Vorgehensweise zur Modellierung und Modellevaluierung eines Aktors zur Positionierung von Lese-/Schreibköpfen für Festplatten

T. Wiegand[1], D. Peters[1], St. Paul[1], R. Laur[1], R. Rosing[2], A. Richardson[2], B. Vigna[3], L. Vosskämper[4]
[1]Institut für Theoretische Elektrotechnik und Mikroelektronik (ITEM), Universität Bremen, Germany,
[2]Lancaster University, Centre for Microsystems Engineering, LA1 4YB, UK,
[3]STMicroelectronics, MEMS Product Division, 20010 Cornaredo Milano, Italy,
[4]Dolphin Integration GmbH, Bismarckstr. 142A, 47057 Duisburg, Germany

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird die Modellierung und die Modelloptimierung eines Mikroaktors, der zur Positionierung von Lese-/Schreibköpfen in Festplatten entworfen wurde präsentiert. Zur Modellierung wurde die Verhaltensbeschreibungssprache VHDL-AMS verwendet. Die Simulation wurde mit dem Verhaltenssimulator SMASH der Firma Dolphin Integration durchgeführt. Zur simulationsgestützten Modelloptimierung wurde das am ITEM entwickelte modelbasierte Designoptimierungssystem MODOS eingesetzt. Die Struktur des Mikroaktors wurde von STMicroelectronics entworfen und gefertigt, wodurch zur Modellverifizierung sowohl Mess- wie auch ANSYS Simulationsergebnisse zur Verfügung standen.

1 Einführung

Ein optimales Systemverhalten zu erreichen gehört zu den Hauptzielen im Entwurf von Mikrosystemen. Da diese Systeme stetig komplexere Strukturen aufweisen ist es unwirtschaftlich und ineffizient das gewünschte Design durch experimentelles Fertigen von Prototypen zu finden. Daher werden vermehrt möglichst aussagekräftige, genaue Modellbeschreibungen benötigt, um ein gefordertes Design simulativ verifizieren und ggf. durch eine modellbasierte Designoptimierung verbessern zu können (Bild 1). Insbesondere um effiziente Designoptimierungen durchführen zu können eignet sich die Modellbeschreibung auf der Verhaltensebene. Im Gegensatz zu den Finite-Elemente-Methoden sind Verhaltenssimulationen in der Lage exakte Ergebnisse bei kurzen Simulationszeiten zu liefern. Wenn während des Entwurfsprozesses eine modellbasierte Designoptimierung zum Einsatz kommt, ist es von großer Bedeutung, dass das Verhaltensmodell auf einer Whiteboxbeschreibung beruht, d.h. durch einen vollständigen Satz an physikalischen Gleichungen, Materialkonstanten und Designparametern abgebildet wird. Nur in diesem Fall können die Ergebnisse einer Designoptimierung ausgewertet und die Modellparameter eins zu eins auf das reale System übertragen werden.

2 Verlauf der Modellbildung

Die Erstellung neuer und immer detaillierterer Verhaltensmodelle ist ein kontinuierlich fortschreitender Prozess in der Systementwicklung. Angestrebt wird hierbei, standardisierte simulatorunabhängige Komponentenmodelle von häufig verwendeten mikromechanischen Strukturen (z.B. Biegebalken, Platten, Combdrives) zu entwerfen und in Bibliotheken abzulegen. Hierdurch wird es möglich in kürzester Zeit komlexere Systeme auf Basis dieser Modelle zu bilden. Ziel ist es, die Entwicklungszeiten bis hin zur Vermarktung zu verkürzen und die Zuverlässigkeit der Produkte zu erhöhen. Aus diesem Grund wurden mittlerweile eine Vielzahl von VHDL-AMS Simulatoren entwickelt. Bei der beschriebenen Anwendung wurde der VHDL-AMS Simulator SMASH [1] zur Modellierung und Simulation verwandt. Um möglichst exakte und zuverlässige Verhaltensmodelle zu bekommen, sollte im Anschluss an die Modellierung eine Modelloptimierung durchgeführt

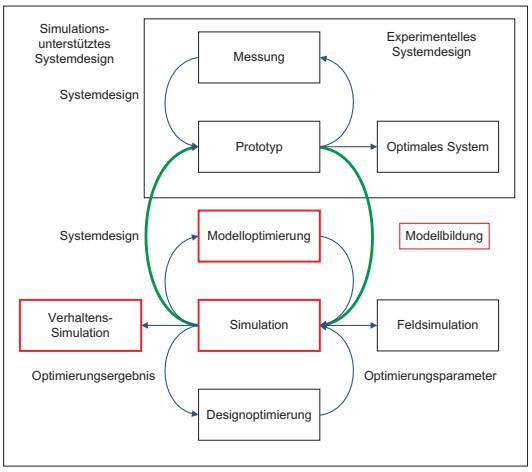

Bild 1 Flussdiagramm des Entwicklungsprozess mikromechanischer Systeme

werden. Ziel der Modelloptimierung ist es die Simulationsergebnisse so weit wie möglich an Messergebnisse oder Ergebnisse von Feldsimulationen anzupassen. Die Optimierungparameter können in zwei Arten unterschieden werden:

- Fitting Parameter
- Physikalische Parameter

Fitting Parameter werden genutzt um fehlende physikalische Zusammenhänge zu kompensieren. Hierdurch kann zwar die Simulationsgenauigkeit erhöht werden, die Modellbeschreibung verschiebt sich aber von einer Whiteboxbeschreibung weg hin zu einer Greybox- bis Blackboxbeschreibung und wird dadurch unbrauchbar für eine modellbasierte Designoptimierung.
Im Gegensatz dazu beschreiben die physikalischen Parameter echte Größen des Designs wodurch eine authentische Modellbeschreibung erhalten bleibt.
Ein weiterer Vorteil der Verwendung von physikalischen Parametern zur Modelloptimierung ist, dass ggf. Aussagen über Toleranzen im Herstellungprozess wie Überätzung oder Größen von Materialkonstanten getroffen werden können.

3 Beschreibung der Anwendung

Bild 2 zeigt den beweglichen Teil und den Anker des modellierten Mikroaktors. Die feststehenden Komponenten der Struktur werden hier nicht gezeigt. Der Mikroaktor soll zur Feinpositionierung von Schreib-/Leseköpfen von Festplatten eingesetzt werden [2].
Die Rotorplatte des Mikroaktors wird durch mehrere elektrostatisch angeregte Comb- und Paralleldrives angetrieben. Diese Elemente sind kreisförmig angeordnet. Weiterhin wird der Rotor durch sechzehn radial angeordnete Federn gehalten, wodurch eine Rüttelbewegung herforgerufen und somit eine 360° Drehung approximiert wird.

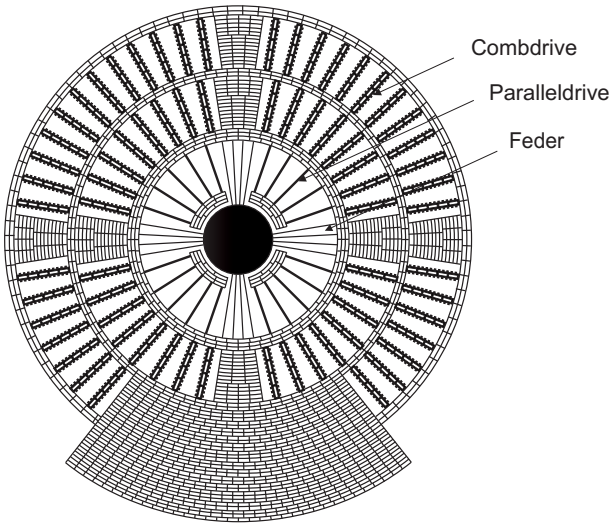

Bild 2 Struktur des Rotors entwickelt von STMICROELECTRONICS

4 VHDL-AMS Modellierung des Mikroaktors

Die Netzliste des Mikroaktors besteht aus miteinander verbundenen VHDL-AMS Komponentenmodellen einer Feder, eines Ankers und einer starren Platte. Die Entwicklung und Verifizierung dieser Modelle ist in [3] beschrieben. Anstatt die Comb- und Paralleldrives separat zu modellieren wurde der gesamte Rotor als starrer Körper beschrieben. So kann die Simulationszeit klein gehalten werden. Ein Blockschaltbild der Netzliste ist in (Bild 3) gezeigt. Die Beschreibung der Masse und des Massenträgheitsmoments im Modell des starren Körpers, wurde soweit abgeändert, dass sie das Verhalten der Rotorplatte nachbildet. Weiterhin wurden Terminals in den Massenschwerpunkten der Aktorsegmente eingefügt, um an diesen Stellen Kräfte anlegen zu können. Die Modelle der Biegebalken enthal-

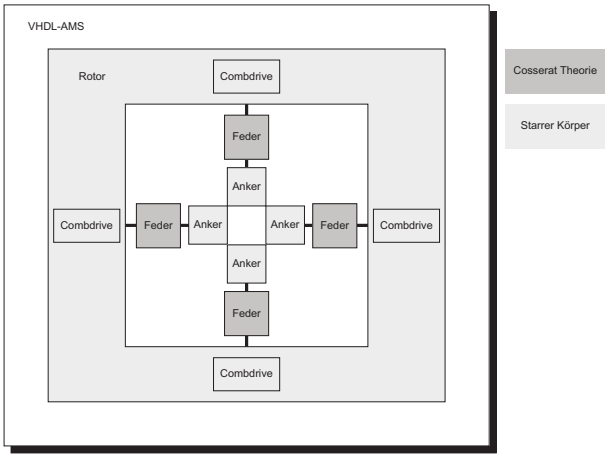

Bild 3 Blockdiagramm des Mikroaktors

ten nichtlineare Bewegungsgleichungen welche mittels der Cosserat Theorie entwickelt wurden. Die Cosserat Theorie ist eine universelle Beschreibung schlanker Strukturen [4].
Um Auswirkungen durch Fehler bei der Produktion untersuchen zu können, wurden vier unterschiedliche Netzlisten erstellt und simuliert. Eine Netzliste repräsentiert den fehlerfreien Fall. Die anderen drei Netzlisten beschreiben fehlerhafte Produkte. In jeder dieser Netzlisten fehlen entweder Federn, Combdrives oder Paralleldrives. Zur Verifizierung der Simulationsergebnisse wurden alle vier Varianten produziert und vermessen.

5 Modelloptimierung des Mikroaktors

Nachdem das Verhaltensmodell erstellt und verifiziert wurde konnte zur Verbesserung der Simulationsergebnisse eine Modeloptimierung mit MODOS durchgeführt werden.
Ziel war es die SMASH Simulationergebnisse der Re-

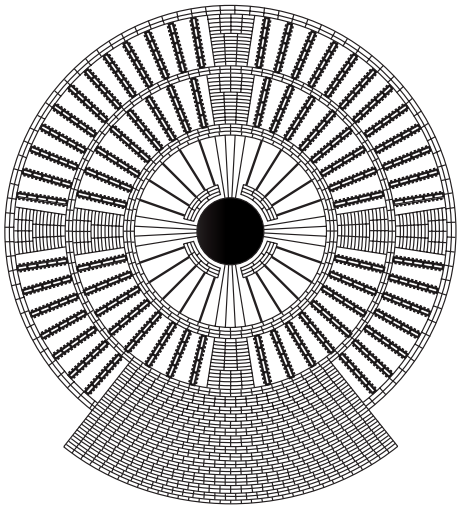

Bild 4 Fehlerfreies Design

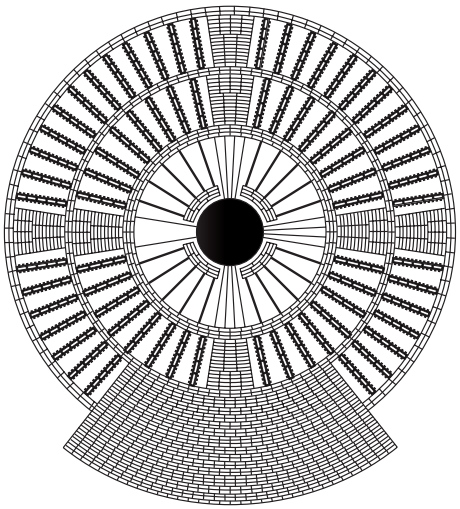

Bild 5 Design mit fehlenden Federn

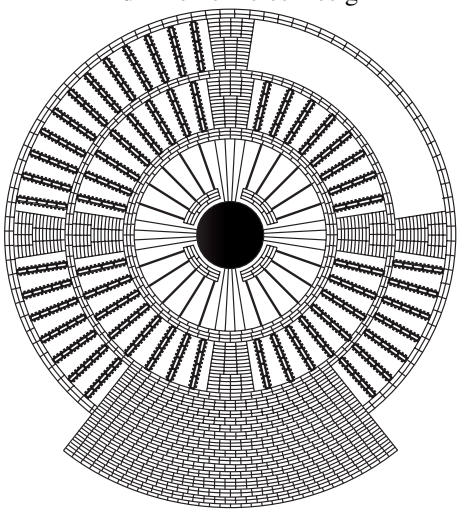

Bild 6 Design mit fehlenden Combdrives

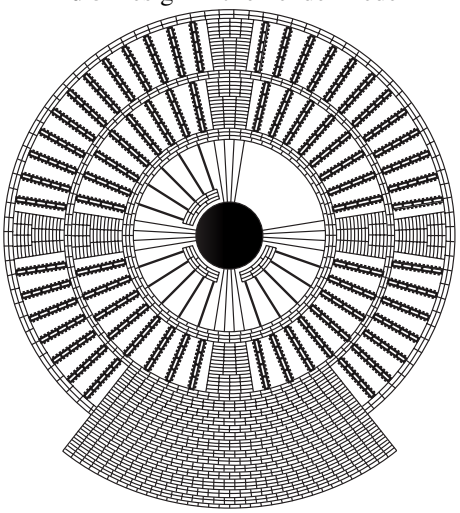

Bild 7 Design mit fehlenden Paralleldrives

sonanzfrequenz f_{res} der Ebenenrotation an die von STM zur Verfügung gestellten Messergebnisse anzupassen. Die Zielfunktion wurde wie folgt definiert.

$$f(\boldsymbol{x}) = (f_{res_{mess}} - f_{res_{sim}}(\boldsymbol{x}))^2. \tag{1}$$

Hierbei stellt $f_{res_{mess}}$ das Ergebnis der Messung und $f_{res_{sim}}$ das dazugehörige Simulationergebnis dar. Tabelle 1 zeigt die Optimierungsparameter der Modelloptimierung. Die Zielfunktion der Modelloptimierung beinhaltet vier unterschiedlichen Optimierungsparameter. Bestehend aus dem Elastizitätsmodul E, einem Überätzungsparameter OE, der Poissonzahl ν und der Dicke T des Mikroaktors. Die dimensionslose Konstante ν bildet den Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul und dem Schermodul:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \tag{2}$$

Die mittels der Modelloptimierung bestimmten Werte sind in der rechten Spalte von Tabelle 1 gezeigt.

Die Simulationen des fehlerfreien Falls, wie auch die Simulation der fehlerbehafteten Fälle des Mikroaktors (Bilder 4-7) wurden mit diesem optimalen Parametersatz durchgeführt. Die Ergebnisse der Modelloptimierung sind in Tabelle 2 gezeigt. Die simulierte Resonanzfrequenz konnte für alle Modellarten (fehlerfreies- / fehlerbehaftetes Modell) an die Messergebnisse angenähert werden. Für den fehlerfreien Fall betrug die Abweichung von Simulation zur Messung vor der Optimierung 5.5% und konnte nach der Optimierung auf 0.3% gemindert werden (Tabelle 2).

Im Regelfall ist es stets schwierig, eine Aussage darüber zu treffen, ob die eingesetzten Optimierungparameter einen physikalischen oder fitting Charakter besitzen. Da in diesem Fall aber die Ergebnisse sowohl bei dem fehlerfreien Modell wie auch bei den fehlerbehafteten Modellen unter Verwendung des gleichen Parametersatz verbessert werden konnten, liegt der Rückschluss nahe, dass es sich bei den Optimierungsparametern um physikalische Parameter gehandelt hat. Wären

Tabelle 1 Optimierungsparameter der Modelloptimierung

Parametername	Symbol	Startwert[1]	Untere Grenze	Obere Grenze	Optimum
Elastizitätsmodul [Pa]	E	1,4E11	1,35E11	1,5E11	1,37E11
Überätzung [μm]	OE	0,35	0	0,6	0,41
Poissonzahl [$-$]	ν	0,22	0,2	0,3	0,22
Aktordicke [μm]	T	15	13,5	16,5	14,75

Tabelle 2 Ergebnisse der Modelloptimierung

	$f_{res.n.opt.}$ [Hz]	$f_{res.opt.}$ [Hz]	$f_{res.mess.}$ [Hz]	Abw. n. opt.[%]	Abw. opt.[%]
Fehlerfreies Design	10309,3	9740,3	9768,1	5,5	0,3
Fehlende Federn	9646,3	9090,9	9042,8	6,7	0,5
Fehlende Paralleldrives	10344,8	9772	9714,3	6,5	0,6
Fehlende Combdrives	10676,2	10101	9938	7,4	1,6

die Optimierungsparameter fitting Parameter, würde bei den fehlerhaften Modellen eine willkürliche Änderung der Simulationsergebnisse erwartet. Die Simulationsergebnisse können dahingehend interpretiert werden, dass die theoretisch angenommenen Designparameter von den Prozessparametern abweichen. Insbesondere der Überätzungsparameter ändert das Verhalten des Mikroaktors, wodurch angenommen wird, das die Überätzung im Herstellungsprozess größer war als erwartet.

6 Zusammenfassung

Heutzutage ist ein simulativ unterstützter Designentwurf unerlässlich in der Entwicklung mikromechanischer Systeme. Die Anforderungen an die Systeme und an die Komplexität fordern innovative Methoden des Entwurfs. Daher ist die Entwicklung standardisierter Verhaltensmodelle eine zwingende Aufgabe. Ein weiterer Schritt um möglichst exakte Simulationsergebnisse zu erzielen ist die Modelloptimierung. Wie in diesem Artikel gezeigt ist die Modelloptimierung eine gute Methode um Simulationsergebnisse an das reale Systemverhalten anzunähern. Bei der Verwendung von physikalischen Optimierungsparametern ist die Modelloptimierung darüber hinaus eine brauchbare Anwendung um Aussagen über Herstellungstoleranzen zu treffen.

7 Danksagung

Die in diesem Artikel vorgestellte Arbeit wurde innerhalb einer Diplomarbeit erstellt und durch das EC Framework 6 - Network of Excellence (NoE) Design for Micro & Nano Manufacture (PATENT - DfMM) gefördert.

8 Literatur

[1] Dolphin Integration *SMASH*, http://www.dolphin.fr

[2] S. Sassolini M. D. Sarto L. Baldo, "Electrostatic Microactuator For Future Hard Disk Drive", *Magnetic Recording Conference*, WE-P-09-01 - WE-P-09-02 , 2002

[3] C.Wang, D. Liu, R. Rosing, B. De Masi and A. Richardson. "Construction of nonlinear dynamic MEMS component models using Cosserat theory", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 402(2), 117-130, August 2004.

[4] S. S. Antman, *Nonlinear Problems of Elasticity* New York, USA: Springer, 2005.

[1] Die Startwerte sind identisch mit den Parameterwerten des nicht optimierten Models.