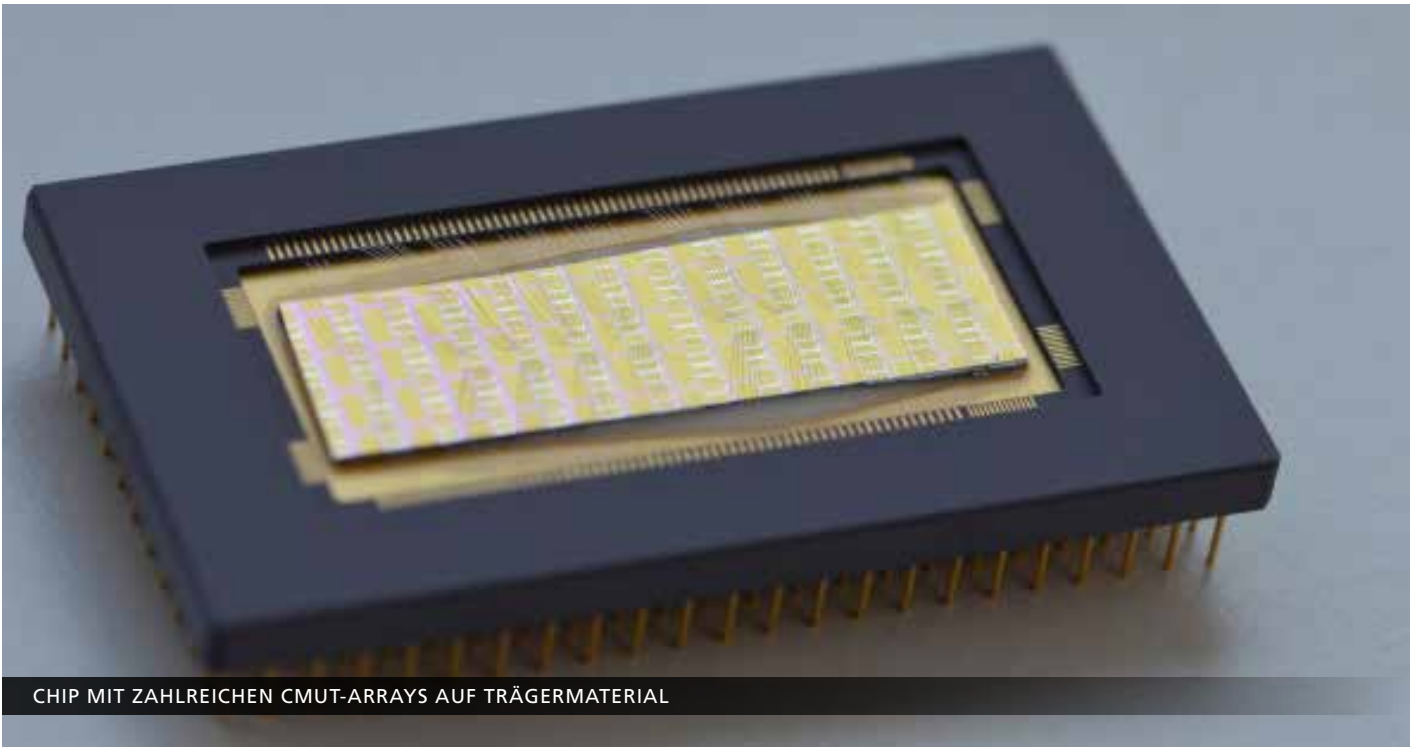


## AKUSTIK MIT MEMS: KAPAZITIVE MIKROMECHANISCHE ULTRASCHALLWANDLER (CMUT) VON DER FORSCHUNG ZUR MARKTFÄHIGKEIT



Kapazitive mikromechanische Ultraschallwandler (Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers, CMUT) sind MEMS-basierte Strukturen, die zur Erzeugung und Erfassung akustischer Signale im Ultraschallbereich eingesetzt werden können. Das Interesse an CMUTs nimmt dank der Qualität der erzeugbaren akustischen Signale und der Möglichkeit zur Integration mit CMOS stetig zu. Außerdem ermöglichen die geometrischen Eigenschaften von CMUTs eine Erweiterung der Ultraschall-Anwendungspalette. Das Fraunhofer IPMS arbeitet daran, CMUTs vom Laborstatus zur Marktfähigkeit zu führen.

Heutzutage sind Ultraschallwandler aus dem Alltag nicht mehr hinwegzudenken: Sie begegnen uns beispielsweise in Form von Füllstands- und Geschwindigkeitssensoren oder bei bildgebenden Verfahren im medizinischen Bereich. Die heutigen Ultraschallwandler werden typischerweise aus piezoelektrischen Materialien hergestellt und haben sich in der Praxis bewährt. Die CMUT-Technologie hat das Potenzial, die Anwendungsfelder für Ultraschall zu erweitern, da sie ohne unerwünschte Materialien (Pb) auskommt und einfach mit CMOS-Schaltungen zu integrieren ist.

CMUTs sind vom Grundaufbau her MEMS-Strukturen, die aus zwei gegenüberliegenden Elektroden bestehen. Eine der Elektroden ist starr, die andere beweglich. Die Elektroden sind durch Isola-

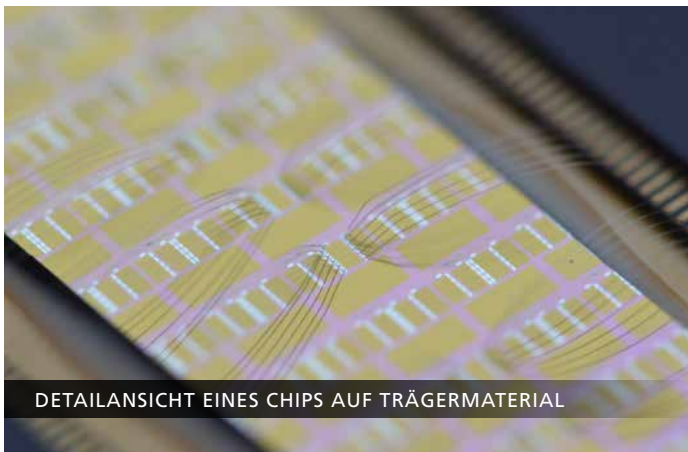
torschichten und einen Luftspalt voneinander elektrisch getrennt. CMUTs können sowohl senden als auch empfangen, indem sie durch Verschiebung der beweglichen Elektrode elektrische in akustische Energie umwandeln oder umgekehrt.

Die Gruppe um Prof. Khuri-Yakub von der Universität Stanford sowie verschiedene andere Forschergruppen haben in den letzten zwei Jahrzehnten die Möglichkeiten der CMUTs beleuchtet und an allen Komponenten geforscht, die für ihren Betrieb erforderlich sind (MEMS, Strahlformung, Treiber, Erfassung, etc.). Trotz aller Versuche, CMUTs kommerziell nutzbar zu machen, gibt es bislang auf dem europäischen und US-amerikanischen Markt kein einziges Produkt, das diese Technologie verwendet. Eine mögliche Erklärung für diesen Umstand sind die strengen Anforderungen für neue Ultraschallanwendungen, etwa bezüglich der Homogenität der Wandlerelemente bei großen Arrays und der Zuverlässigkeit von MEMS. Diese Anforderungen sind in reinen FuE-Reinräumen nur schwer zu erfüllen.

Durch seinen unter Fertigungsbedingungen betriebenen Reinraum hat das Fraunhofer IPMS die Möglichkeit, dieses Problem zu lösen. Hier werden schon Lichtmodulatoren (Spatial Light Modulators, SLM) mit vergleichbaren Homogenitätsanforderungen hergestellt. Zudem verfügt das Fraunhofer IPMS über umfangreiche Erfahrung in der Integration von MEMS auf CMOS-Wafern. Dies ist zum Erfolg der CMUT-Entwicklung sehr wichtig.

# AKUSTIK MIT MEMS: KAPAZITIVE MIKROMECHANISCHE ULTRASCHALLWANDLER (CMUT) VON DER FORSCHUNG ZUR MARKTFÄHIGKEIT

Im vierten Quartal 2012 begann das Fraunhofer IPMS mit der Entwicklung von CMUT-Bauelementen. Seitdem konnten die Ingenieure mehrere Fragestellungen erfolgreich klären. Zunächst fiel die Wahl für die Herstellung der CMUTs auf ein Verfahren zur Ätzung von Opferschichten. Diese Methode wurde dem alternativen Waferbondverfahren vorgezogen, da viele Technologieschritte in den letzten Jahren bereits in SLM-Projekten entwickelt wurden. Parallel dazu wurde ein vollständiger Prozessablauf festgelegt, einschließlich der Materialauswahl und möglichen Schichtdicken.

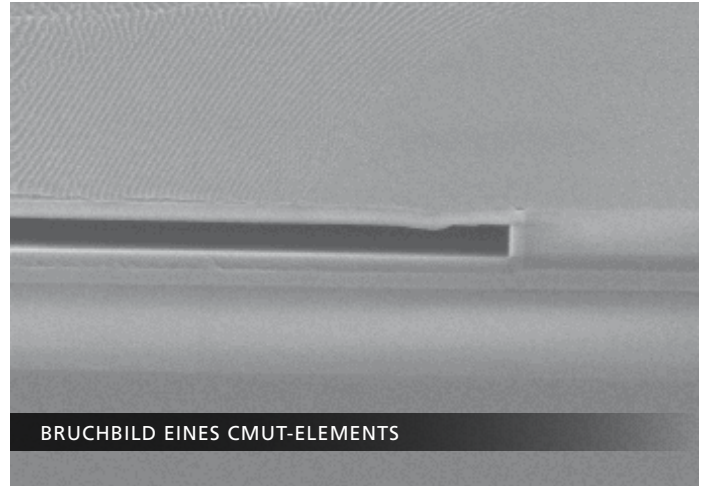


DETAILANSICHT EINES CHIPS AUF TRÄGERMATERIAL

Erste FEM-Modelle der CMUT-Elemente wurden erstellt, um den Flächenbedarf zu ermitteln. Zudem wurden verschiedene CMUT-Entwürfe für Resonanzfrequenzen im Bereich von 1 bis 50 MHz ausgewählt. Die Maße der CMUT-Elemente liegen zwischen 10 und 100  $\mu\text{m}$ . Die Elemente sind in Gruppen aus jeweils mehreren hundert Elementen angeordnet, sodass mehrere hundert CMUTs wie eine einzige Struktur zusammenwirken. Obwohl viele der Fertigungsschritte zuvor schon für SLMs charakterisiert wurden, mussten wichtige Parameter neu ausgelotet werden, z. B. die Ätzzeiten und die Bedingungen bei der Abscheidung. Zusätzlich wurden bei diesem experimentellen Waferdurchlauf die Hohlräume versiegelt und elektrische Kontaktflächen hinzugefügt. Das Ergebnis waren die ersten prüffähigen CMUTs, die im Fraunhofer IPMS gefertigt wurden.

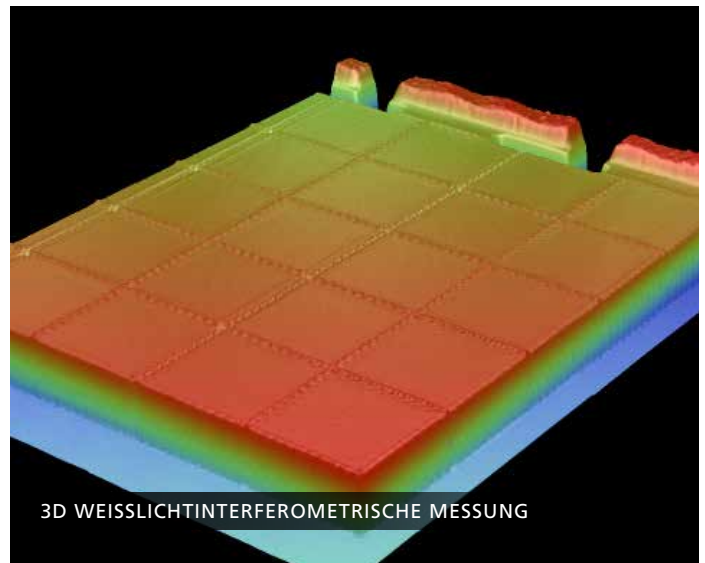
Die erste Generation von CMUT-Arrays des Fraunhofer IPMS wird derzeit analysiert. Neben der optischen Inspektion und der Auswertung von Bruchbildern wurden weißlichtinterferometrische Messungen durchgeführt, um die Homogenität der CMUTs in Abhängigkeit von der Position der CMUT-Gruppe auf dem Wafer zu prüfen. Außerdem werden die CMUTs der ersten Generation derzeit elektrischen Tests unterzogen. Erste Impedanzmessungen ergaben dabei eine Resonanzfrequenz im Bereich 9,1 MHz, wie von der Bauelementesimulation prognostiziert. Bislang sind die Ergebnisse sehr vielversprechend. Die Charakterisierung schreitet

mittlerweile soweit voran, dass bald die ersten akustischen Messungen mithilfe eines Hydrophonsystems durchgeführt werden können.



BRUCHBILD EINES CMUT-ELEMENTS

Neben den Wissenschaftlern des Fraunhofer IPMS wurden CMUT-Experten aus aller Welt herangezogen, die ihre Bereitschaft bekundeten, die Arbeiten am Institut mit ihrem Fachwissen zu unterstützen. Diesen Experten gebührt großer Dank für ihre Unterstützung, die die Projektarbeit bereits ein gutes Stück vorangebracht hat. Aktuell werden die Anforderungen für verschiedene Anwendungsbereiche von der Medizintechnik bis zu zerstörungsfreien Prüfverfahren untersucht. Das Interesse liegt besonders in neuen Anwendungen, bei denen der Einsatz von CMUTs eindeutige Vorteile gegenüber heutigen Ultraschallwandlern bringt.



3D WEISSLICHTINTERFEROMETRISCHE MESSUNG

Das primäre Ziel besteht darin, das Potenzial von CMUTs weiter zu untersuchen und Anwendungen für Kunden zu entwickeln, die aus dieser neuen Technologie Nutzen ziehen könnten.

## ANARTZ UNAMUNO IM INTERVIEW

**Fraunhofer IPMS:** »Das Fraunhofer IPMS erforscht seit 2012 CMUTs. Wie kam es dazu?«

**Anartz Unamuno:** »CMUTs werden nun schon seit über 20 Jahren erforscht, aber wie bei vielen anderen Produkten müssen noch viele Hürden genommen werden, bis die Lücke zwischen dem aktuellen Forschungsstand und den ersten kommerziellen Anwendungen geschlossen ist. Das Fraunhofer IPMS verfügt über die Fertigungsanlagen und das erforderliche Know-how zur Herstellung von CMUTs. Außerdem ist das Geschäftsmodell des Fraunhofer IPMS darauf ausgerichtet, Forschungsergebnisse gemeinsam mit unseren Kunden in deren Produkten umzusetzen und genau das ist bei CMUTs in den nächsten zwei bis drei Jahren geboten. Ich glaube, dass wir uns zur richtigen Zeit der CMUT-Problematik angenommen hat.«

**Fraunhofer IPMS:** »Welche Vorteile bietet die CMOS-Integration von CMUTs?«

**Anartz Unamuno:** »In vielen Ultraschallanwendungen wird mit sogenannten Phased-Arrays gearbeitet, um Funktionen wie Ausrichtung oder Fokussierung der Ultraschallwellen zu erreichen. Dies kann durch die gezielte Steuerung der von den jeweiligen Zellen generierten Schallpulse erreicht werden. Bei prinzipbedingt passiven Arrays gelingt dies im Falle von Sensorzeilen noch mit aufwändiger und kostenintensiver externer Verdrahtung, zweidimensionale Arrays sind im Falle von Piezos nicht möglich. Diese Grenzen können von CMUTs, die auf einem CMOS-Wafer realisiert werden, ohne größere Probleme überwunden werden. Neue Anwendungen z. B. in der zerstörungsfreien Prüftechnik werden so möglich.«

**Fraunhofer IPMS:** »In welchen Alltagsanwendungen könnten CMUTs zukünftig zum Einsatz kommen?«

**Anartz Unamuno:** »CMUTs könnten prinzipiell alle anderen Ultraschallwandler ersetzen, etwa in Anwendungen wie Füllstands- oder Geschwindigkeitssensoren, medizinischen bildgebenden Verfahren, zerstörungsfreien Prüfungen, etc. Doch wie schon erwähnt, ist es nicht das primäre Ziel, piezoelektrische Wandler durch CMUTs zu ersetzen. Vielmehr sollen neue Anwendungsbereiche erschlossen werden. Die Anwendungen, mit denen sich CMUT-Forscher befassen, reichen von medizinischen Ultraschallsystemen in Herzkathetern über Gasflusssensoren in rauen Umgebungen bis hin zu Luftultraschallanwendungen zur Gestenerkennung, die Maus und Tastatur ersetzen könnten.«

*Anartz Unamuno promovierte an der Universität von Strathclyde (Großbritannien) und arbeitete von 2006 bis 2012 an RF-MEMS für Cavendish Kinetics (NL). Seit September 2012 leitet er die Gruppe »Ultraschall-CMUT« am Fraunhofer IPMS.*

**Fraunhofer IPMS:** »Welche wesentlichen Vorteile haben CMUTs gegenüber piezoelektrischen Wandlern?«

**Anartz Unamuno:** »Piezoelektrische Wandler haben im Ultraschallbereich bisher hervorragend ihren Zweck erfüllt und werden ständig weiterentwickelt. CMUTs sollen diese daher auch gar nicht ablösen, sondern eher eine Ergänzung darstellen und neue Anwendungsbereiche für die Ultraschalltechnologie erschließen. Die Hauptvorteile von CMUTs liegen darin, dass sie sich sehr einfach mit CMOS integrieren lassen und mittels mikroelektronischer Fertigungsverfahren mit reproduzierbaren Ergebnissen hergestellt werden können, sowie in höherer Dynamik und erweitertem Frequenzbereich gegenüber Piezos.«

**Fraunhofer IPMS:** »Was ist die größte Herausforderung bei der Arbeit mit CMUTs?«

**Anartz Unamuno:** »Ich glaube, dass die größte Herausforderung darin besteht, potenzielle Kunden davon zu überzeugen, für ihre Zwecke eine neue Technologie, in diesem Fall CMUTs, einzusetzen. Deshalb muss das CMUT-Team des Fraunhofer IPMS ausreichend Leistungs- und Zuverlässigkeitsdaten sammeln, die die Stärke der CMUTs belegen. Letztenendes müssen wir für jeden Kunden eine individuelle Lösung bereitstellen. Ein Produkt am Markt einzuführen, ist immer eine schwierige, aber zugleich auch sehr herausfordernde Aufgabe.«

**Fraunhofer IPMS:** »Was sind die nächsten Schritte?«

**Anartz Unamuno:** »Bis jetzt haben wir die ersten CMUTs im Reinraum des Fraunhofer IPMS gefertigt und eine optische und elektrische Charakterisierung dieser CMUTs vorgenommen. Momentan arbeiten wir an den Vorbereitungen für die akustische Charakterisierung und an den ersten akustischen Leitungsmessungen. In den kommenden Monaten werden wir dann an den integrierten Treiber- und Ausleseschaltungen sowie an der Implementierung der Strahlformungsalgorithmen arbeiten. Wie Sie sehen, hat die Arbeit gerade erst richtig angefangen. Es gibt noch viel zu tun!«