

Multichannel CMUT Evaluation Kit

Uwe Völz, Björn Betz, Sandro G. Koch
Fraunhofer IPMS, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden, Deutschland

Zusammenfassung

Das Fraunhofer IPMS hat ein innovatives Verfahren zur Herstellung von kapazitiven mikromechanischen Ultraschallwandlern (CMUT) entwickelt. Dieser Prozess ermöglicht die Lieferung von Kleinserien und Pilotfertigungen von CMUTs sowie die Entwicklung von kundenspezifischen Sensorgeräten. Zur Erleichterung des Testens und der Verifizierung von CMUTs stellt das Fraunhofer IPMS ein fortschrittliches Mehrkanal-Evaluierungskit bereit.

Das Mehrkanal-Evaluierungskit ist eine kostengünstige Alternative zu teuren Labor-Ultraschallmessgeräten. Es treibt nicht nur CMUTs, sondern auch piezoelektrische Wandler an und ist damit für verschiedene Anwendungen einsetzbar. Das Kit unterstützt Messaufbauten und Demonstrationsgeräte sowohl für Einzelelement-Prüfköpfe als auch für Mehrkanal-Prüfköpfe, einschließlich Darstellungsmethoden mit Phased Arrays.

Das Evaluierungskit hat eine kompakte Bauform und wird von einer vollständig eigenentwickelten Hard- und Software unterstützt. Dadurch sind eine nahtlose Integration und anpassbare Konfigurationen gewährleistet, um spezifische Anforderungen zu erfüllen. Das Kit nutzt die Red Pitaya Hardware-Plattform, die für ihre Kosteneffizienz und Vielseitigkeit bei der Steuerung des analogen Front-Ends bekannt ist. Obwohl der kleine Formfaktor die maximale Ausgangsleistung auf gepulste Sendersignale beschränkt, kann das Kit externe Leistungsverstärker ansteuern. Es kann auch ein externer Bias-Tee für CMUT-Anwendungen mit hoher Leistung verwendet werden.

Keywords: MEMS, CMUT, Evaluierung, Ultraschall, Array

Einführung

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.

Beim Senden wird die flexible Platte durch eine Wechselspannung, die zwischen den Kondensatorplatten eine elektrostatische Kraft erzeugt, ausgelenkt. Durch das Anlegen einer Gleichspannung kann die flexible Platte zusätzlich statisch ausgelenkt und so ein definierter Arbeitspunkt eingestellt werden.

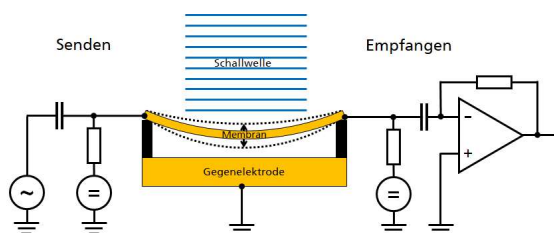


Abb. 1: Funktionsprinzip eines CMUT

Das Mehrkanal-Evaluierungskit (Abb. 2) ermöglicht den Test und die Verifizierung der Funktionalität von CMUTs, die vom Fraunhofer IPMS entwickelt und in Kleinserien gefertigt werden [1][2], für kundenspezifische Anwendungen in einer kontrollierten Umgebung.



Abb. 2: Mehrkanal-CMUT-Evaluierungskit

Das Evaluierungskit ist eine kostengünstige Alternative zu preisintensiven mehrkanaligen Ultraschallgeräten und erlaubt den Betrieb von mehreren Einzelelement-Sensoren ebenso wie von mehrkanaligen Ultraschallsensoren einschließlich bildgebender Ultraschalltechniken mit Phased Arrays. Es kann neben CMUTs auch piezoelektrische mikromechanische Ultraschallwandler (PMUT) sowie konventionelle piezoelektrische Ultraschallsensoren steuern.

Hardware

Die Hardware des Evaluierungskits (Abb. 3) unterteilt sich in einen Steuerrechner und ein Analog-Frontend (AFE). Zur Steuerung des AFE wird eine handelsübliche Red Pitaya Hardwareplattform eingesetzt. Diese basiert auf einem Xilinx System on Chip (SoC) und bietet neben zwei leistungsfähigen ARM-Kernen mit Linux-Betriebssystem, umfangreiche Standardschnittstellen zur Kommunikation mit externer Hardware. Bis zu 4 Analog-Digital-Wandler (ADC) mit 125 MHz Abtastrate und 14 Bit Auflösung ermöglichen Ultraschallanwendungen mit bis zu 25 MHz Bandbreite.

Das Analog-Frontend ist speziell für den Betrieb von CMUTs entwickelt worden und besteht aus einer Empfangs-, einer Sende- und einer Spannungsversorgungsplatine. Die Empfangsplatine kann, ebenso wie die Kombination aus Sende- und Spannungsversorgungsplatine, separat betrieben werden. Die jeweils bis zu 8 Sende- und Empfangskanäle werden getrennt über 16 MCX-Buchsen nach außen geführt.

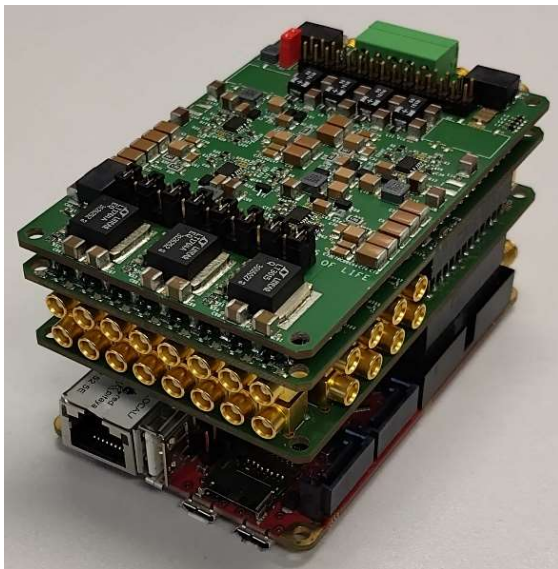


Abb. 3: Aufbau des Evaluierungskits (von unten nach oben: Red Pitaya, Empfangsplatine, Sendeplatine, Spannungsversorgungsplatine)

Die Spannungsversorgungsplatine wird über ein externes Netzteil versorgt und stellt die benötigten Betriebsspannungen von 3,3 V bzw. 5 V für alle Platinen einschließlich des Red Pitaya, sowie ± 15 V, ± 125 V und ± 250 V für die Sendeplatine bereit. Wird nur die Empfangsplatine im Evaluierungskit benötigt, kann diese über das Netzteil des Red Pitaya mitversorgt werden.

Die Sendeplatine enthält bis zu 8 unabhängige arbiträre Signalgeneratoren (AWG) mit 12 Bit Auflösung und 125 MHz Abtastfrequenz. Die

arbiträren Signale werden mit einem Operationsverstärker auf ± 12 V verstärkt. Durch eine optionale Transistorendstufe können Rechteckimpulse mit bis zu ± 100 V erzeugt werden. Die positive und die negative Signalspannung sind dabei separat einstellbar. Die Biasspannung für die CMUTs kann im Bereich von -200 V bis $+200$ V eingestellt werden.

Die Empfangsplatine schaltet die 8 Signaleingänge über einen Multiplexer (MUX) auf wahlweise 2 oder 4 spannungsgesteuerte Verstärker. Die Verstärkung kann im Bereich von 0 bis 60 dB eingestellt werden. Die Verstärkerausgänge sind direkt mit den 2 oder 4 Analogeingängen des Red Pitaya verbunden.

Das Evaluierungskit kann in mehreren Optionen mit unterschiedlichen Kanalvarianten und verschiedenen externen Schnittstellen bereitgestellt werden. Die Spezifikationen der einzelnen Hardwareparameter sind in der nachfolgenden Tabelle (Tab. 1) aufgelistet.

Tab. 1: Spezifikationen des Evaluierungskits

Parameter	Spezifikation
Senden:	
AWG	
unabhängige Kanäle	1 .. 8
Sample je Kanal	1 .. 4 kSample
Auflösung	12 Bit
Abtastfrequenz	1 .. 125 MHz
Verzögerungszeit zwischen Kanälen	≥ 4 ns
Ausgangsspannung	
arbiträre Signale	0 .. ± 12 V _{AC}
Rechteckpulse	0 .. ± 100 V _{AC}
Biasspannung	-200 .. +200 V _{DC}
Lastkapazität	≤ 100 pF
Empfang:	
Eingänge	2 .. 8
Eingangsimpedanz	50 Ω
Eingangsspannung	± 1 V
MUX (optional)	8:2 oder 8:4
Verstärkung	0 .. 60 dB
Bandbreite	0,01 .. 25 MHz
ADC	
Auflösung	14 Bit
Abtastfrequenz	1 .. 125 MHz
Anwendung:	
CMUT, PMUT, PIEZO	

Für leistungsstärkere Sendesignale und zum Treiben größerer Kapazitäten kann eine optionale Zusatzplatine auf die Spannungsversorgungsplatine aufgesteckt werden. Über diese Zusatzplatine sind externe Leistungsverstärker mit eigener Stromversorgung adaptierbar.

Die Phased-Array-Funktionalität wird durch die individuelle Verzögerung der 8 AWG-Signale und durch die Option zum Parallelbetrieb mehrerer Evaluierungskits ermöglicht. Dafür ist ein externer Takteingang vorgesehen, über den mehrere Sendeplatinen taktsynchron getriggert werden können. Damit kann gleichzeitige ein Vielfaches von 8 Kanälen gesteuert werden. Alternativ kann über 6 digitale Ein- und Ausgänge ein externer Multiplexer betrieben werden, so dass Arrays mit einem Vielfachen von 8 Kanälen angeschlossen werden können.

Software

Das Evaluierungskit ist mit einer Basissoftware zur Steuerung der Elektronik ausgestattet und ist über eine einfache browserbasierte Benutzerschnittstelle (BUI) in seinen Grundfunktionen leicht zu bedienen. Es muss dazu nur über eine Netzwerkschnittstelle mit einem beliebigen Steuerrechner verbunden werden. Ein verfügbares Software Development Kit (SDK) für Windows- und Linux-Systeme stellt die notwendigen Funktionen zur Steuerung der Hardware und zur Aufzeichnung von Messdaten bereit.

Dies erlaubt die Programmierung komplexer kundenspezifischer Anwendungssoftware zur Aufzeichnung, Auswertung und Visualisierung der vom Evaluierungskit gelieferten Ultraschall-daten

Verfügbare Sensoren

Am Fraunhofer IPMS sind verschiedene Sensorvarianten verfügbar, die mit dem Mehrkanal-Evaluierungskit betrieben werden können. Dazu gehören Einzelement-Sensoren (Abb. 4) ebenso wie verschiedene Array-typen (Abb. 5 und 6) [3] [4]. Kundenspezifische Designs sind auf Anfrage realisierbar.

Das Evaluierungskit wird mit allen benötigten Komponenten für die Inbetriebnahme der CMUT-Sensoren geliefert. Es wird nur ein Steuerrechner mit einem beliebigen Betriebssystem und einer geeigneten Browsersoftware benötigt, der über eine Ethernet- oder eine optionale WIFI-Schnittstelle verbunden ist.



Abb. 4: Einzelement-Sensor (1 Kanal)



Abb. 5: Annular Array (≤ 8 Kanäle)

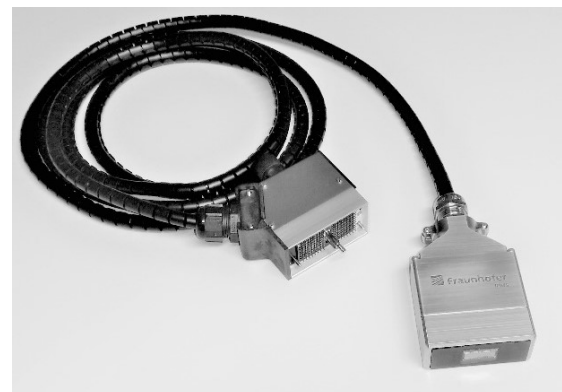


Abb. 6: Linear Array (≤ 64 Kanäle)

Danksagung

Die hier dargestellten Inhalte sind das Ergebnis verschiedener Forschungsvorhaben.

- Teile der Arbeit wurden aus Mitteln des ECSEL Projekts „Advanced Distributed Pilot Line for More-than-Moore Technologies“ (Fördernummer 661796) finanziert.
- Teile der Arbeit sind im Projekt „Leistungszentrum Funktionsintegration für die Mikro-/Nanoelektronik“ entstanden. Diese Maßnahme wurde von der Sächsischen Staatsregierung aus den vom Sächsischen Landtag genehmigten Haushalt kofinanziert.
- Teile der Arbeit wurden gefördert im Rahmen der Internen Programme der Fraunhofer-Gesellschaft, Fördernummer MAVO 836940, KMU akut 840091 und SME 40-04875.

Literaturnachweis

- [1] S. G. Koch, N. Lange, M. Kircher, M. Krenkel, M. Grafe, D. Rudloff, J. Amelung „Kapazitive mikromechanische Ultraschallwandler (CMUT) für die zerstörungsfreie Prüfung und Überwachung“, MikroSystemTechnik Kongress München, 2017, S. 735–738
- [2] S. G. Koch, U. Völz, Uwe, N. Lange, S. Köble, F. Schubert, C. Richter, et al. “Empowering Robots for Multimodal Tactile Gripping using Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers”, Smart Systems Integration (SSI), Grenoble, France, 2021, S. 1–5
DOI: 10.1109/SSI52265.2021.9467023
- [3] M. Krenkel, S. G. Koch, S. Reitz, P. Scharf, D. Ernst, M. Wolf “Miniaturized annular arrays for focused ultrasound”, MikroSystemTechnik Kongress, Stuttgart-Ludwigsburg, 2021, S. 270–273
- [4] U. Völz, M. Kircher, S. G. Koch, M. Krenkel “Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers for Applications in Nondestructive Testing”, MikroSystemTechnik Kongress, Stuttgart-Ludwigsburg, 2021, S. 676–679