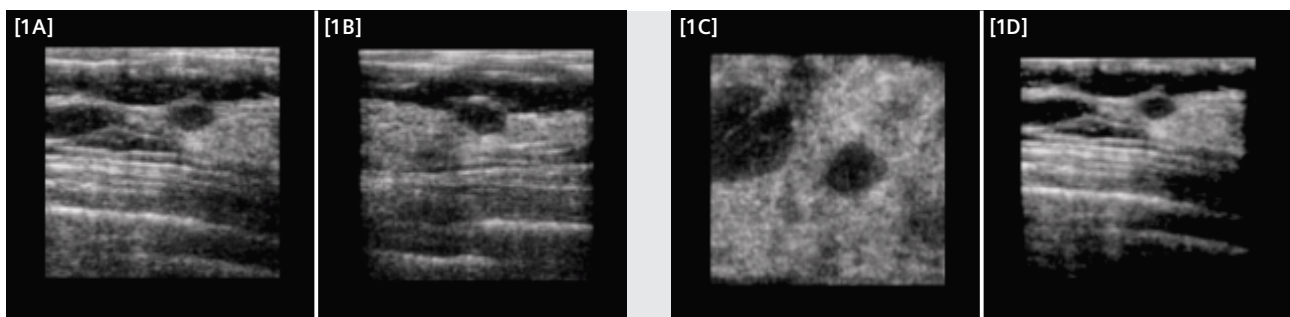


Zukunftstechnologie Silicon-Ultraschall

Der diagnostische Ultraschall befindet sich in der Übergangsphase von der 2D- zur 3D-Bildgebung. Die Grenzen der Technologie der piezo-elektrischen Keramikschalköpfe sind erreicht. Um den technischen Herausforderungen der volumetrischen Echtzeitbildgebung zu entsprechen und die Leistungsfähigkeit zu erhöhen, ist eine fortschrittliche Technologie erforderlich.

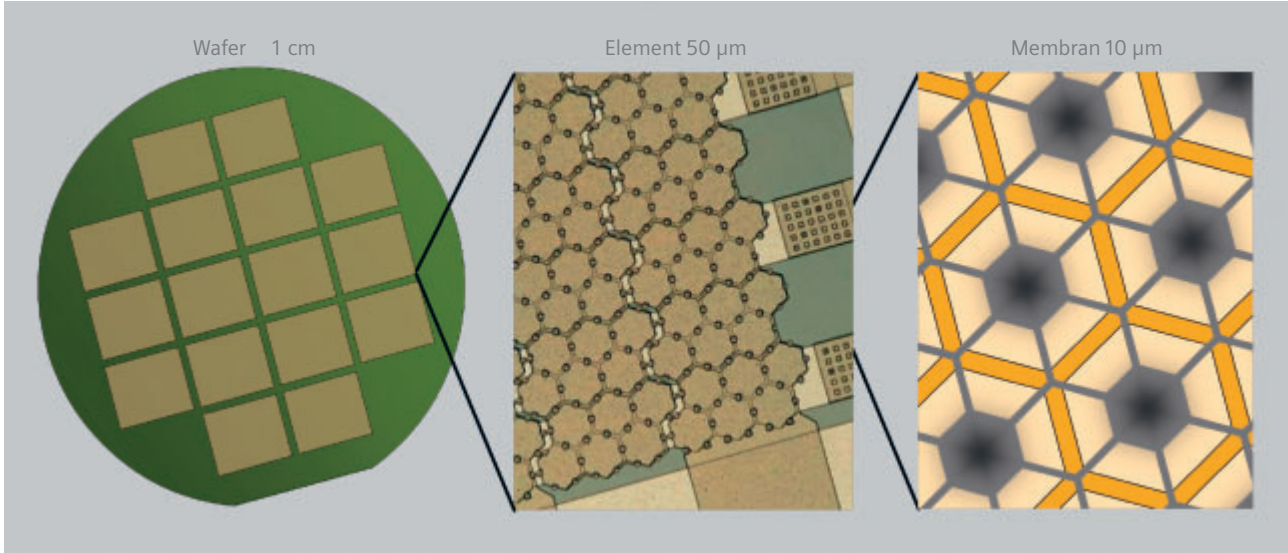
Von Paul Wagner, Siemens Medical Solutions, Geschäftsgebiet Ultrasound Division, Innovationsteam



[1] HOCHFREQUENTE VOLUMETRISCHE AKQUISITION eines Fibroadenoms in der Brust unter Verwendung eines Ultraschall-2D-Schalkopfs mit 50.000 individuell ansteuerbaren Elementen. Gut sichtbar ist die nahezu isotrope Auflösung entlang jeder Bildgebungsachse. In der obigen Abbildung sind 2D-Schichten vom Volumen in folgenden Ausrichtungen gezeigt: [1A] Scheitelwinkel, [1B] Elevation und [1C] koronal. Eine Maximum-Intensitäts-Projektion [1D] ist ebenfalls dargestellt.

Unter den Bildgebungsmodalitäten ist Ultraschall sicherlich eine der am stärksten vom Anwender abhängigen Technologien. Der Trend zu volumetrischen Echtzeit-Akquisitionstechniken erfordert jedoch immer mehr automatisierte Akquisitionsverfahren. Das kann sich positiv auf den klinischen Arbeitsablauf auswirken, zu einem höheren Patientendurchsatz führen und auch Offline-Bildanalysen deutlich verbessern. Eines der Hauptprobleme der 3D-Bildgebung, insbesondere

bei höheren Frequenzen, ist aber die Zahl technischer Elemente, die zum Bau eines Schalkopfs mit ausreichender Abtastung erforderlich sind. Ein 2D-Schalkopf benötigt N^2 akustische Elemente, um die Bildqualität eines 1D-Schalkopfs mit N Elementen zu erreichen. Der Bau eines stark fokussierten Ultraschallstrahls in drei Dimensionen macht es erforderlich, dass jedes dieser Elemente individuell abgestimmte Verzögerungen aufweist. Bei traditionellen



[2] LITHOGRAPHISCHE KONSTRUKTION eines Silicon-Ultraschallgeräts. Multiple 2D-Schallwandlerblenden sind in 50 g-Tiles auf einem Wafer angeordnet. Eine Blende besteht aus tausenden akustischen Elementen. Jedes ist von einem Block dicht gepackter Membranen bedeckt.

Technologien, wie zum Beispiel strukturierten piezo-elektrischen Keramikschallköpfen (PZT) und flexiblen Schaltkreisen, stößt man daher für Schallköpfe mit mehr als 2.000 Elementen rasch an die Grenzen des Machbaren. Silicon-Ultrasound ist eine neue Schallkopftechnologie, die sich durch freies und flexibles Design auszeichnet. Mit dieser innovativen Technologie sind heute bereits isotrope volumetrische Akquisitionen bei hohen Frequenzen möglich [Abb. 1].

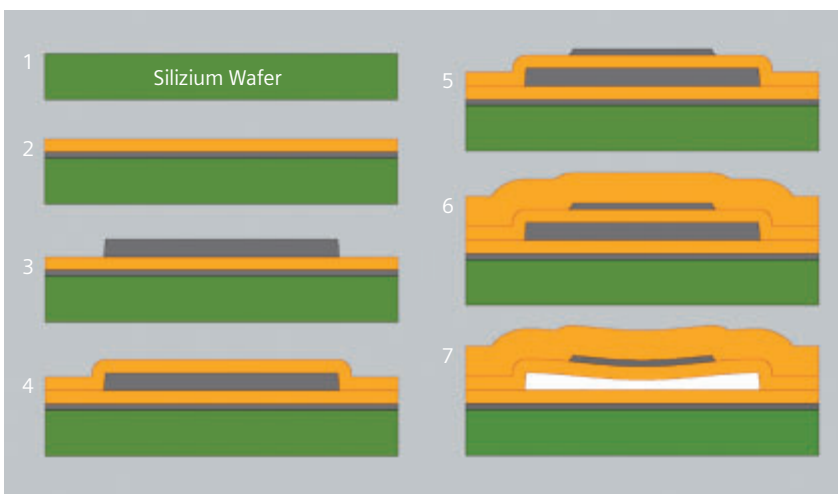
Silicon-Technologie

Bei der Silicon-Ultraschalltechnologie werden durch MEMS-Verarbeitungstechniken (Micromachined ElectroMechanical Structure) winzige Schwingungsmembranen auf die Oberfläche von Silizium-Wafern aufgebracht. Diese Membranen, auch als kapazitive mikrobearbeitete Ultraschallwandler bezeichnet, sind im Prinzip mikroskopische Sonden oder Schalter zum Energietransfer zwischen elektrischen und mechanischen Feldern über einen breiten Frequenzbereich. Ihre lateralen Dimensionen werden lithographisch über eine breite Fläche bis hinunter zur Submikrometerauflösung unter Verwendung von regulären Halbleiterfertigungsmethoden definiert, so dass

Millionen von Membranen simultan auf dem gleichen Wafer erzeugt werden können [Abb. 2]. Die MEMS-eigene lithographische Flexibilität ermöglicht die Herstellung akustischer Blenden mit zehntausenden und selbst hunderttausenden einzelnen Elementen – ein wichtiger Vorteil dieser Technologie, da beim Ultraschall die Bildqualität mit der Anzahl der Elemente direkt zusammenhängt. Individuelle Ultraschallmembranen bestehen aus Schichten isolierender und leitender Filme, die über versiegelte Vakuumräume gespannt sind [Abb. 3]. Bei der Herstellung von Ultraschallelementen treten keine Temperaturen über 400° C auf, so dass die Membranen direkt auf vorhandenen integrierten Schaltkreisen erzeugt werden können. Dies vereinfacht das Verbinden von tausenden akustischen Elementen zu Schaltkreiskomponenten wie Vorverstärkern oder A/D-Wandlern.

Isotrope 3D-Bildgebung mit moderaten Bildraten

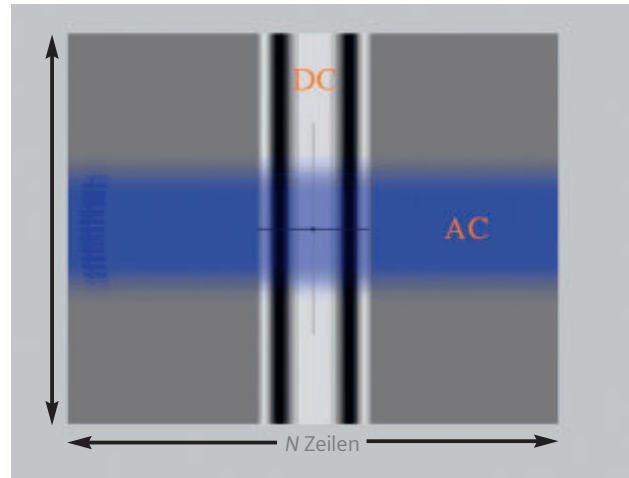
Bei Ultraschallmembranen sind für den akustischen Betrieb sowohl AC- als auch DC-Spannungen erforderlich. Bei der MEMS-Technologie hat dies signifikante Auswirkungen auf



[3] VERTIKALE TOPOLOGIE einer Membran: Ausgehend von einem Silizium-Wafer (1) wird eine isolierte Metallschicht entwickelt, die die untere Elektrode bildet (2). Mithilfe eines strukturierten und isolierten Blocks wird der Membranraum definiert (3, 4), und eine obere Elektrode (5) wird deponiert. Anschließend wird (6) eine strukturell steife Membran entwickelt, in die kleine Löcher zur Freilegung des Blocks für das chemische Ätzmittel gebohrt werden. Nach Auflösen des Blocks und Versiegeln der Löcher liegt eine suspendierte Membran vor (7).

das Design von 2D-Schallköpfen. Die lineare Abhängigkeit der Charakteristik einer Membran vom Bias kann zum Bau eines Schallkopfes mit zehntausenden individuell ansteuerbaren Elementen ausgenutzt werden, wobei zur Verbindung nach außen lediglich wenige hundert physische Verbindungselemente erforderlich sind. Diese Verringerung der Anzahl erforderlicher Kabel ist dadurch möglich, dass die Elemente in einer Ultraschallmatrix durch überlappende Zeilen einzeln von den Kanten der Blende aktiviert werden können. Beim Ultraschall wird eine indizierbare Schallkopfblende [Abb. 4] durch Strukturierung der unteren und oberen Elektroden des Geräts zu N - und M -Streifen ermöglicht, die an ihren Schnittpunkten $N \cdot M$ physikalische Akustik-elemente definieren. Die N unteren Elektrodenstreifen in scheinwinkeliger Richtung werden koaxial mit den AC-Kanälen im Ultraschallsystem verbunden und die M oberen Elektrodenstreifen in Elevation mit bipolaren DC-Bias-Generatoren verspannt.

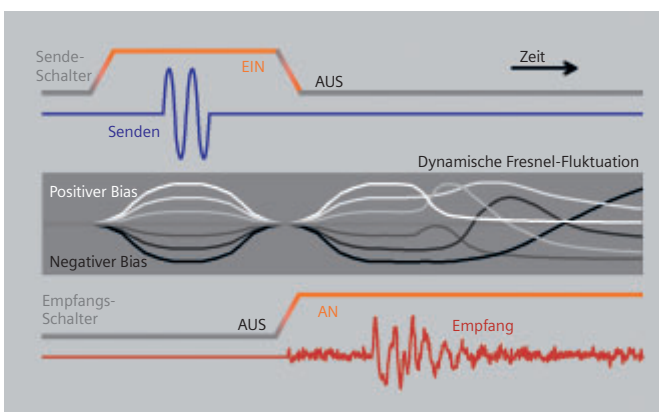
Im Scheitelwinkel erhält das Ultraschallsystem standardmäßige eindimensionale Zeitverzögerungsprofile. Dies führt bei Empfang zu statischer Sendefokussierung und dynamischer Bereichsfokussierung. Die akustische Energie wird dabei in scheinwinkeliger Richtung ausreichend lokalisiert. Strahlformung in Elevation wird durch Anwendung apodisierter Fresnel-Bias-Muster erreicht, die auf Fokussierung akustischer Energie in einer bestimmten Tiefe und auf einer bestimmten Frequenz ausgelegt sind. Die Fresnel-Muster werden durch sorgfältigen Wechsel zwischen regulären Elementen und Elementen mit invertierter Ausgabe auf Basis der Elevationsposition erstellt. Die 180-Grad-Phasenverschiebung zwischen invertierten und nichtinvertierten Regionen in Kombination mit der Wellenlänge des Schalls im Gewebe bei der Anregungsfrequenz legen die Platzierung dieser Abschnitte fest. Dadurch konvergieren Kurvenformen von allen Regionen in Elevation und in Phase am Fokus, sobald bestimmte Regionen mit nichtvermeidbarem Phasenfehler durch Apodisierung unterdrückt wurden. Fresnel-Muster sind zwar nominal DC, dürfen jedoch zeitlich bei Frequenzen fluktuieren, die weit



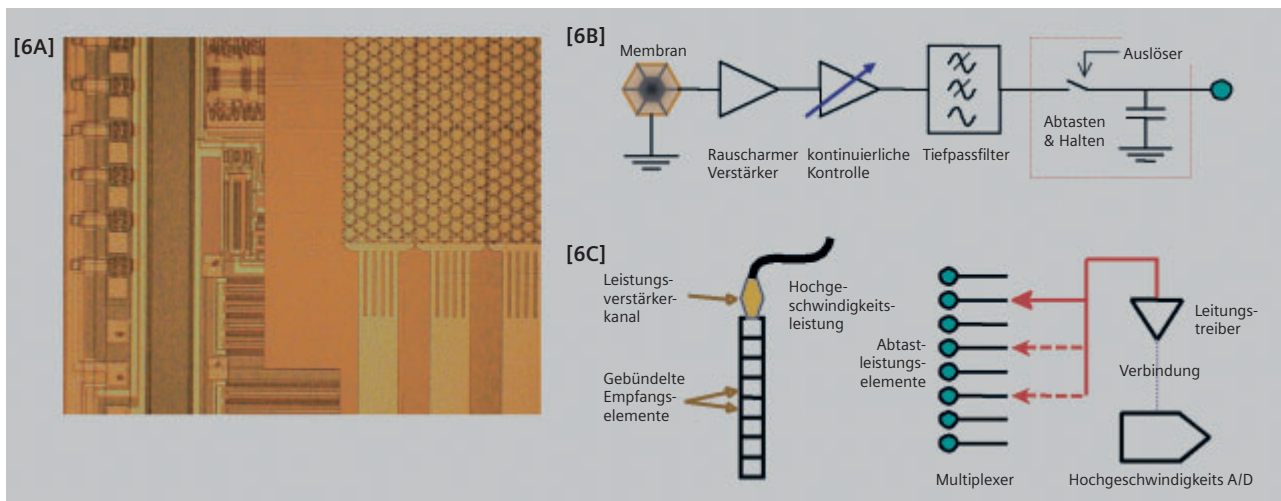
[4] INDIZIERBARE 2D-Silizium-Ultraschallblende mit horizontalen AC-Zeilen und vertikalen DC-Zeilen, angeordnet in einem Fresnel-Muster. Die akustische Aktivität spielt sich in den Schnittpunkten zwischen den AC- und DC-Abschnitten ab.

genug vom Durchlassband des Schallkopfes entfernt sind. Wird zum Beispiel eine 90-Grad-Phasendrehung in die Fresnel-Blende zwischen Senden und Empfangen eingeschoben, werden die Seitenkeulen unterdrückt. Ähnlich verbessert sich die Feldtiefe, wenn während der akustischen Rezeption Null-Übergänge in der Bias-Kurvenform dynamisch verschoben werden.

Ein typisches Timing-Diagramm zu einem einzelnen Impuls eines indizierbaren Silizium-Ultraschallwandlers ist in Abbildung 5 gezeigt. Mit Hilfe elektronischer T/R-Schalter wird ein rauscharmer Verstärker nach dem Sendevorgang in den Signalweg eingesetzt, der auch als unterstützender Treiber für die Fremdkapazität des Koaxialkabels wirkt. Nach Akquisition eines kompletten Bereichsdatensatzes springen das Zeitverzögerungsprofil und die Fresnel-Muster zum nächsten Punkt in der X-Y-Ebene, und ein neuer Sendepuls wird



[5] ZEITDIAGRAMM für ein Senden-/Empfangen-Ereignis in einem 2D-Silizium-Ultraschallwandler. Der Prozess beginnt, wenn ein Hochspannungsschalter schenkelwinkliger Elemente mit dem System-AC-Sender verbindet, während durch den DC-Bias eine Fresnel-Blende in Elevation etabliert wird. Kurz darauf wird ein Sendepuls an die schenkelwinkliger Elemente abgegeben, der Empfangsverstärker wird aktiviert, die Sende-Fresnel-Blende wird aufgelöst, und eine Wanderung zu einer dynamischen Fresnel-Empfangsblende in Elevation findet statt.



[6] MEMBRANEN, ENTWICKELT auf integrierter Elektronik [6A], Schema eines Signalkonditionierungsschaltkreises [6B] und Multiplexschema im Zeitverlauf [6C].

abgegeben. So verläuft der Scan über die gesamte Blende hinweg, bis das gesamte, sich aus der Schallkopfkontakfläche ergebende Volumen abgetastet worden ist.

Indizierbare Silizium-Ultraschallblenden sind für die volumetrische Bildgebung sehr praktisch, da sie eine hochauflösende 2D-Strahlformung ermöglichen und dabei nicht mehr AC-Verbindungen als ein 1D-Ultraschallkopf benötigen. Das Scannen eines kompletten Volumens ist durch die relativ niedrige Schallgeschwindigkeit im Gewebe trotzdem ein sehr zeitaufwändiger Vorgang. Eine typische Volumenakquisition dauert bei diesen Schallköpfen eine bis vier Sekunden.

Volumetrische Echtzeitbildgebung mit monolithisch integrierten Ultraschallarrays

Eine hochentwickelte Ultraschallarchitektur mit vollgetasteter Empfangsblende könnte die Bildraten ohne negative Auswirkungen auf die Bildqualität signifikant erhöhen. Stellt man Membranen direkt auf einem Siliziumsubstrat mit integrierter Elektronik [Abb. 6A] her, um das enorme Volumen an akustischen Daten effizient zu komprimieren, gehen keine akustischen Informationen verloren, da Teilstrahlformung im Griff und mangelhafte Abtastung der Empfangselemente vermieden werden.

Ein monolithisch integriertes 2D-Empfangs-Tile wird durch Deposition von Membranen bei niedriger Temperatur auf einem anwendungsspezifisch konstruierten Schaltkreis (ASIC) mit Signalkonditionierung und analoger Datenmultiplexschaltung hergestellt, der aus einem bipolar-komplementären Metalloxidhalbleiter (BiCMOS) aus Silizium-Germanium (SiGe) besteht. Direkte elektrische Verbindungen von den tausenden

akustischen Elementen zur zu Grunde liegenden Elektronik werden lithographisch erzeugt und zum Minimieren von Störeffekten so kurz wie möglich gehalten.

Die vom Silizium-Ultraschallempfänger eingehenden Signale werden zuerst zum ASIC geleitet und durch einen High-Input-Impedanzverstärker gepuffert. Dann durchlaufen die Signale eine zeitveränderliche Verstärkungskontrollstufe, die teilweise die tiefenabhängige Gewebedämpfung kompensiert, und gehen anschließend durch einen Anti-Aliasing-Filter. Eine zeitgesteuerte Abtast-Halteschaltung erfasst alle 50 Nanosekunden eine Momentaufnahme der gerade vorliegenden Analogspannung jedes Signals und speichert die Information im Kondensator.

Der nächste Schritt in der Verarbeitung der erhaltenen Signale ist in Abbildung 6C gezeigt. Von einer Säule akustischer Elemente abgegebene analoge Abtastdaten werden gesammelt und bei 300 bis 400 MHz durch einen Ausgangstreiber hoher Bandbreite auf eine gemeinsame Zeile gebündelt. Diese Zeilen werden durch einen impedanzabgestimmten Flexschaltkreis vom Chip abgeleitet und in eine Bank von 12-Bit-Analog-Digital-Wandlern eingespeist. Schließlich werden die digitalen Abtastdaten reduziert und mit fünf Gigabit pro Sekunde über einige hundert faseroptische Kabel zurück zum Ultraschallsystem geleitet. Voraussetzung für die Verarbeitung solch umfangreicher digitaler Daten ist eine neue Generation schnellerer und leistungsfähigerer Ultraschallsysteme.

Dank neuester Fortschritte bei der modernen digitalen Signalverarbeitungstechnologie (DSP) wird dies bald möglich sein. Die auf Ultraschall basierende 3D-Bildgebung wird den Ultraschall in Zukunft noch leistungsfähiger machen.