

Mikromechanisch gefertigte akustische Wandler-Arrays

Holger Daßler, Wolfgang Manthey, Lutz Thieme

Technische Universität Chemnitz

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

1 Einleitung

Aufbauend auf bereits vorgestellten PVDF-Foliewandlern für gasförmige Medien [1] werden am Lehrstuhl „Meß- und Sensortechnik“ der TU Chemnitz Untersuchungen zu Ultraschallwandler-Arrays zur richtscharfen Schalleinkopplung in flüssige Medien durchgeführt. Einsatzgebiete für eine gerichtete elektronisch steuerbare Schallabstrahlung sind beispielsweise die Durchflußmessung [2, 3], die Objektidentifikation oder die zerstörungsfreie Materialprüfung. Mikromechanische Technologien zur Herstellung der Sensorarrays erlauben aufgrund einer ausgereiften Silizium-Bearbeitung eine effektive Fertigung von Einzelelementen mit erforderlichen Strukturbreiten von weniger als 100 μm , bei ausgezeichneter Reproduzierbarkeit. Durch neuartige Ätzmethode sind kleinste Strukturierungen sowie mechanische und elektrische Entkopplung der Einzelelemente möglich.

2 Ultraschallwandler-Arrays für flüssige Medien

Als aktives Wandlermaterial dient ein Piezopolymer (Polyvinylidenfluorid, PVDF) auf einer Trägerstruktur aus Silizium. Für die vorgestellten Schallwandler, deren Aufbau in Bild 1 skizziert ist, wird die Dicken- bzw. Dickenscherschwingung der Piezopolymerfolie ausgenutzt. Durch Anlegen einer Spannung zwischen den ausgewählten Wandler Elektroden und einer durchgehenden Masseelektrode auf der Oberseite der PVDF-Folie bildet sich im Polymerfilm ein elektrisches Feld aus. Durch den inversen piezoelektrischen Effekt ändern sich die Abmessungen der Folie. Die gewünschte Schallabstrahlung resultiert aus der Dickenänderung der Einzelelemente. Für diese Dickenschwingung liegen die Mittenfrequenzen der realisierten Wandler zwischen 6 und 11 MHz [4].

Bei den auftretenden Frequenzen ergeben sich aus dem für die Funktion erforderlichen Abstrahlverhalten Strukturbreiten der Einzelelementelektroden von weniger als 100 μm . Die Fertigung der mikromechanischen Silizium-Trägerstrukturen erfolgt im Zentrum für Mikrotechnologie (ZfM) der TU Chemnitz. Bisher gefertigte Siliziumchips tragen eine SiO_2 -Schicht zur Isolation der darauf gesputterten 1 μm dicken Aluminiumelektroden vom Substrat (Bild 1). Die Kontaktierung der Elektroden erfolgt durch Ultraschallbonden. Von den bisher realisierten 24

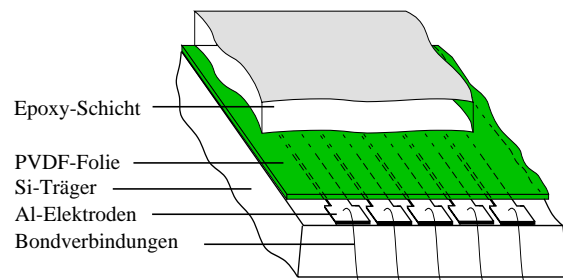


Bild 1: Ultraschallwandler-Array auf Siliziumträgermaterial

Elementen auf einem Chip werden durch die verwendete Elektronik vorerst nur 8 Elemente angesteuert.

Zum Aufbringen der piezoelektrischen Polymerfolie scheidet man Klebstoffe aus, da die Folie chemisch beständig ist und die Wirkung von Klebstoffen im Anlösen der Oberflächen besteht. Eine solche Veränderung der Sensorfolie wäre auch unerwünscht. Benutzt werden deshalb Kontaktmittel, deren Wirkung auf Adhäsion beruht. Dazu ist eine ausreichende Benetzung der beiden zu verbindenden Oberflächen nötig, die unter anderem von den molekularen Anziehungskräften der verwendeten Stoffe abhängt [5]. Aufgrund der Ähnlichkeit des Molekulaufbaus zu PVDF wurden bevorzugt Polymerverbindungen untersucht, wie z. B. Polyvinylalkohol, Polyvinylacetat, Polyisobutylen und eine Reihe weiterer Verbindungen, mit Lösungsmitteln wie z. B. Wasser, Ethanol, Benzin, Nitroverdünnung, Chloroform oder Toluol.

Zu einem blasenfreien Aufbringen der Folie wurden Versuche im Vakuum und mit elektrostatischer Anziehung untersucht. Das Aufbringen der 9 - 40 μm dicken PVDF-Folie auf die Siliziumstruktur erfolgt zur Zeit noch manuell und bedingt geringe Differenzen im Aufbau der Arrays, da u. a. eine gleichmäßige Dicke der Kontaktmittelschicht nicht garantiert werden kann. Nach dem Aufbringen der Folie wird deren goldbeschichtete Oberseite mittels Bonddraht und Silberleitkleber als Masseelektrode kontaktiert. Den letzten Schritt bildet der Verguß der gesamten Sensoranordnung mit Epoxydharz, um eine hinreichende mechanische und chemische Stabilität des Aufbaus zu erreichen.

3 Elektronisch steuerbare gerichtete Schallabstrahlung

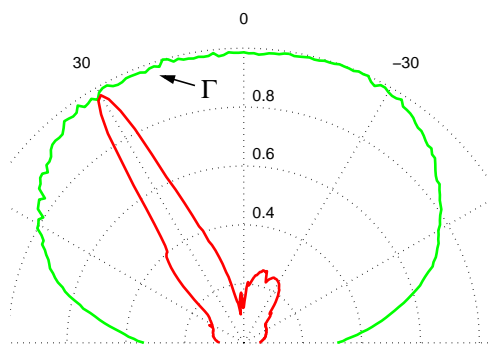


Bild 2: Überlagerung der Abstrahlcharakteristik von Element und Gruppe

Zum gerichteten Abstrahlen des Schalls wird das Prinzip der zeitverschobenen elektronischen Ansteuerung benutzt. Es erfolgt eine konstruktive Überlagerung des Schalldrucks der Einzelelemente in der gewünschten Richtung [6]. Dazu sind identische Signalformen der einzelnen Elemente notwendig, um eine optimale Überlagerung zu erreichen. Nach diesem Verfahren kann die Schallabstrahlung sowohl geschwenkt, als auch fokussiert werden. Das Abstrahlverhalten des Mehrelementwandlers durch die elektronische Ansteuerung wird von den konstruktiven

Abmessungen des Einzelelements und der Wandlergruppe beeinflusst. Die Abstrahlcharakteristik von Element (Γ) und Wandlergruppe überlagern sich, die Gesamtabstrahlcharakteristik des Wandlerarrays wird von Γ eingehüllt (Bild 2). Um den Schall in alle Richtungen mit gleicher Amplitude abstrahlen zu können, ergibt sich der Anspruch an eine möglichst kugelförmige Form von Γ . Um eine hohe „Richtschärfe“ erreichen zu können, ist das Abstrahlverhalten der Wandlergruppe dagegen schmal zu wählen.

Der Öffnungswinkel (-6 dB) der Abstrahlcharakteristik eines Schallstrahlers wird vom Verhält-

nis der Schallwellenlänge im Ausbreitungsmedium zu den Abmessungen des Schallwandlers bestimmt. Sind diese Abmessungen klein gegenüber der Wellenlänge so ergibt sich ein nahezu kugelförmiges Abstrahlverhalten des Wandlers. Eine zunehmende Wandlerapertur führt zu einer Verringerung des Öffnungswinkels.

4 Simulation

Zur Beschreibung und Optimierung der Ultraschallwandler ist die Simulation des mechanischen, elektrischen und akustischen Verhaltens der Strukturen unerlässlich. Problematisch gestaltet es sich, die Modelle für den gegebenen Frequenzbereich mit exakten Eingangsparametern (wie Elastizität, Dämpfung usw.) zu versehen. Wesentliche Charakterisierungsparameter der Ultraschallwandler-Arrays sind Schallabstrahlcharakteristik, elektrisches Verhalten (Kapazitätsverteilung, Übersprechen usw.) sowie die Deformation der Wandler. Vereinfachte Untersuchungen zum Schallfeld bzw. der Richtcharakteristik mittels Punktquellensynthese werden mit *MATLAB*TM realisiert. Zur Lösung der gekoppelten Feldprobleme nach der direkten Methode (Matrix-Kopplung) wird die Finite-Elemente-Methode(FEM)-Software *ANSYS*TM verwendet, bei der auch die Einflüsse mechanischer Parameter des Wandler-Arrays, des umgebenden Fluids sowie der piezoelektrischen Folie berücksichtigt werden.

Die vollständige Simulation der Ultraschallwandler-Arrays im angegebenen Frequenzbereich stellt einen enormen numerischen Aufwand dar. Speziell auf diese Problemstellung zugeschnittene Werkzeuge existieren nur in Ansätzen. Werkzeuge wie *ANSYS*TM führen aufgrund ihres universellen Modellansatzes zu Modellgrößen, die kaum mehr effizient zu bearbeiten sind [7]. Durch diese Einschränkungen ist es vorerst nur möglich, ein vereinfachtes Modell der mikromechanischen Wandlerstruktur zu simulieren (Bild 3).

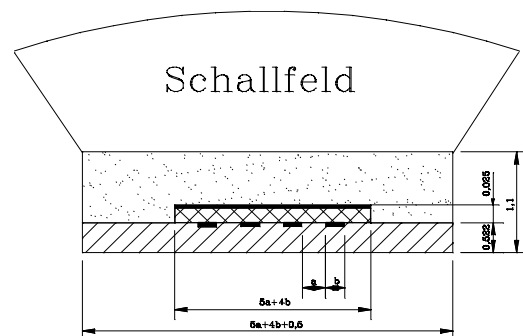


Bild 3: Vereinfachtes Modell eines Ultraschallwandlers für flüssige Medien

Trotzdem kann mit diesem Modell das Wandler-Array qualitativ gut nachgebildet und analysiert werden [8]. Das verwendete Modell simuliert die transiente piezoelektrische Erregung und die daraus resultierende Deformation des Ultraschall-Arrays sowie die Druckverteilung direkt über der Array-Oberfläche. Mittels einer direkt in *ANSYS*TM implementierten Punktquellensynthese wird daraus die Richtcharakteristik bestimmt.

5 Ergebnisse

Die mit dem beschriebenen Aufbau realisierten Wandler-Arrays ermöglichen eine gerichtete Schallabstrahlung. Durch die mikromechanische Fertigung des Trägers ergeben sich ausgezeichnet reproduzierbare Einzelelemente, die zu einer sehr guten konstruktiven Überlagerung der einzelnen Ultraschallsignale führen. Bild 4 zeigt das gemessene Signal eines Einzelele-

ments des Wandlerarrays. In Bild 5 ist die exakte Überlagerung von acht Einzelsignalen in der Abstrahlrichtung 45° dargestellt. Dabei ist zu erkennen, daß die Mittenfrequenz des Signals mit zunehmendem Schwenkwinkel abnimmt. Dies ergibt sich aus der Überlagerung der Einzelab-

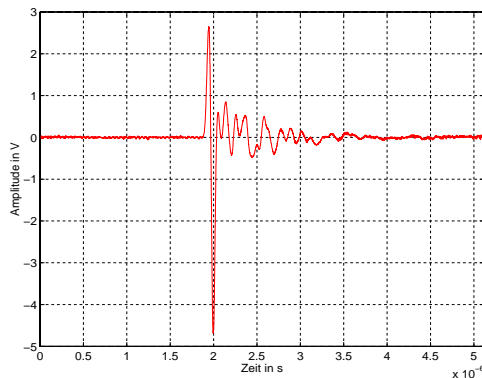


Bild 4: Zeitsignal eines Einzelements des Wandlerarrays in Richtung 0°

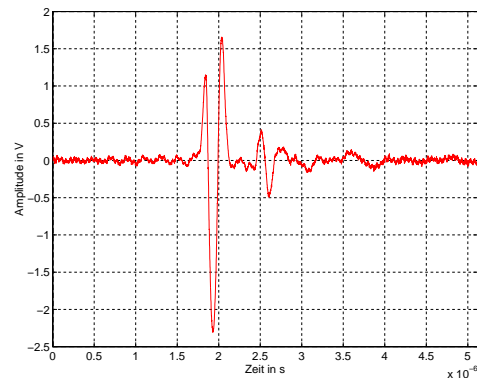


Bild 5: Überlagerung von 8 Einzelsignalen in Richtung 45°

strahlcharakteristiken des breitbandigen Frequenzgemisches.

Am Beispiel der realisierten 8-Element-Ultraschallwandler-Arrays ist die elektronisch steuerbare Schallabstrahlung dargestellt (Bild 6 und Bild 7). Der nutzbare Schwenkbereich wird folgendermaßen beschränkt:

- Durch die Spezifikation der Elektronik entsteht eine untere Schranke für den Schwenkwinkel: Nach dem für die elektronische Ansteuerung genutzten Prinzip nimmt die elektronischen Zeitverzögerung t_{el} zwischen den Einzelsignalen mit kleineren Schwenkwinkeln ab. Durch die kürzeste schaltbare Zeitverzögerung ergibt sich je nach Geometrie des Wandlers ein minimaler Grenzwinkel.
- Aus einem nicht hinreichenden Öffnungswinkel der Abstrahlcharakteristik des einzelnen Elements resultiert ein Amplitudenabfall bei zunehmendem Schwenkwinkel (s. Abschnitt 3). Durch den notwendigen Signal-Rausch-Abstand für eine betrachtete Applikation ergibt sich eine maximaler Grenzwinkel.

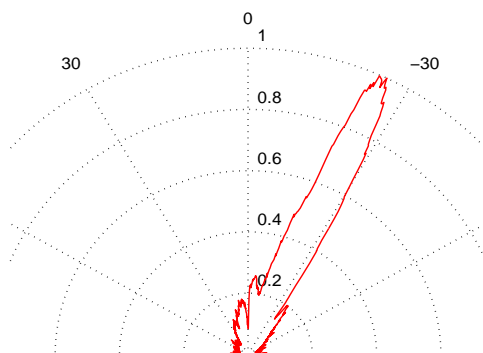


Bild 6: Schwenken der Abstrahlrichtung eines 8-Element-Arrays nach 25°

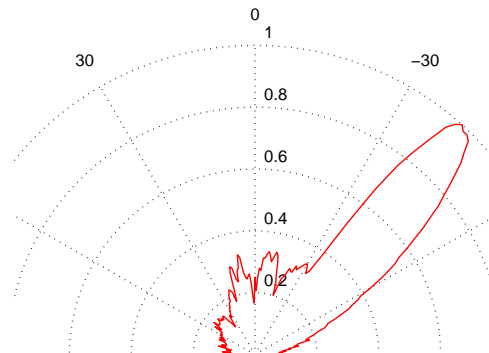


Bild 7: Schwenken der Abstrahlrichtung eines 8-Element-Arrays nach 45°

Die Mittenfrequenzen der Wandler zwischen 6 und 11 MHz erfordern Elementbreiten, die kleiner sind als $100\ \mu\text{m}$, um hinreichend große Öffnungswinkel zu erzielen. Allerdings sinkt durch Verkleinern der Elementfläche auch die aktiv strahlende Fläche und damit die erreichbare Schalldruckamplitude. Es ist ein Kompromiß zwischen Amplitudenabfall und erreichbarem Schalldruck zu schließen. Bild 8 zeigt den Schalldruckabfall in normierter Darstellung für verschiedene Elementbreiten ($200\ \mu\text{m}$, $150\ \mu\text{m}$ und $80\ \mu\text{m}$). Es zeigt sich deutlich die erwartete Reduzierung des Amplitudenabfalls durch schmalere Elemente. Eine weitere Verkleinerung der Elemente bis $20\ \mu\text{m}$ Breite ist beabsichtigt. Die daraus resultierende Reduzierung der Abstrahlfläche des Arrays soll durch Verwendung von 16 oder 24 anstelle der derzeit benutzten 8 Elemente kompensiert werden.

Im Verlauf der Messungen zum Abstrahlverhalten der Einzelelemente ergaben sich durchweg kleinere Öffnungswinkel der Abstrahlcharakteristik als in der Simulation. Nach Versuchen zur Variation der geometrischen Abmessungen der Elementbreiten, des Trägermaterials, der Vergußschicht und der Sensorfolie sowie durch Einsatz verschiedenartiger Ersatzmaterialien für diese Wandlerbestandteile wurden Strukturkopplungen im Trägermaterial und der Sensorfolie für die unerwartet schmale Abstrahlcharakteristik verantwortlich gemacht. Diese Strukturkopplungen bewirken die Schallabstrahlung einer Fläche, die größer ist als die angeregte Elektrode. Ein aus einem einzelnen schmalen Folienstreifen auf einem schmalen Trägerstück gefertigter Probewandler ergibt die theoretisch erwartete Abstrahlcharakteristik (Bild 9). Durch die Simulation wurden sowohl elektrische als auch mechanische Koppelmöglichkeiten untersucht [9]. Es konnte nachgewiesen werden, daß der piezoelektrische Einfluß auf die Kopplungen eine untergeordnete Rolle spielt (die Amplituden liegen um mehrere Größenordnungen unter denen der Anrege- bzw. Übersprechspannung), daß aber das elektrische Übersprechen bzw. die mechanischen Kopplungen in der Folie sowie in der Trägerstruktur nicht zu vernachlässigen sind.

Anhand des Verhältnisses von Apertur des Wandlerarrays zur Wellenlänge des Schalls im Ausbreitungsmedium kann die Richtschärfe der Schallabstrahlung den jeweiligen Anforderungen angepaßt werden [10]. In Bild 10 ist die Schallabstrahlung in Richtung 30° für die Arraybreiten $0,8\ \text{mm}$ und $1,9\ \text{mm}$ aufgetragen.

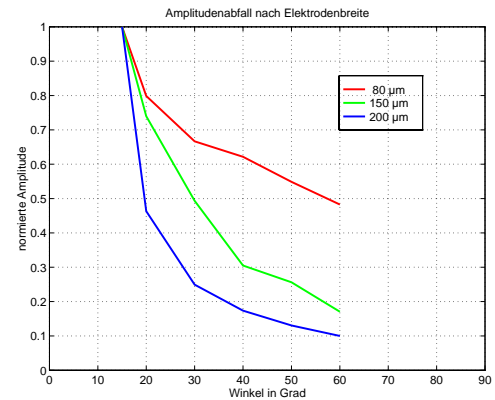


Bild 8: Amplitudenabfall für verschiedene Elementbreiten

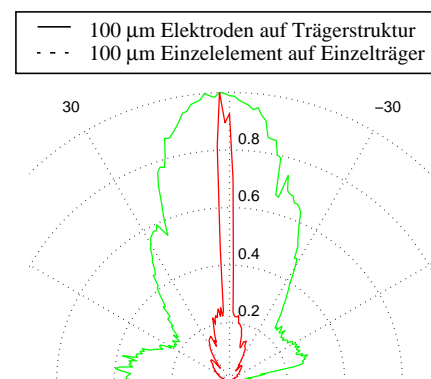


Bild 9: Einfluß der Strukturkopplung zwischen den Einzelelementen

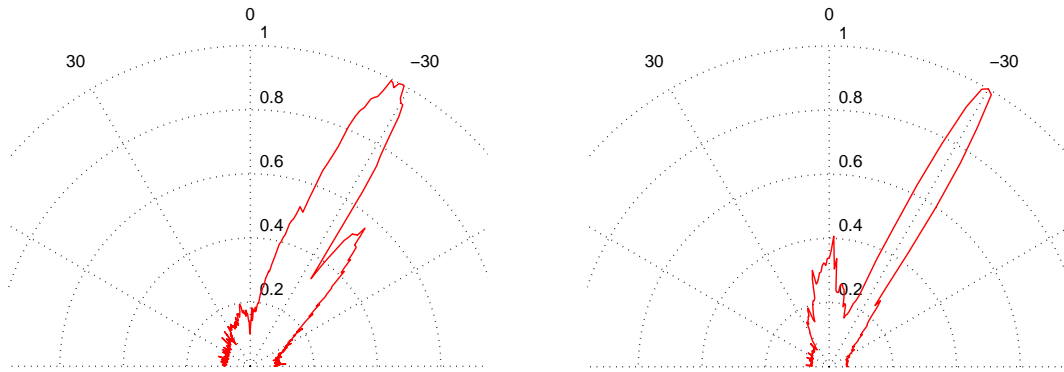


Bild 10: Beeinflussung der Richtscharfe des abgestrahlten Schalls durch Variieren der Gesamtbreite des Arrays, links: 0,8 mm, rechts: 1,9 mm

Der maximal erreichbare absolute Schalldruck mit derzeit vorliegenden Wandlerarrays wurde mit einem kalibrierten Hydrophon zu 166 dB bei 250 V Sendespannung und 15 cm Abstand zwischen Sender und Empfänger bestimmt.

6 Eine mögliche Applikation

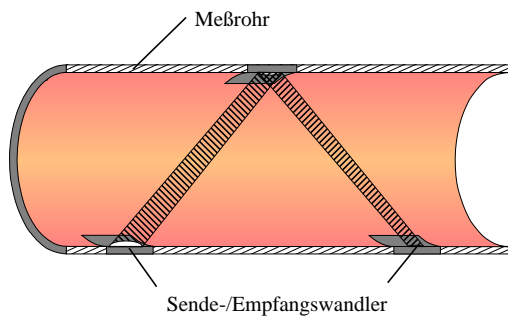


Bild 11: Möglicher Meßrohraufbau mit Mehr-elementwandlern

Ultraschall-Durchflußmeßverfahren bieten viele Vorteile. Das Meßmedium muß nicht optisch durchlässig oder elektrisch leitfähig sein, das Meßverfahren verursacht keinen Druckabfall im Meßrohr. Im Gegensatz zu Dopplerfrequenzverfahren entfällt bei Auswertung der Mitführung des Schalls mit der Strömung auch der Anspruch an Streukörper im Meßmedium. Meßprobleme resultieren bei herkömmlichen Ultraschall-Durchflußsensoren aus der jeweiligen konstruktiven

Lösung für die Meßstrecke. Üblicherweise verwendete piezokeramische Ultraschallwandler weisen eine Schallabstrahlung in Normalenrichtung auf, die einen geeigneten Einbau, entweder der Wandler selbst oder von Reflektoren im Meßrohr erforderlich machen, so daß das Meßrohr durchbrochen oder abgewinkelt werden muß. Dadurch wird jedoch das Strömungsfeld und damit das Meßergebnis beeinflusst. Für verschiedene Applikationen sind zudem die sich unmittelbar vor den Wandlern ausbildenden Totwasserbereiche unzulässig.

Werden die vorgestellten Wandler-Arrays bündig in die Rohrwand eingesetzt (Bild 11), können diese Probleme vermieden werden. Wirbelbildungen oder Gasablagerungen in Hohlräumen treten nicht auf. Durch eine stufenlos nachführbare Abstrahlcharakteristik ist eine höhere Meßdynamik erreichbar. Durch mehrmalige Reflexion an der Rohrwand kann der Meßweg verlängert werden.

7 Ausblick

Die vorgestellten Ultraschallwandler-Arrays auf Siliziumbasis ermöglichen die elektronisch steuerbare, richtscharfe Schallabstrahlung. Als derzeit erreichbare Schwenkwinkel werden 45° - 60° angesehen. Dabei konnte anhand der vorgestellten Ergebnisse aufgezeigt werden, daß die Einzelelemente des Arrays Abmessungen kleiner $100\ \mu\text{m}$ aufweisen sollten, um den Amplitudenabfall bei größeren Schwenkwinkeln zu minimieren. Zur Verbesserung der Arrayeigenschaften ist eine Verringerung der erwähnten Strukturkopplungen sowohl im Trägermaterial, als auch in der Folie erforderlich. Gräben im Si-Träger zwischen den Wandlerelektroden erreichen mit herkömmlichen Ätzverfahren aufgrund eines beschränkten Ätzwinkels und des geringen Abstandes zwischen den Elektroden nur eine unzureichende Tiefe.

Mit dem in der SCREAM-Technologie verwendeten Trockenätzverfahren [11] ist es möglich, Gruben bis $2\ \mu\text{m}$ Breite bei $20\ \mu\text{m}$ Tiefe in das Siliziumsubstrat einzubringen. Dadurch kann der Abstand zwischen den Sensorelektroden deutlich verringert werden, und trotzdem tiefe Gräben zur mechanischen Entkopplung eingebracht werden.

Weiterhin werden Strukturen möglich, die eine Realisierung von Schirmelektroden zur elektrischen Entkopplung zwischen benachbarten Elektroden erlaubt (Bild 12). Die beabsichtigte Strukturierung der PVDF-Sensorfolie ist

schwer mit in der Mikrosystemtechnik bekannten Verfahren zu erreichen, da sie empfindlich gegenüber Wärme bzw. starken elektrischen Feldern sowie chemisch beständig ist.

Durch eine direkte Anbindung von elektronischen Komponenten an das Ultraschallwandler-Array sollen die Leitungsverluste reduziert und damit das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert werden. Die Realisierung einer Hybridvariante mit Analog- und Digital-ASICs ist beabsichtigt [12].

Die dargelegten Ergebnisse entstanden im Rahmen der Arbeiten des von der DFG geförderten Sonderforschungsbereiches „Mikromechanische Sensor- und Aktorarrays“ an der TU Chemnitz.

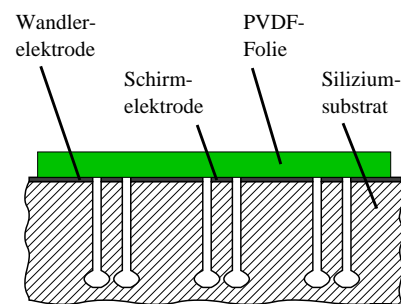


Bild 12: In SCREAM-Technologie strukturierter Siliziumträger

8 Literatur

- [1] Manthey, W.; Kroemer, N., *Luftultraschall-Arrays für Anwendungen im Nahdistanzbereich*, ITG-Fachbericht 126 - Sensoren, Berlin; Offenbach: VDE-Verlag, 1994
- [2] Mágori, V.: *Ultraschall-Sensoren für Abstand, Durchfluß und Geschwindigkeit*, VDI-Berichte Nr. 939 (1992) 145 - 151 SENSOREN, Bad Nauheim
- [3] v. Jena, A.: *Ultraschall-Durchflußsensor für die Wärmemengenmessung*. VDI Berichte Nr. 509 (1989) 39 - 42
- [4] Daßler, H.; Manthey, W.: *Sensorarray für akustische Durchflußmessungen*, 8. ITG/GMA-Fachtagung „Sensoren und Meßsysteme“, Bad Nauheim, VDI-Berichte 1255 (1996)
- [5] Altenburg, K.: *Physik der Kunststoffe*, Verlag Chemie Weinheim, 1984
- [6] Kroemer, N.: *Untersuchungen an Luftultraschallwandlern mit gewölbter piezoelektrischer Polymerfolie*, Dissertation TU Karl-Marx-Stadt (1990)
- [7] Thieme, L.; Molle, T.; Manthey, W.: *Feasibility and limits of FEM-simulation of PVDF ultrasonic transducers in fluids*, MICRO SYSTEM Technologies 96, Potsdam, VDE-Verlag Berlin-Offenbach (1996)
- [8] Molle, T.: *FEM-Simulation von PVDF-Ultraschallwandlern zur richtscharfen Schallabstrahlung*, Diplomarbeit TU-Chemnitz-Zwickau (1996)
- [9] May, K.: *Simulationen zur mechanischen Kopplung von PVDF-Ultraschallwandler-Arrays*, Diplomarbeit TU Chemnitz-Zwickau (1997)
- [10] Thieme, L.; Daßler, H.: *Sensor-Aktorarrays unter Verwendung von Piezopolymeren*, Kolloquium des SFB 379 „Mikromechanische Sensor- und Aktorarrays“, Chemnitz (4.-5. November 1996)
- [11] Bertz, A.; Mehner, J.: *Entwurfs- und Technologieprobleme bei der oberflächennahen Bulkmechanik (SCREAM)*, Kolloquium des SFB 379 „Mikromechanische Sensor- und Aktorarrays“, Chemnitz (4.-5. November 1996)
- [12] Hatfield, J. V.; Payne, P. A.; Scales, N. R.; Armitage, A. D.; Hicks, P. J.: *Transmit and receive ASICs for an ultrasound imaging multi-element array transducer*, Application Specific Integrated Circuits for Measurement Syst., London (in series: IEE Colloquium) Vol. 50 (1994), 6.1 - 6.5