



Maßgeschneiderte Modelle für MEMS

Systematische Parameter-Extraktion und Modellvalidierung mit dem MSA-500

Mikromechanische Wandler Elemente sind aus vielen Anwendungen nicht mehr weg zu denken. Einsatzgebiete sind zum einen klassische Bereiche wie die Automobiltechnik (z.B. Airbag- oder Reifendruck Sensoren), zunehmend aber auch der Consumerbereich (z.B. Mobiltelefone). Simulationen sollen bei den immer weiter steigenden Anforderungen an diese Bauelemente und Systeme helfen, Zeit und Kosten zu sparen. Die Modellierung muss dabei eng mit experimenteller Charakterisierung verzahnt sein, um möglichst effizient das gewünschte Ergebnis zu erzielen. ►

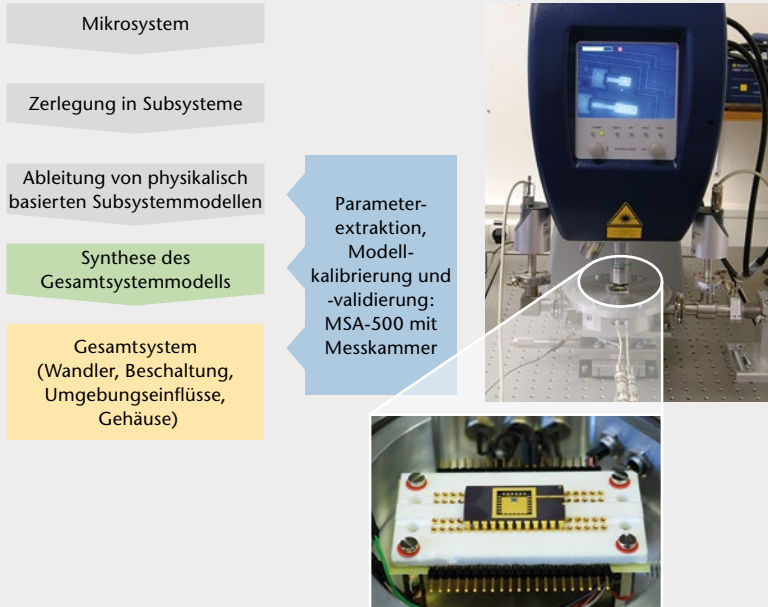


Bild 1: Hierarchischer Modellierungsansatz für mikromechanische Bauelemente und Systeme (links); für Parameterextraktion, Kalibrierung und Modellvalidierung wird ein MSA-500 Laser-Doppler-Vibrometer eingesetzt, das mit einer Vakuummesskammer zur druck- und temperaturabhängigen Charakterisierung kombiniert werden kann.

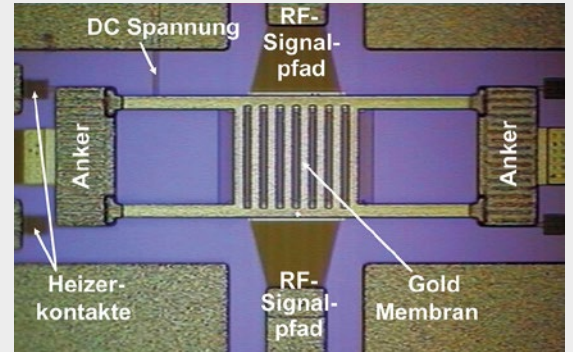


Bild 2: Mikromechanischer Hochfrequenzschalter. Der Schalter und damit der HF-Signalfad kann geschlossen werden, indem die geschlitzte, an vier Balken aufgehängte Membran mittels einer elektrischen Spannung bis zum Kontakt mit der Gegenelektrode ausgelenkt wird.

Hierbei bewegt man sich in einem äußerst komplexen Umfeld, da stets Kopplungen zwischen verschiedenen Energieformen zu berücksichtigen sind. Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der jeweiligen Konzepte muss darüber hinaus immer das Gesamtsystem mit elektronischer Beschaltung zur Ansteuerung, Regelung und Signalauswertung betrachtet werden. Daher sind im Entwicklungsprozess von Mikrobauelementen und –systemen Modellbildung, Simulation, experimentelle Charakterisierung, Parameterextraktion und Modellverifikation eng verzahnt, um möglichst schnell und effizient das gewünschte Ergebnis zu liefern.

Um Mikrosysteme mit sinnvollem Aufwand zu beschreiben, benötigt man oftmals abstrahierende Modelle, die das Verhalten des Gesamtsystems effizient und schnell simulieren. Hierzu verwendet man einen hierarchischen und modularen Modellierungsansatz (Bild 1, links), bei dem das System zunächst in Subsysteme unterteilt wird, für die, je nach Anforderung, maßgeschneiderte, physikalisch basierte Systemmodelle abgeleitet werden (siehe Überblick in Bild 1). Mittels standardisierter Hardware-Beschreibungssprachen lassen sich diese Modelle direkt in einen Schaltkreissimulator implementieren. Sie eignen sich dann für die Co-Simulation von mikro-

mechanischen Wandlerelementen mit der zu entwickelnden Auswert- und Regelelektronik innerhalb einer homogenen Simulationsumgebung. Voraussetzung für einen derartigen Prozess ist allerdings die enge Verzahnung mit dezidiertem Parameterextraktion und Kalibrierung sowie Validierung der einzelnen Modelle. Hierfür verwendete man den dargestellten Messaufbau (Bild 1, rechts). Dieser besteht aus einem MSA-500 Laser-Doppler-Vibrometer und einer Messkammer, in der man die Proben druck- und temperaturabhängig charakterisieren kann. Die Bauelemente sind sowohl elektrisch als auch mechanisch über einen Piezoschwinger angeregt.

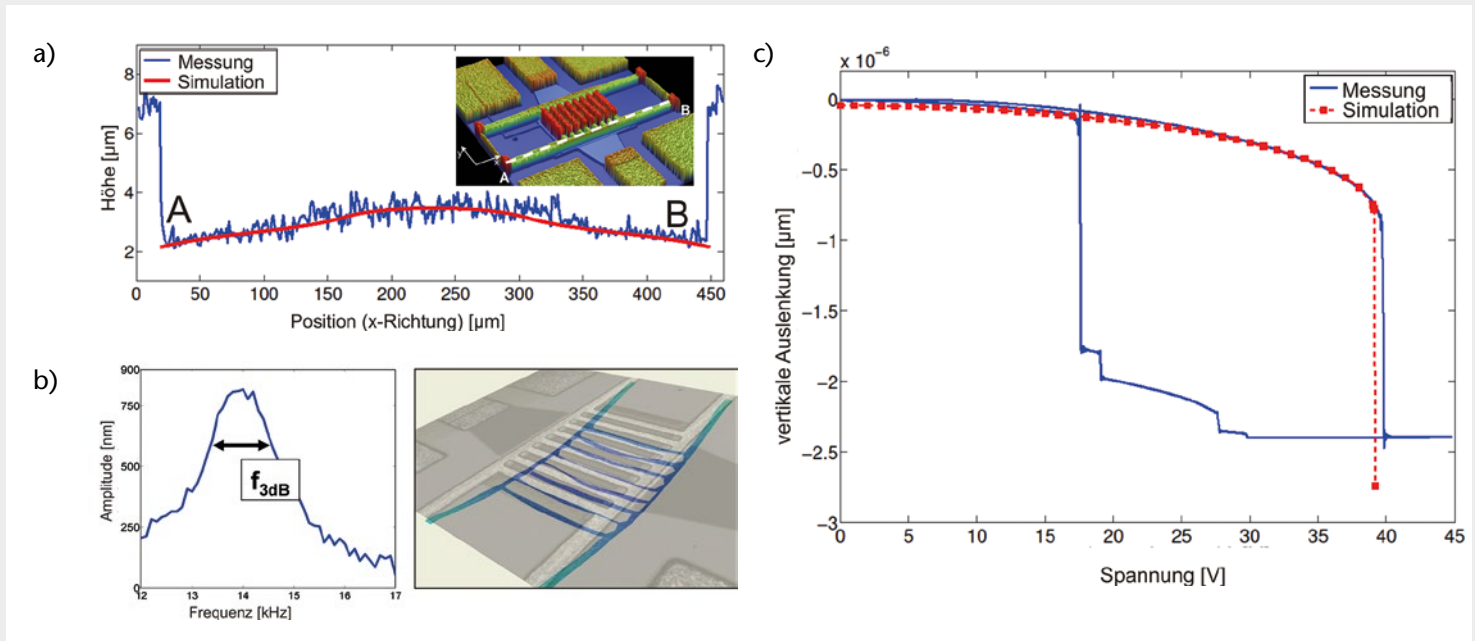


Bild 3: Exemplarische Messdaten für die Parameter-Extraktion und Kalibrierung eines gekoppelten Simulationsmodells für den in Bild 2 dargestellten mikromechanischen Hochfrequenzschalter.

a) Biegelinie des Ruhezustandes, vermessen mit einem Weißlichtinterferometer

b) Eigenfrequenzbestimmung

c) Quasistatische Pull-in-Charakteristik der elektrostatisch angeregten Brücke, jeweils gemessen mit dem Laser-Doppler-Vibrometer

Ergänzt wird diese Ausrüstung durch ein Weißlichtinterferometer zur Topologie-Bestimmung sowie elektrischer Messtechnik (vorwiegend kapazitive Charakterisierung).

Bild 3 zeigt ein typisches Vorgehen bei der Modellkalibrierung und -validierung bei einem Hochfrequenzschalter. Dabei handelt es sich um eine an vier Balken aufgehängte, geschlitzte bewegliche Brücke, die mittels elektrostatischer Anregung nach unten auslenkbar ist, bis der Kontakt mit der darunter liegenden Gegenelektrode hergestellt und ein Hochfrequenz-Signalpfad geschlossen ist. Hierzu muss

zunächst das mechanische Teilmodell kalibriert und die genauen geometrischen Abmessungen, die mechanische Steifigkeit und die eventuelle fabrikationsbedingte Verwölbung bestimmt werden. Weißlichtinterferometer-Messungen des Bauelementeprofiles im unbelasteten Zustand sowie Eigenfrequenzmessungen bei niedrigem Umgebungsdruck liefern diese Parameter (Bild 3a). Quasistatische Messungen der Struktur bei elektrostatischer Anregung der Brücke bis zum Kontakt, sogenannte Pull-in-Messungen (Bild 3c), geben Aufschluss über die Spalthöhe unter der Brücke und die Schaltspannung. Das Gesamtmodell inklusive der

Dämpfungseffekte durch die umgebende Luft wird schließlich anhand des dynamischen Verhaltens überprüft. Stimmen simulierte und gemessene Werte überein, sind alle Effekte im Modell physikalisch korrekt und mit ausreichender Genauigkeit enthalten. Es ist damit für Untersuchungen des Bauelementeverhaltens sowie Design- und Optimierungsstudien geeignet. Mit einem so kalibrierten Modell untersucht und optimiert man dann beispielsweise Schaltzeiten, Schaltverhalten und mechanischen Kontakt verschiedener Designs (Bild 4). Bild 5 zeigt die Auslenkung einer alternativen Schaltervariante, bei der zur ►

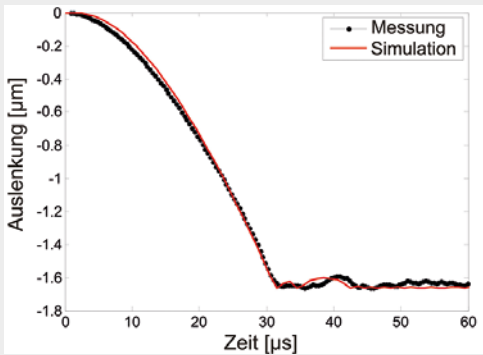


Bild 4: Schließvorgang eines Mikroschalters. Vergleich zwischen Simulation und Messung.

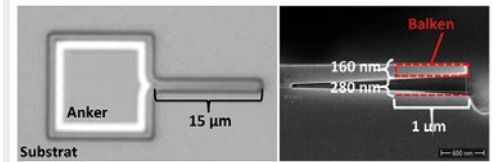
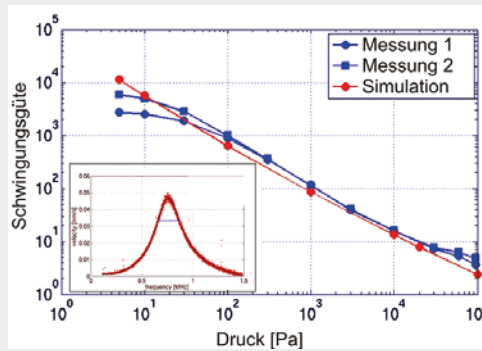


Bild 6: Güte-Bestimmung für eine Balkenstruktur mit einem Abstand zum Substrat im sub-Mikrometerbereich. Die Güte wurde aus der 3-dB-Bandbreite der ersten Eigenresonanz berechnet.

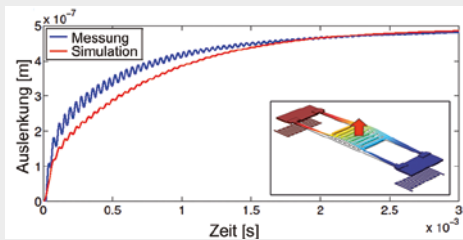


Bild 5: Transiente vertikale Auslenkung einer mikromechanischen Schalterstruktur induziert durch Aufheizen der Brücke mittels unter den Ankerimplantierter Heizmäander: Vergleich zwischen Messungen und Simulation. Überlagert sind Schwingungen der Brücke in der fundamentalen Eigenmode.

Als letztes Beispiel zeigt Bild 6 Untersuchungen zur Entwicklung neuartiger nano-elektromechanischer Bauelemente, bei denen die Spalthöhen unterhalb der mechanisch beweglichen Balken und Membranen im sub-Mikrometer-Bereich liegen.

Wenn solche Strukturen als Resonatoren betrieben werden, sind mechanische Schwingungsgüten von großem Interesse. Beispielfhaft werden hier druckabhängige Gütewerte gezeigt, extrahiert aus der 3-dB-Bandbreite der ersten Eigenresonanz der dort dargestellten Balkenstruktur im Vergleich mit den simulierten Werten. Eine besondere Herausforderung bei solchen Strukturen stellen die kleinen Strukturgrößen dar, da man hier schon bei Raumdruck an die theoretischen Grenzen der klassischen Kontinuumstheorie stößt und bei der Ableitung der Simulationsmodelle mit besonderer Sorgfalt vorgehen muss. ■

Steigerung der Zuverlässigkeit Heizmäander unterhalb der Anker integriert wurden. Im Falle einer Fehlfunktion durch Haften an der Gegenelektrode sollen über eine thermische Ausdehnung der beweglichen Brücke Biegemomente auf diese ausgeübt werden, die sie lösen und den Schalter wieder funktionstüchtig machen. Aus Simulation und Messung können Rückschlüsse auf Effizienz und Zeitverhalten dieses Mechanismus gezogen und Vorschläge zur Verbesserung erarbeitet werden.

Kontakt

Gabriele Schrag, Thomas Künzig, Johannes Manz, Regine Behlert, Martin Nießner*

schrage@tum.de

Arbeitsgruppe „Mikroelektromechanische Systeme“ am Lehrstuhl für Technische Elektrophysik der Technischen Universität München

*jetzt: Infineon Technologies AG, München