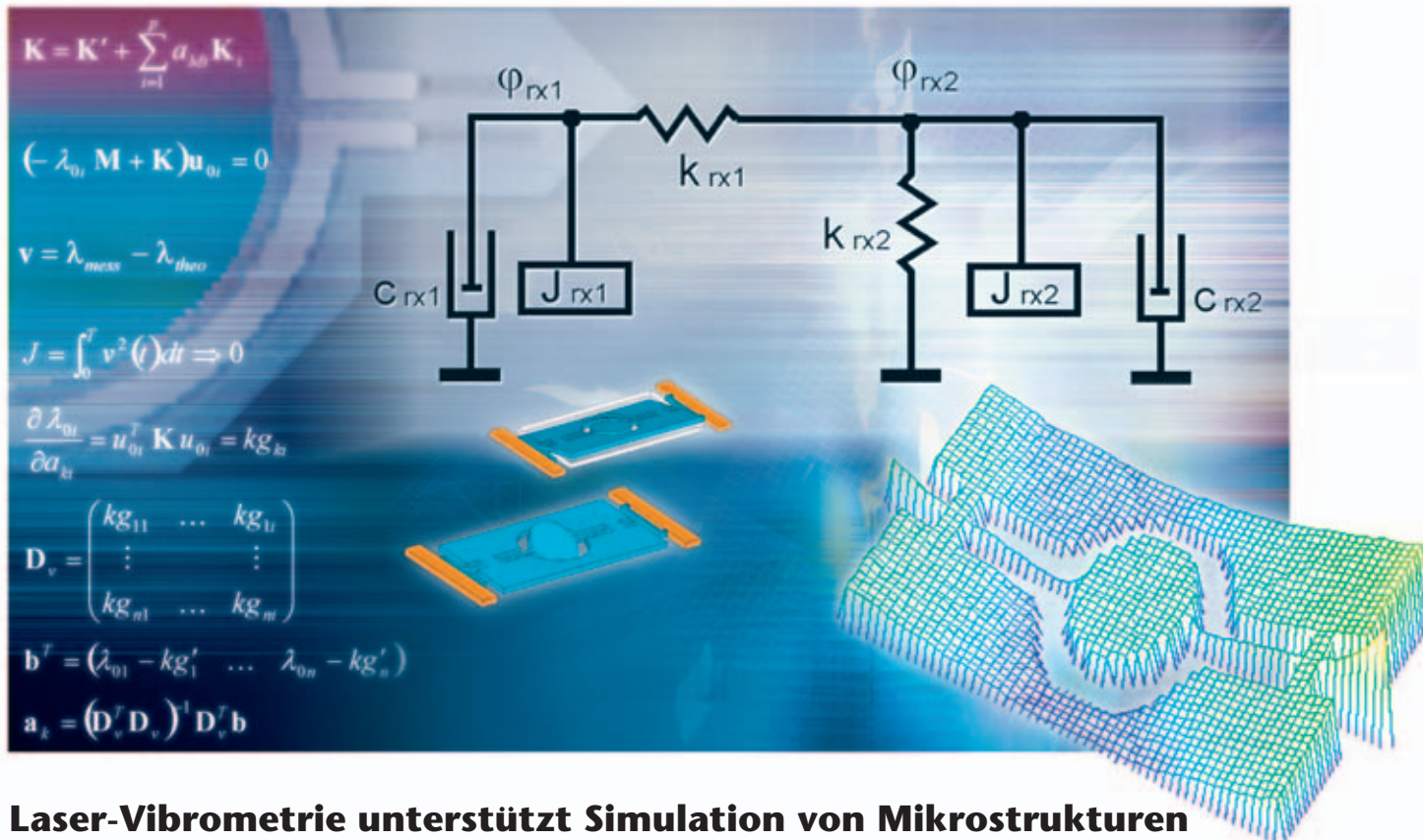


Wie genau sind Simulationsmodelle?



Laser-Vibrometrie unterstützt Simulation von Mikrostrukturen

Die Entwicklung von MEMS-Bauelementen wäre ohne Computersimulation kaum denkbar. Die Simulationsmodelle werden durch Vergleiche mit experimentell ermittelten Daten getestet und verfeinert. Eine Kombination von Polytec Laser Vibrometer und Wafer Probe Station erweist sich dabei als hervorragende Technik, die mechanische Bewegung der Strukturen innerhalb von MEMS-Bauelementen optisch zu detektieren und das modellierte Verhalten mit Messdaten zu korrelieren.

Mikromechanische Scanner

Kleine Spiegel lenken das Licht in Barcode-Scannern bis zu einigen hundert Mal pro Sekunde über den Strichcode. Das Scannen von zwei-

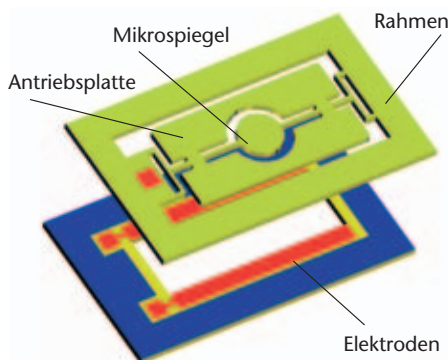


Bild 1: Aufbau eines Mikro-Scanners

dimensionalen Codes, die wie ein Mosaik aus vielen dunklen und hellen Feldern zusammengesetzt sind, erfordert bereits eine deutlich höhere Scangeschwindigkeit und Qualität des Laserstrahls. Eine andere Entwicklung gestattet es, mittels eines Lasers Bilder zu projizieren. Wie der Elektronenstrahl bei herkömmlichen Bildröhren wird ein Laserstrahl über die Bildfläche geführt und seine Helligkeit moduliert. Solche Laserdisplays stellen höchste Anforderungen an Scangeschwindigkeit und Strahlqualität. In einer Sekunde werden beispielsweise bis zu 48.000 Bildzeilen geschrieben. Die Spiegeloberfläche muss während des Scans sehr eben bleiben, um die Qualität des Laserstrahls nicht zu beeinträchtigen. Gleichzeitig sollen diese mechanischen

Bauelemente klein, robust und preiswert sein. Solche mikromechanischen Scanner wurden am Fraunhofer IZM Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration zusammen mit dem Zentrum für Mikrotechnologien der TU Chemnitz entwickelt (Bild 1).

Ihre Herstellungstechnologie entspricht weitgehend den Verfahren zur Herstellung elektronischer Bauelemente. Die Abmessungen der mechanisch beweglichen Teile liegen im Bereich zwischen einigen Mikrometern und wenigen Millimetern. Durch Erzeugen eines elektrostatischen Feldes zwischen Elektroden innerhalb dieser Scanner entstehen, wegen der kleinen Abmessungen, bereits genügend große Kräfte, um die Spiegel mechanisch anzutreiben.

Simulation von MEMS-Eigenschaften

Die Entwicklung solcher MEMS-Bauelemente erfordert im Vorfeld eine Vielzahl mathematischer Analysen. Die Herstellungsprozesse sind teuer und komplex, was die Anzahl an Optimierungsversuchen begrenzt. Die Vorausberechnung des Verhaltens solcher Systeme gelingt jedoch nur in dem Maße, wie geeignete Simulationsmodelle zur Verfügung stehen. Deshalb werden teilweise recht komplexe Modelle eingesetzt, um ein Zusammenspiel von elektrischen Größen mit einer Vielzahl weiterer physikalischer Größen zu berücksichtigen. Ob die MEMS-Bauelemente nach deren Herstellung die Zielspezifikation erreichen können, hängt wesentlich von der Genauigkeit der Simulation ab, denn sie dient als Grundlage bei der Dimensionierung. Es ist deshalb sehr wichtig, die Gültigkeit der Simulationsmodelle durch Vergleiche mit experimentell ermittelten Daten zu testen und diese Modelle zu verfeinern. Für ein derartiges Vorgehen ist es erforderlich, zuverlässige Messdaten an MEMS-Bauelementen zu gewinnen und daraus Parameter zu extrahieren, die unmittelbar mit denen der Simulationsmodelle vergleichbar sind.

Herstellungsrelevante Parameter

Eine weitere Aufgabe besteht darin, messtechnisch herstellungsrelevante Parameter zu ermitteln. Informationen

über die aktuell vorliegenden Prozessparameter und ihre Wirkung auf geometrische Größen und Materialparameter der MEMS-Bauelemente sind für die Steuerung des Herstellungsprozesses nötig. Die Schwierigkeit besteht dabei darin, dass man eine große Fülle von Messdaten auf wenige für die Steuerung des Herstellungsprozesses erforderliche Informationen reduzieren muss. Um diese Aufgabe zu lösen, werden Verfahren zur Adaption von Modellparametern weiterentwickelt und eingesetzt. Damit sind beispielsweise Schichtdicken oder mechanische Spannungen in den Werkstoffen der MEMS-Bauelemente zu ermitteln. Voraussetzung ist eine qualifizierte Messtechnik, die es auch gestattet, Messdaten an MEMS-Bauelementen in jedem beliebigen Stadium der Herstellung im Wafer-Verband zu gewinnen.

Experimentelles Setup

Die an MEMS-Bauelementen nach der Musterpräparation oder im Produktionsumfeld gewonnenen Messdaten enthalten vor allem Informationen zur Dynamik beweglicher Komponenten in Form von Zeitreihen oder von Frequenzgangfunktionen. Eine Kombination von Polytec Laser Vibrometer und Wafer Probe Station (Bild 2) erweist sich dabei als hervorragende Technik, die mechanische Bewegung der Strukturen innerhalb von MEMS-Bauelementen optisch zu detektieren.

Wegen der optischen Abtastung arbeitet das Messverfahren nahezu rückwirkungsfrei. Der Durchmesser des Laserstrahls auf dem Prüfling liegt im Bereich einiger Mikrometer, sodass auch sehr fein strukturierte mikro-mechanische Gebilde, wie beispielsweise Mikrospiegelarrays, getestet werden können.

Simulation – Messung – Parameteradaption

Nach der theoretischen Analyse des MEMS-Bauelements, beispielsweise mittels Finite-Elemente-Methode, entstehen umfangreiche Simulationsmodelle und Simulationsergebnisse, die das mechanische Verhalten an sehr vielen geometrischen Orten des Bauelements beschreiben. Da jedem Ort primär sechs Freiheitsgrade zugeordnet werden, spiegelt das Ergebnis das Verhalten eines mechanischen Systems mit einer hohen Anzahl von Freiheitsgraden und Resonanzstellen wider. Nur wenige Freiheitsgrade sind jedoch praktisch bedeutsam und messbar. Deshalb werden Verfahren zur Ordnungsreduktion dieser Modelle angewandt, um Modelle mit konzentrierten Parametern für die praktische Nutzung der Parameterextraktionsverfahren bereitzustellen.

Parallel dazu werden Messdaten gewonnen, indem die MEMS-Bauelemente zu mechanischen Schwingungen angeregt werden, beispielsweise durch

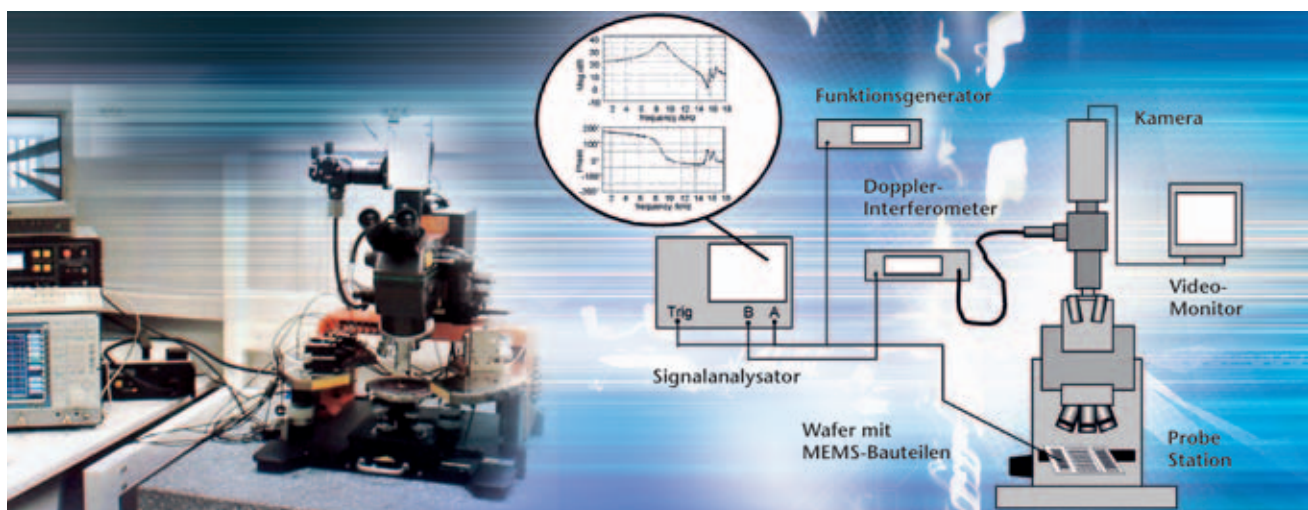


Bild 2: Probe Station mit Polytec Microscope Scanning Vibrometer

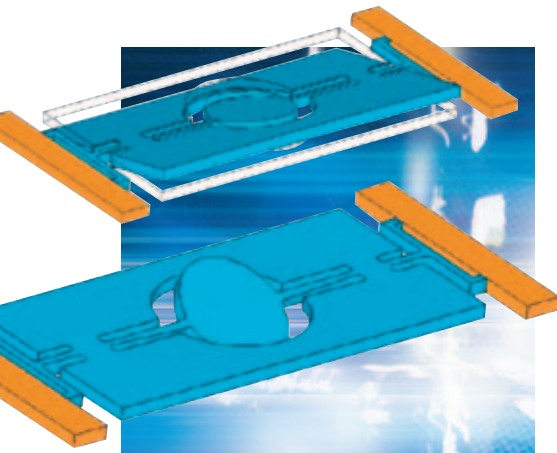


Bild 3: Erste (oben) und zweite (unten) Eigenschwingform des Scanners

externe elektrostatische Felder. Die Beobachtung der Systemantwort und der Anregung liefert die Signale, aus denen mittels Signalanalyse auf die Frequenzübertragungsfunktionen geschlossen werden. Die Schwingungsamplituden liegen oft im Bereich zwischen einigen hundert Picometern und wenigen Mikrometern, wobei die maximale Auflösung des Systems im Picometer-Bereich liegt.

Schließlich wird eine Parameteradaption des ordnungsreduzierten Modells anhand der Messdaten durchgeführt. Ziel ist es, die Modellparameter derart zu modifizieren, dass der Unterschied zwischen der berechneten und der aus den Messdaten abgeleiteten Reaktion minimiert wird. Dazu wird vorrangig die

Auswertung von Resonanzfrequenzen und der Vergleich mit den Eigenfrequenzen des Modells (Eigenwertresiduum) und das Verfahren der kleinsten Fehlerquadratsumme genutzt. Die Frage nach der Genauigkeit der Simulation kann nach einem Vergleich der berechneten und gemessenen Reaktion oder durch Vergleich der Modellparameter vor und nach der Adaption beantwortet werden. Das Modell ist außerdem zur Simulation des Verhaltens der MEMS-Bauelemente unter Zugrundelegen sehr unterschiedlicher Randbedingungen einsetzbar. Die Material- bzw. Geometrieparameter lassen sich unmittelbar quantitativ ermitteln und können zur Prozesssteuerung herangezogen werden.

Beispiel: MEMS-Scanner

Die Aufgabe besteht darin, anhand von Messungen die Steifigkeit und die Geometrie der Torsionsbänder, die Mikrospiegel, Antriebsplatte und Rahmen elastisch miteinander verbinden sowie die Dämpfung durch die Luftströmung messtechnisch zu bestimmen. In einem ersten Schritt wird ein Finite-Elemente-Modell des Scanners aufgestellt (Bild 3) und eine Analyse der Eigenfrequenzen und Schwingformen sowie der durch die Luftströmung verursachten mechanischen Dämpfung durchgeführt (Bild 4).

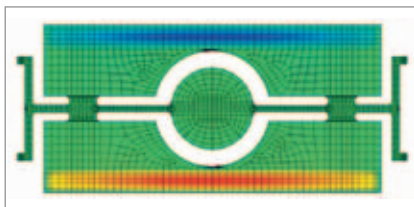


Bild 4: FEM-Analyse der Dämpfung durch Luftströmung, Druckverteilung

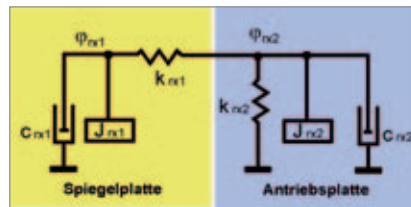


Bild 5: Modell nach Ordnungsreduktion

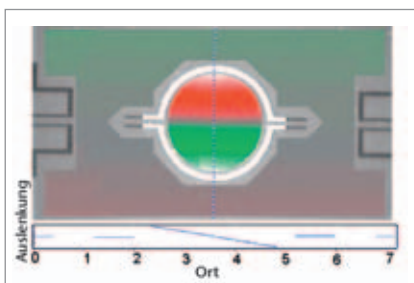


Bild 6: Messergebnisse des Microscope Scanning Vibrometers, links: Schwingform; rechts: Übertragungsfunktion

Eine Reduktion der Modellordnung führt auf ein Modell mit konzentrierten Parametern (Bild 5).

In einem zweiten Schritt werden die Frequenzübertragungsfunktionen an unterschiedlichen Strukturpunkten des MEMS-Scanners gemessen und die Eigenfrequenzen ausgelesen (Bild 6).

Schließlich wird aus den Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen das Eigenwertresiduum gebildet und die Steifigkeitsmatrix mittels des Verfahrens der kleinsten Fehlerquadratsumme korrigiert. Nach dieser Prozedur enthält sie die an das Verhalten des Prüflings angepassten Steifigkeiten der Torsionsfedern. Die Dämpfungsmatrix wird anschließend adaptiert, indem die berechneten und gemessenen Schwingungsamplituden herangezogen werden. Eine zusätzliche Untersuchung der Spiegeloberfläche mittels eines stroboskopischen Interferometers oder einer Messung der Schwingungsamplituden an vielen Orten auf dem Mikrospiegel liefert Informationen über mögliche dynamische Deformationen.

Zusammenfassung

Die Geometrie- und Materialparameter von mikromechanischen Bauelementen werden durch die Verarbeitung von Messdaten und von Simulationsdaten mittels Modellparameter-Adaption bestimmt. Der Einsatz eines Laser Doppler Vibrometers und einer Wafer Probe Station gestattet dabei eine rationelle Messdatengewinnung. Die Forscher am Fraunhofer IZM arbeiten gemeinsam mit den Kollegen von Polytec an der Verfeinerung der Messtechnik und der Parameteradaption.

AUTOREN · KONTAKT

Dr.-Ing. Steffen Kurth
Dr.-Ing. habil. Jan Mehner
Fraunhofer IZM
Micro Devices and Equipment
D-09126 Chemnitz
steffen.kurth@che.izm.fhg.de