzfrequenz wird diese Feder parallel zur normalen Feder des Systems angebracht, womit die resultierende Federkonstante mit steigender Abstimmspannung sinkt.

Die Simulation dieser Sensorteile benötigt nur wenige Sekunden Simulationszeit. Die Simulationsungenauigkeit der elektrostatischen Erweichung liegt bei 4 % verglichen mit der FEM Simulation. Für die Stress-Stiffening Struktur beträgt der Fehler etwa 10 %. Ein Fehler von 10 % kann im Rahmen der Systemsimulation als akzeptabel angesehen werden.

Die nächsten Schritte im Entwurfsprozeß waren die Simulation des gesamten Sensor-Arrays, der analogen Signalverarbeitung und letztlich die Simulation des gesamten Systems. Ein Ergebnis der Gesamtsystemsimulation ist in Bild 10 zu sehen. Kurve *a* zeigt dabei die Stimuli des Sensors, wie sie von der „Virtuellen Werkzeugmaschine“ erzeugt werden, die Kurven *b* bis *d* zeigen die Auslenkung der ersten drei seismischen Massen des Sensors bei einer Tuningspannung von 12 V. Die Kurven *e* und *f* stellen das Ausgangssignal des Differenzverstärkers und des Lock-In-Verstärkers dar.

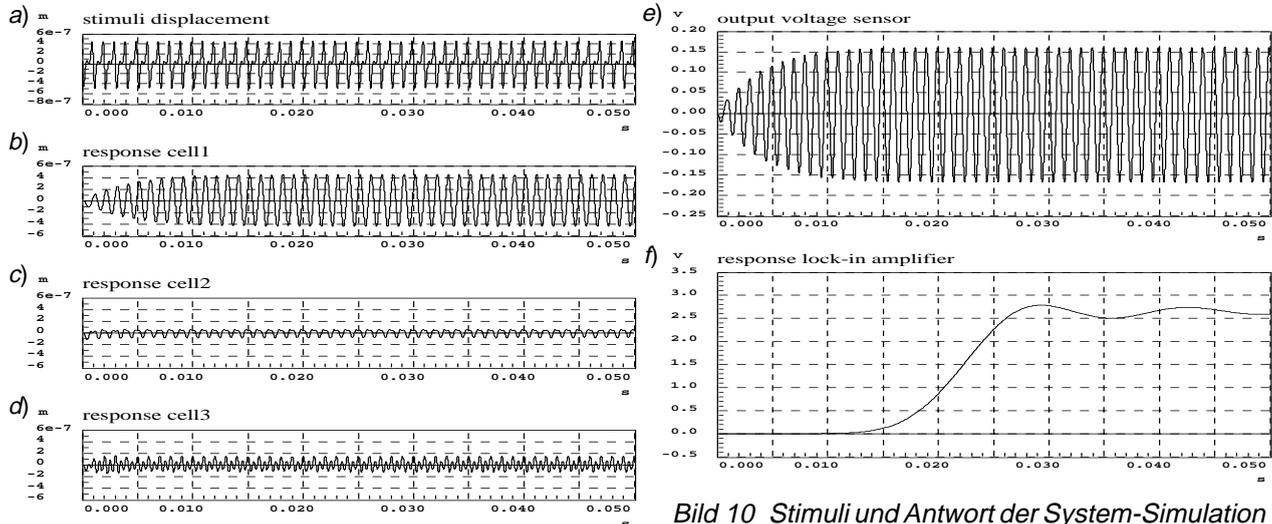


Bild 10 Stimuli und Antwort der System-Simulation

Die Simulationszeit des Gesamtsystems beträgt weniger als 5 Minuten, wogegen eine FEM-Simulation einer einzelnen Kamm-Struktur bereits etwa 20 Minuten dauert.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulation des Gesamtsystems erlaubt es, die Funktion des Systems vor dessen Aufbau zu überprüfen. Durch die kurzen Simulationszeiten ist es möglich das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten zu testen und zu optimieren.

Im Augenblick befindet sich die Modellierung und Synthese der Fuzzy Pattern Klassifikation in Arbeit. Im Anschluß daran ist noch ein abstraktes Modell der Steuerung zu entwerfen. Wenn diese Arbeiten abgeschlossen sind, wird es möglich sein, komplette Meßzyklen in relativ kurzer Zeit zu simulieren

Danksagung

Die hier vorgestellte Arbeit entstand im Rahmen des Teilprojekts A2 „Systementwurf“ des SFB 379, der durch die DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) gefördert wird.

Literatur

- [1] Mehner, J.; Scheibner, D.; Wibbeler, J.: *Silicon Vibration Sensor Arrays with Electrically Tunable Band Selectivity*. MICRO SYSTEM Technologies 2001, Düsseldorf, March 27-29, 2001, ISBN 3-8007-2601-7, pp. 267-272
- [2] Eichhorn, K.: *Entwurf und Anwendung von ASICs für musterbasierte Fuzzy-Klassifikationsverfahren*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 21. März 2000
- [3] Schlegel, M.; Herrmann, G.; Müller, D.: *Multi-Architecture-Modeling: Entwurfsmethode für Mixed-Signal- und Multi-Domain-Systemsimulation*. GI/ITG/GMM-Workshop: Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen, Tübingen, 25.-27. Februar 2002, in: Berichte aus der Informatik, Shaker Verlag, Aachen 2002, ISBN 3-8265-9859-8, S. 18-25