

## Simulation vs. Messung

FEM-Simulation und messtechnische Untersuchung eines Ultraschallwandlers



Wichtige Hilfsmittel in der bildgebenden Diagnostik sind Ultraschall-Verfahren, die auch als (diagnostische) Sonographie bezeichnet werden. Die Weiterentwicklung der Wandler-technologie zur Erzeugung von Ultraschallwellen ist für die medizintechnische Forschung und Entwicklung ein wichtiges Thema.

Mikrosystemtechnisch gefertigte Ultraschallwandler (kapazitive mikromechanische Ultraschallwandler – cMUTs) sind vielversprechende Transducer für medizinische Ultraschall-Anwendungen. Im Vergleich zu konventionellen piezoelektrischen Ultraschallwandlern, besitzen cMUTs einzigartige Eigenschaften. So verringert sich durch die Biegeschwingform der cMUT-Membran die mechanische Impedanz der Wandler, und der Energietransfer an das Umgebungsmedium verbessert sich. Außerdem ermöglicht es die Mikrofabrikation, cMUTs kostengünstig mit Verfahren der Halbleitertechnik in Serie zu fertigen.

cMUTs profitieren auch von einem besseren Signal-Rausch-Verhältnis aufgrund der direkten Integration mit dem geometrisch unterhalb liegenden CMOS-Ansteuerungs- und Auslese-Schaltkreis. Das Thema „elektrische Verschaltung“ stellt bei cMUTs kein Problem dar, sodass großformatige 1D- oder kompliziertere 2D-Array-Konfigurationen möglich sind. Aufgrund dieser Argumente sind cMUTs sehr gut geeignet für die nächste Generation von diagnostischen Ultraschallverfahren. In den vergangenen 20 Jahren wurden von etlichen Forschergruppen Prototypen für Ultraschall-Bildgebungsverfahren auf Grundlage von cMUTs vorgestellt.

Bislang blieb die Untersuchung einzelner cMUT-Zellen bei wissenschaftlichen Untersuchungen eher unbeachtet – weder auf Modell-ebene noch experimentell.

Tatsächlich lassen sich aber aus der genauen Vorhersage des Ausgangsdruckes und des entsprechenden Frequenzganges einer Zelle nützliche und wichtige Informationen für die Konstruktion von Ultraschallwandlern ableiten. Forscher nutzten jetzt sowohl die FEM-Simulation als auch die optische Messung, um das Übertragungsverhalten der Schallwandler-Oberfläche zu ermitteln. Auf Basis dieser Ergebnisse bestimmten sie dann mittels der Rayleigh-Integral-Methode das räumliche Druckfeld. Den Ausgangsdruck des cMUTs maßen sie dann mit einem Hydrophon. Anschließend

vergleichen sie die Ergebnisse von Simulation und Messung.

### CMUT ALS MESSOBJEKT

Eine isolierte quadratische cMUT-Zelle mit abgerundeten Ecken wurde für die Untersuchung verwendet. Die Isolation der Zelle hat den Vorteil, dass störende „Nachbarschaftseffekte“ aufgrund von Übersprechen und Aufhängung auf ein vernachlässigbar niedriges Niveau sinken. Bild 1(a) zeigt die Zelle von oben. Der Durchmesser der quadratischen Membran beträgt  $60\ \mu\text{m}$ . Für die Messsonden gab es zwei Kontaktpads: das eine, dem Element am nächsten, war an die Bodenelektrode angeschlossen, das andere an die Top-Elektrode. Werden Gleich- und Wechselspannung separat an die beiden

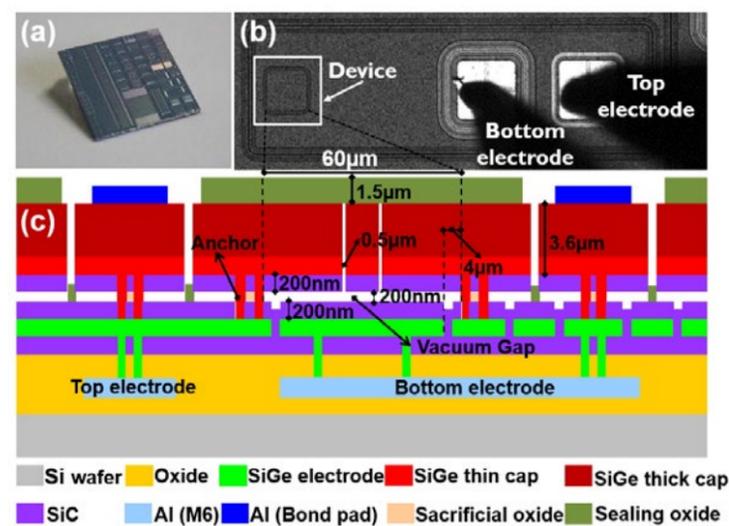


Bild 1: (a) Blick auf die cMUT-Zelle (Schliffbild), (b) Querschnitt der cMUT-Zelle.

Pads angelegt oder auf ein Pad überlagert, wobei das andere geerdet ist, vibriert die Membran. Im Medium wird die entsprechende Ultraschallwelle erzeugt. In der vorliegenden Untersuchung wurde die cMUT-Zelle in Anwesenheit von zwei Medien betrieben: Luft und FC-84 (3M™, USA), ein spezielles Fluorinert.

### OPTISCHE UND AKUSTISCHE MESSUNGEN

Das dynamische Verhalten der cMUT-Zelle wurde mittels Laser-Doppler-Vibrometrie (Polytec Micro System Analyzer MSA-500) analysiert. Der Versuchsaufbau ist in Bild 2 (a) dargestellt. Die cMUT-Zelle ist in die etwa 5 mm tiefe FC-84-Flüssigkeit eingetaucht.



Ein von einem Impulsgenerator (60 V) kommender, 50 ns langer Impuls wirkte auf das Pad, das an die Bodenelektrode der cMUT-Zelle angeschlossen war. Eine 160-V-Gleichstromvorspannung, was 60 % der theoretischen Nennspannung entspricht, wurde an das andere Pad angelegt.

Die Polaritäten der Impulsspannung und der DC-Vorspannung waren so, dass sich die Effektivspannungen summierten. Die Messungen erfolgten in Luft und in FC-84. Eine Korrektur wurde bei der FC-84-Messung durchgeführt, und die gemessene Auslenkung wurde durch 1,261 geteilt, dem Brechungsindex von FC-84.

### ERGEBNISSE UND DISKUSSION FREQUENZGANGMESSUNGEN

In der akustischen Theorie lässt sich der Einfluss der mit dem Wandler mitbewegten Flüssigkeit als Masse beschreiben („radiation mass“). Diese Masse verringert die Resonanzfrequenz der Membran (oder die Mittenfrequenz in der Druckfrequenzgangkurve). Um den Effekt der Flüssigkeitsmenge zu bewerten, wurden die Frequenzeigenschaften der cMUT-Zelle in Luft wie auch in FC-84 analysiert.

### ERGEBNISSE FÜR LUFT:

In der Simulation mit ANSYS wurde die cMUT-Zelle zunächst mit einer Gleichstrom-Vorspannung von 160 V belastet, und eine harmonische Simulation unter Vorspannung durchgeführt. Die Auslenkung des

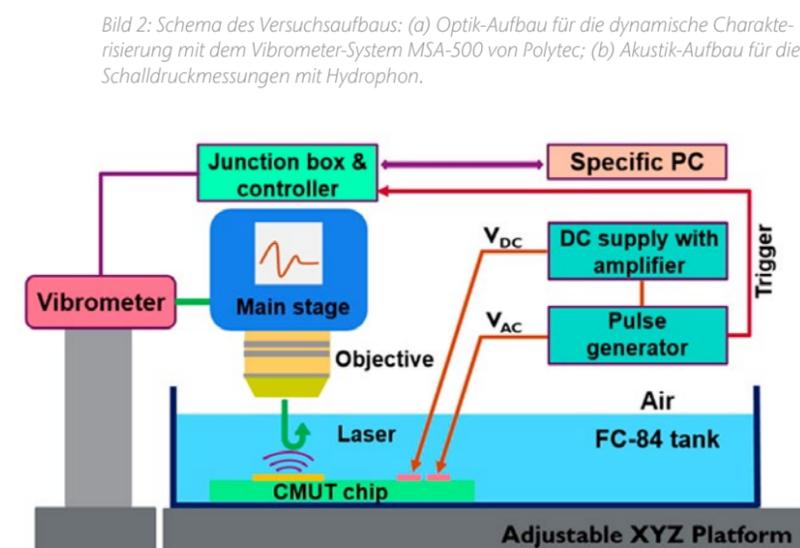


Bild 2: Schema des Versuchsaufbaus: (a) Optik-Aufbau für die dynamische Charakterisierung mit dem Vibrometer-System MSA-500 von Polytec; (b) Akustik-Aufbau für die Schalldruckmessungen mit Hydrophon.

Mittelpunktes wurde gemessen und auf die maximale Auslenkung normiert (Bild 3). Im Medium Luft wurde ein Resonanz-Peak bei etwa 9,43 MHz simuliert, während die Polytec-Messung einen Peak von 9,50 MHz ergab. Die Diskrepanz der Mittenfrequenz zwischen FEM-Simulation und Messung ist vernachlässigbar gering. Allerdings ist der Unterschied zum beobachteten Q-Faktor beachtlich. Die 3-dB-Bandbreite des Resonanz-Peaks in Relation zu seiner Mittenfrequenz charakterisiert den Q-Faktor. Der aus den ANSYS-Simulationen erhaltene Q-Faktor von 496 ist ungefähr doppelt so groß wie der gemessene Q-Faktor 232. Dies ist verständlich, da die Simulation außer den Dämpfungsverlusten in der Luft keine weiteren Verluste berücksichtigt.

Die Luftdämpfung ist daher vernachlässigbar klein, die Dämpfung durch Material, Stützstruktur oder Verankerung ist vorherrschend.

### ERGEBNISSE FÜR FC-84:

Ähnlich wurde beim Medium FC-84 verfahren (Bild 4). Ein Polynom-Fit reduziert das Rauschen bei der Flüssigkeitsmessung. Sowohl die Simulation als auch die Messung zeigen eine klare Verschiebung der Resonanzfrequenz, verglichen mit den Messungen in Luft. Die Mittenfrequenz in FC-84 beträgt etwa 5,5 MHz (verglichen mit 9,5 MHz in Luft). Diese Verschiebung zu geringeren Frequenzwerten resultiert aus der im Vergleich zu Luft deutlich größeren „radiation mass“ von FC-84. Der in FC-84 beobachtete Q-Faktor ist ebenfalls stark verringert, verglichen mit

dem Q-Faktor in Luft. In FC-84 stimmen aufgrund der dominierenden Flüssigkeitsdämpfung die Werte für den Q-Faktor bei Simulation ( $Q = 1,2$ ) und Messung ( $Q = 1,1$ ) deutlich besser überein als in Luft. Ein Q-Faktor von ungefähr 1 illustriert die hohe Bandbreite der cMUT-Zelle.

### SPRUNGANTWORT-VERHALTEN (AUSLENKUNG)

Eine Simulation des transienten Verhaltens unter Vorspannung erfordert in ANSYS zuerst eine transiente Simulation ohne Einschwingvorgang (ANSYS Kommando: `timint, off`) und die Anlegung einer konstanten Gleichspannung von 160 V. Danach wird eine normale transiente Simulation mit einem Impuls durchgeführt, welcher der Gleichspannung von 160 V überlagert ist. Mit Blick auf die Verzögerung in der Polytec-Messung

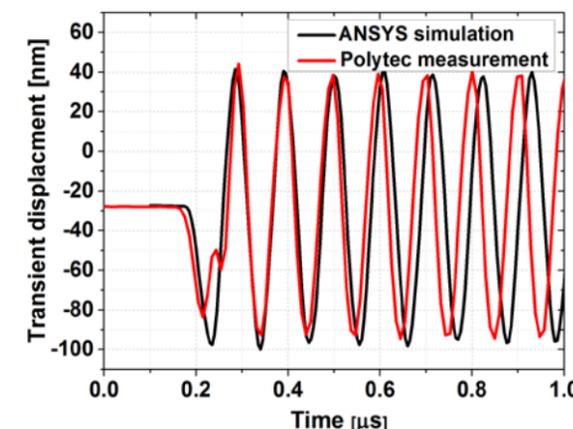


Bild 5: Transiente Verschiebung der cMUT-Zelle in Luft.

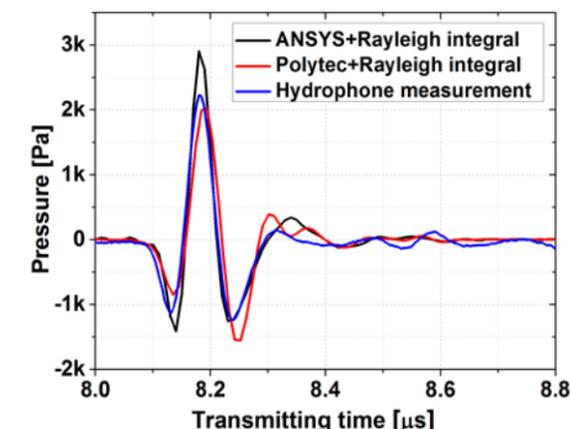


Bild 6: Transiente Auslenkung der cMUT-Zelle in FC-84.

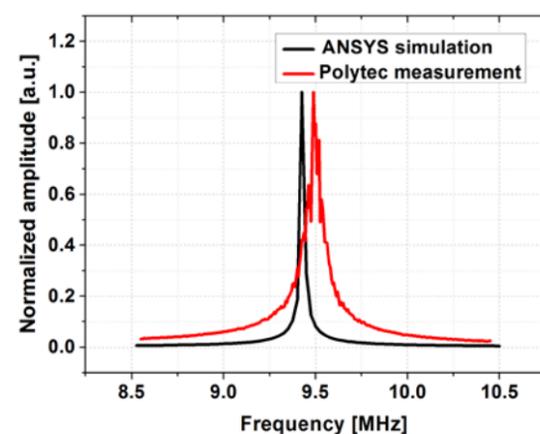


Bild 3: Resonanz-Peaks der cMUT-Zelle in Luft.

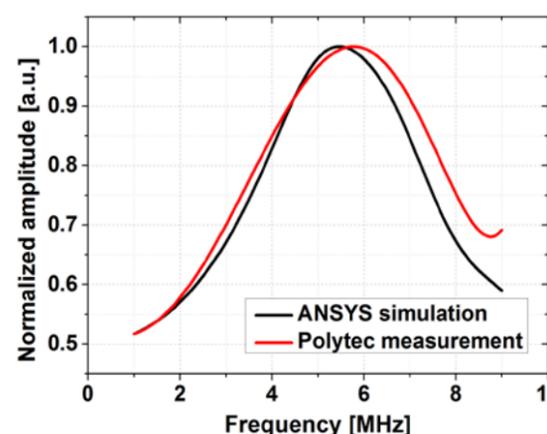


Bild 4: Resonanz-Peaks der cMUT-Zelle in FC-84.

wurde für die transiente Simulation ohne Einschwingvorgang eine Dauer von 175 ns eingestellt, d.h. ein 60-V-Puls wird bei  $t = 175$  ns für 50 ns aktiviert. Die Auslenkung des zentralen Knotenpunkts wurde erneut bestimmt. Es gab keine statische Durchbiegung in der Polytec-Messung und die gemessene Auslenkung wurde zum Vergleich mit der Simulation angepasst.

### ERGEBNISSE FÜR LUFT:

Das Sprungantwortverhalten der cMUT-Zelle in Luft gemäß ANSYS-Simulation und gemäß Polytec-Messung zeigt Bild 5. Eine gute Übereinstimmung der Amplituden sind in den ersten Zyklen sichtbar. Wegen der Diskrepanzen bei Resonanzfrequenz und Q-Faktor, wird der Unterschied zwischen Simulation und Messung nach mehreren Zyklen signifikant. Allerdings erwartet man im Fall der Messung, wegen

zusätzlicher Materialdämpfung und Verlusten durch die Befestigung, dass die Amplitude viel schneller abfällt als bei der Simulation.

### ERGEBNISSE FÜR FC-84:

Eine ähnliche Simulation und Messung wurde in FC-84 durchgeführt. Die Dämpfung durch das Medium wurde signifikant, als der Wandler in FC-84 eingetaucht war, eine rasche Dämpfung für das transiente Auslenkungssignal zeigt sich sowohl in der Simulation als auch in der Messung.

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

In unserer Untersuchung demonstriert die gute Übereinstimmung zwischen FEM-Simulation und den experimentellen Ergebnissen ein grundsätzliches Verständnis der einzelnen cMUT-Zellen. ANSYS-Simulation und die Vibrometer-Messungen stimmen gut überein.

Die entsprechenden Ergebnisse für den räumlichen Druck stimmen mit den Ergebnissen der Hydrophonmessungen ebenfalls gut überein.

Das beweist, dass ANSYS kombiniert mit der Rayleigh-Integral-Methode eine schnelle und effektive Methode zur Simulation von Druckfeldern ist. Dieser Ansatz ist für die Konstruktion aufwändiger cMUT-Anordnungen für künftige Anwendungen in der Bildgebung sehr hilfreich. ■

#### Kontakt

S.P. Mao (mao@imec.be), X. Rottenberg, V. Rochus, H.A.C. Tilmans  
IMEC v.z.w.  
Heverlee, Belgien  
www.imec.be

S.P. Mao (mao@imec.be), B. Nauwelaers  
Department of Electronic Engineering  
Katholieke Universiteit Leuven, Belgien  
www.kuleuven.be