

Kapazitive Mikromechanische Ultraschallwandler für die Anwendung in der zerstörungsfreien Prüfung

Uwe VÖLZ¹, Sandro G. KOCH¹, Marco KIRCHER¹, Marcel KRENKEL¹

¹ Fraunhofer IPMS, Dresden

Kontakt E-Mail: uwe.voelz@ipms.fraunhofer.de

Kurzfassung. Kapazitive mikromechanische Ultraschallwandler (CMUTs) haben aufgrund ihrer Konstruktion und des physikalischen Wirkprinzips eine hohe Empfangsempfindlichkeit und Bandbreite. Die Entwicklung dieser Sensoren ist in den vergangenen Jahrzehnten vor allem durch die medizinische Diagnostik initiiert worden. Da sie eine natürliche Anpassung an Wasser besitzen eignen sie sich sehr gut für die klassische Sonographie. Ihre gute Anpassbarkeit an Luft ermöglicht aber auch den Einsatz für Diagnoseverfahren, bei denen die Verwendung von Koppelmedien ausgeschlossen ist, wie zum Beispiel im Gehörgang oder am Augapfel.

Durch die Fortschritte bei der Optimierung der CMUT-Strukturen am Fraunhofer IPMS können jetzt auch andere Anwendungsfelder, wie die zerstörungsfreie Prüfung, adressiert werden. CMUTs eignen sich dabei insbesondere für die Realisierung von kleinen Aperturen und Arrays mit hohen Elementzahlen bis 30 MHz, wobei ihre Vorteile gegenüber Piezokeramiken speziell bei bildgebenden Ultraschallverfahren voll zum Tragen kommen.

In diesem Beitrag wird ein Überblick zu den Vorteilen von CMUT-Sensoren gegeben und anhand von Beispielen werden die Möglichkeiten ihrer Anwendung in der zerstörungsfreien Prüfung gezeigt. Die verfügbaren Ultraschallwandler und Anwendungsdemonstrationen des Fraunhofer IPMS werden vorgestellt.

Einführung

Kapazitive mikromechanische Ultraschallwandler (CMUTs) auf Siliziumbasis wurden bereits vor mehr als 25 Jahren erstmals in Fachveröffentlichungen beschrieben [1]. Die Entwicklungen in der Fertigungstechnologie der vergangenen 20 Jahre ermöglicht heute eine effiziente Herstellung von leistungsfähigen CMUT-Strukturen auf Silizium-Wafern, die aufgrund ihrer hohen Empfangsempfindlichkeit insbesondere für die medizinische Diagnostik mit Phased-Arrays von Interesse sind [2]. Diese Entwicklung wird von einer Vielzahl an Herstellern medizinischer Ultraschalltechnik und Forschungseinrichtungen, wie dem Fraunhofer IPMS, erfolgreich vorangetrieben [3, 4, 5]. Neben den Anwendungen in der medizinischen Diagnostik wird aber zunehmend auch die Anwendung von CMUTs in der zerstörungsfreien Prüfung adressiert, wie im Folgenden gezeigt wird.



1. Eigenschaften von CMUTs

1.1 Funktionsprinzip eines CMUTs

Kapazitive mikromechanische Ultraschallwandler arbeiten im Empfang nach dem Prinzip eines Kondensatormikrofons (Abb. 1). Durch die Schallwelle wird eine flexible Kondensatorplatte in mechanische Schwingung versetzt. Die sich dadurch ändernde Kapazität erzeugt über eine Biasspannung einen Wechselstrom, der mit einem Strom-Spannungswandler in eine Wechselspannung umgewandelt wird. Diese Spannung kann mit einem handelsüblichen Ultraschallprüfgerät weiterverarbeitet werden.

Beim Senden wird die flexible Platte durch eine Wechselspannung, die zwischen den Kondensatorplatten eine elektrostatische Kraft erzeugt, ausgelenkt. Dazu kann der Sendeimpuls eines Ultraschallprüfgerätes, der die Platte mit der Resonanzfrequenz der elektromechanischen Struktur zum Schwingen bringt, direkt auf den CMUT geschaltet werden (Abb. 1). Durch das Anlegen einer Gleichspannung kann die flexible Platte zusätzlich statisch ausgelenkt und so ein definierter Arbeitspunkt eingestellt werden.

Mikromechanische Ultraschallwandler werden mit Methoden der Mikrosystemtechnik durch Abscheidung verschiedener Materialschichten und Ätzen von elektromechanischen Strukturen auf einem Siliziumwafer aufgebaut. Mit Grundstrukturen im Mikrometerbereich (Abb. 2) werden die gewünschten Ultraschallparameter wie Impedanz und Resonanzfrequenz eingestellt. Durch elektrisches Zusammenschalten mehrerer solcher CMUT-Zellen auf dem Wafer (Abb. 2), können ebene Ultraschallschwinger beliebiger Form, Größe und Elementanzahl realisiert werden [6].

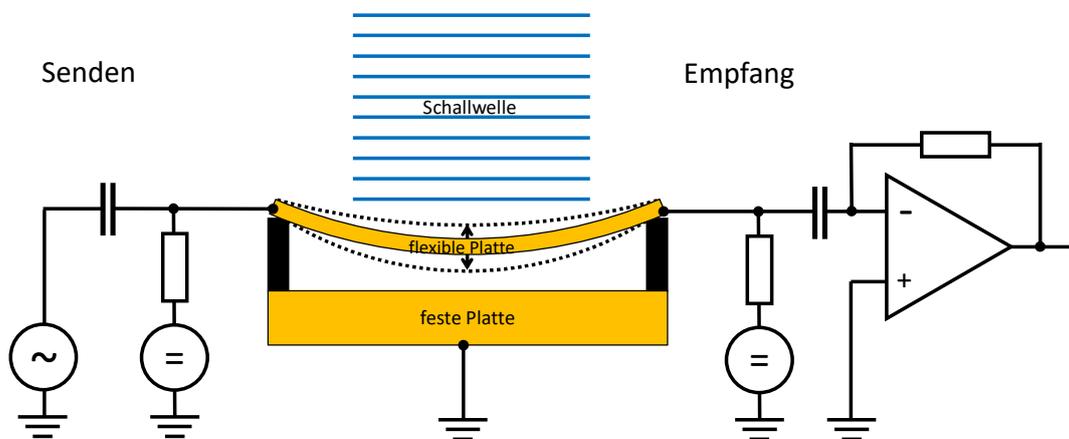


Abb. 1. Funktionsprinzip einer CMUT-Zelle.

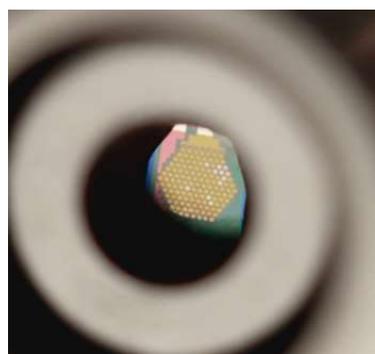


Abb. 2. Wabenförmige Anordnung von kreisförmigen CMUT-Zellen auf einem Ultraschallsensor mit 1mm Durchmesser.

1.2 Vorteile von CMUTs

Aus dem oben beschriebenen Funktionsprinzip und den genannten Eigenschaften von CMUTs ergeben sich einige Vorteile gegenüber anderen Wandlerprinzipien:

- Aufgrund der geringen mechanischen Kopplung zwischen den einzelnen CMUT-Zellen können Arrays mit großen Elementzahlen und kleinem Pitch ohne Spalt zwischen den Elementen gefertigt werden.
- Die CMUT-Zellen besitzen je nach mechanischer Struktur eine natürliche Anpassung an Luft oder Wasser und erreichen eine große Bandbreite.
- Durch die frei bewegliche Platte und den elektrostatischen Wandlermechanismus wird eine hohe Empfangsempfindlichkeit erreicht.
- Arbeitsfrequenz und Bandbreite können unabhängig von Form und Größe des Sensors durch die Variation der elektromechanischen Strukturen der einzelnen CMUT-Zellen eingestellt werden.
- Der Aufbau auf Siliziumwafern ermöglicht, in Kombination mit einer CMOS-Technologie, die Integration von analogen und digitalen Schaltungselementen auf einem CMUT-Chip.
- Da CMUTs und auch deren Fertigungsprozesse frei von Blei und anderen Schadstoffen sind, erfüllen sie die RoHS-Richtlinie der EU.

2. CMUT-Prüfköpfe des Fraunhofer IPMS

Am Fraunhofer IPMS sind derzeit verschiedene CMUT-Prüfköpfe verfügbar (Abb. 3). Dazu gehören Einzelelement-Sensoren für Gase und Flüssigkeiten mit 0,5 bis 1 mm Durchmesser, Annular-Arrays für Flüssigkeiten mit 10 mm Durchmesser und bis zu 13 Ringelementen sowie Linear-Arrays ab 80 μm Pitch mit bis zu 256 Elementen. Die möglichen Arbeitsfrequenzen reichen von 0,4 bis 30 MHz. Durch eine Beschichtung können die an Flüssigkeiten angepassten Sensoren auch an Festkörper angekoppelt werden.



Abb. 3. CMUT-Prüfköpfe mit integrierter Vorverstärkerelektronik, links: Einzelelement-Sensor, Mitte: Annular-Array, rechts: Linear-Array

Die CMUT-Prüfköpfe werden mit einer Vorverstärkerelektronik im Gehäuse aufgebaut, die mit einer externen Spannung von 5V versorgt werden muss. Die Array-Prüfköpfe werden mit einem in der zerstörungsfreien Prüfung weit verbreiteten Hypertronics-Stecker verbunden. In diesem Stecker ist ein DC-DC-Wandler zum Erzeugen der Biasspannung integriert. Über ein Kabel mit USB-A-Stecker werden der DC-DC-Wandler im Stecker und

die Vorverstärker im Prüfkopfgehäuse mit Betriebsspannung versorgt. Damit können die Array-Prüfköpfe ohne zusätzliche Maßnahmen an einem handelsüblichen Phased-Array-Ultraschallprüfgerät betrieben werden.



Abb. 4. Evaluation-Kit für CMUTs mit Red Pitaya Mikrocontroller-Board

Zur Evaluierung der Sensoren steht ein Evaluation-Kit auf Basis eines Red Pitaya Mikrocontroller-Boards zur Verfügung (Abb. 4) [7]. Das dafür entwickelte Analog-Frontend, stellt einen Sendekanal und bis zu zwei Empfangskanäle sowie die Betriebsspannung für die Vorverstärkerelektronik und die Biasspannung der CMUTs bereit.

Eine browserbasierte Bedienoberfläche ermöglicht die Parametrierung und Aufzeichnung von einzelnen A-Bildern. Mit einem SDK (Software Development Kit) für Windows[®] und Linux[®] lässt sich das System über eine Netzwerkschnittstelle fernbedienen, so dass eigene Software zur kontinuierlichen Aufzeichnung und Auswertung von Messdaten entwickelt werden kann.

3. Anwendungsbeispiele

3.1 Luftultraschall

Sensoren für Luftultraschall sind im Bereich von 1 bis 2,5 MHz verfügbar. Sie eignen sich unter anderem für Abstands-, Füllstands- und Durchflussmessungen (Abb. 5) und als Arrays für hochauflösende Oberflächenscans (Abb. 6 links).

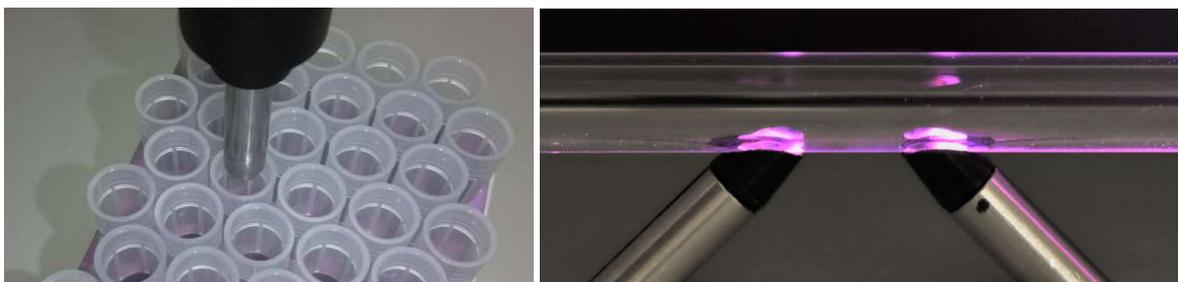


Abb. 5. Messe-Demonstratoren für Luftultraschall, links: Füllstandsmessung, rechts: Durchflussmessung

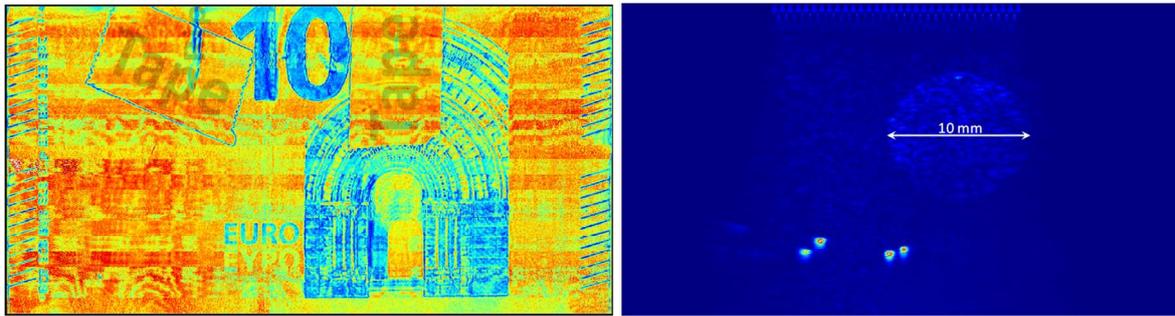


Abb. 6. Links: Oberflächenscan eines Geldscheines mit Riss und zwei Klebestreifen, rechts: B-Bild an einem Bodyphantom mit 100 μm dicken Filamenten und einem schallstreuenden Volumen mit 10 mm Durchmesser

3.2 Tauchtechnik

Für die Tauchtechnik sind Sensoren im Frequenzbereich von 1 bis 15 MHz verfügbar. Annular-Arrays mit 10 mm Durchmesser und bis zu 13 Ringelementen sowie Linear-Arrays mit bis zu 256 Elementen und einem Pitch ab 80 μm können gefertigt werden. Als Beispiel wird in Abb. 6 rechts die Bildgebung mit einem 5 MHz Linear-Array an einem medizinischen Bodyphantom gezeigt.

3.3 Kontakttechnik

Die für die Tauchtechnik entwickelten CMUT-Prüfköpfe können auch in Kontakttechnik verwendet werden (Abb. 7). Durch eine Beschichtung lassen sich diese Sensoren problemlos an Festkörper an koppeln.

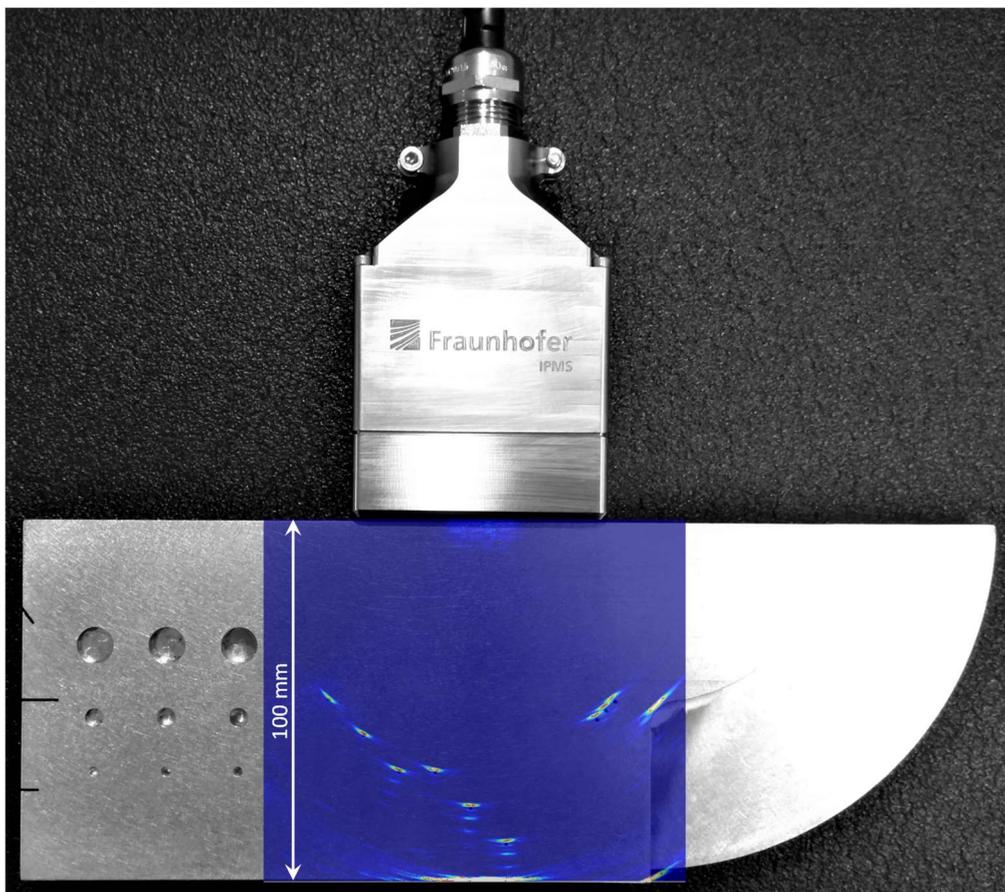


Abb. 7. B-Bild an einem Kalibrierkörper mit 1 mm Querbohrungen

4. Fazit und Ausblick

Am Fraunhofer IPMS ist bereits eine umfangreiche Bandbreite von CMUT-Prüfköpfen verfügbar, die für Anwendungen in der zerstörungsfreien Prüfung geeignet sind. Durch die Integration der Vorverstärkerelektronik in das Prüfkopfgehäuse, können die CMUT-Arrays an handelsüblichen Phased-Array-Ultraschallprüfgeräten betrieben werden. Die akustischen Eigenschaften der CMUTs können in einem weiten Bereich an kundenspezifische Anforderungen angepasst werden.

Aktuelle Weiterentwicklungen der CMUT-Technologie zielen insbesondere auf eine Erweiterung des Frequenzbereiches sowie eine Erhöhung der Sendeleistung im Impuls-Echo-Betrieb ab. Ebenso wird intensiv an einer Integration von CMUT-Strukturen und Vorverstärkerelektronik auf einem Siliziumchip gearbeitet, was besonders für die praktische Anwendung von zweidimensionalen Matrix-Arrays mit großen Elementzahlen von Interesse ist.

Danksagung

Die hier dargestellten Inhalte sind das Ergebnis verschiedener Forschungsvorhaben.

- Diese Maßnahme wird mitfinanziert mit Steuermitteln auf Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.
- Teile der Arbeit wurden aus Mitteln des ECSEL Projekts „Advanced Distributed Pilot Line for More-than-Moore Technologies“ (Fördernummer 661796) finanziert.
- Teile der Arbeit wurden gefördert im Rahmen der Internen Programme der Fraunhofer-Gesellschaft, Fördernummer MAVO 836940.

Referenzen

- [1] M. I. Haller, B. T. Khuri-Yakub, “A surface micromachined electrostatic ultrasonic air Transducer”, Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 1994, pp. 1241-1244
- [2] B. T. Khuri-Yakub, Ö. Oralkan, “Capacitive micromachined ultrasonic transducers for medical imaging and therapy”, J. Micromech. Microeng., Vol. 21(5), May 2011, DOI: 10.1088/0960-1317/21/5/054004
- [3] A. Debray, J. Mouly, “Ultrasound Sensing Technologies 2020”, Market and Technology Report, Hg. Yole Développement, 2020
- [4] M. Krenkel, M. Kircher, M. Kupnik, S. G. Koch, “CMUT with mechanically coupled plate actuators”, IEEE 19th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments, in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), April 2018, DOI: 10.1109/EuroSimE.2018.8369874
- [5] M. A. Moehring, G. A. Gates, D. M. Kreindler, J. A. Chesavage, R. Singh, “Apparatus and method for characterization of acute otitis media”, US Patent Application Publication US20200187899A1, June 2020
- [6] AIR COUPLED CAPACITIVE ULTRASONIC TRANSDUCERS (CMUT), Data Sheet, Fraunhofer IPMS, https://www.ipms.fraunhofer.de/content/dam/ipms/en/products/CMUT/FraunhoferIPMS_CMUT.pdf
- [7] EVALUATION KIT FOR CMUTS, Data Sheet, Fraunhofer IPMS, <https://www.ipms.fraunhofer.de/content/dam/ipms/common/products/SAS/Fraunhofer IPMS - CMUT Evaluation-Kit.pdf>