

Sylvia E. Gebhardt*, Paul A. Günther, Kai Hohlfeld und Holger Neubert

Fertigungstechnologien für Ultraschallwandler im Frequenzbereich zwischen 40 kHz und 40 MHz

Manufacturing technologies for ultrasonic transducers in the 40 kHz to 40 MHz frequency range

<https://doi.org/10.1515/teme-2018-0068>

Eingang 1. Oktober 2018; angenommen 7. März 2019

Zusammenfassung: Ultraschallwandler werden zum Senden und Empfangen akustischer Wellen eingesetzt und bilden damit das Herzstück eines jeden Ultraschallprüfgeräts. Je nach Anwendung arbeiten sie in unterschiedlichen Frequenzbereichen. Ultraschallwandler mit niedrigen Arbeitsfrequenzen von 1 kHz bis 1 MHz werden insbesondere für Sonaranwendungen benötigt, wohingegen Hochfrequenz-Ultraschallwandler mit Arbeitsfrequenzen von mehr als 15 MHz für die hochauflösende Bildgebung im Rahmen biomedizinischer Untersuchungen und zerstörungsfreier Prüfverfahren interessant sind. Herkömmliche zerstörungsfreie Diagnose- und klinische Ultraschallbildgebungssysteme werden typischerweise mit Ultraschallwandlern, die bei Frequenzen zwischen 1 MHz und 10 MHz arbeiten, betrieben. Im Hinblick auf eine leistungsfähige Auslegung und kosteneffektive Fertigung müssen sowohl die verwendeten piezoelektrischen Komponenten als auch die Größe und innere Struktur solcher Wandler auf den Anwendungsfall zugeschnitten sein. Neben dem Ultraschallwandler, als aktives Element zur Umwandlung von elektrischer Energie in Schallenergie und umgekehrt, werden in einem Ultraschallprüfkopf weitere Komponenten wie Dämpfungskörper und Anpassschichten integriert um die Funktion an die jeweilige Messaufgabe anzupassen. Der Aufbau funktionsfähiger Ultraschallgeräte umfasst darüber hinaus die Ansteuer- und Auswertelektronik sowie die Bildverarbeitung. Im vorliegenden Artikel werden verschiedene Fertigungstechnologien für Ultraschallwandler unterschiedlicher Frequenzbereiche vorgestellt, die von den Autoren in den vergan-

genen Jahren entwickelt wurden. 1-3-Piezokomposite auf der Basis von piezokeramischen Fasern können in nahezu jeder Dicke hergestellt werden, was Arbeitsfrequenzen entsprechender Ultraschallwandler zwischen 40 kHz und 8 MHz erlaubt. Das Soft-Mold-Verfahren ermöglicht die Herstellung von Hochfrequenz-Ultraschallwandlern mit Arbeitsfrequenzen von 5 MHz bis 40 MHz. Hochintegrierte Wandler können durch Siebdruck von Elektroden-, Piezokeramik- und Isolationsschichten auf mikroelektronischen Substraten hergestellt werden. Damit sind strukturierte Ultraschallwandler mit Arbeitsfrequenzen zwischen 5 MHz und 30 MHz möglich.

Schlagwörter: Ultraschallwandler, 1-3-Piezokomposit, Phased-Array, Piezofaser-Komposit, Soft-Mold-Verfahren, Piezokeramische Dickschicht.

Abstract: Ultrasonic transducers are used for emitting and receiving of acoustic waves and form the core of ultrasonic systems. According to the application field, working frequency of ultrasonic transducers needs to be tailored to a certain value. Low frequency ultrasonic transducers with working frequencies of 1 kHz to 1 MHz are especially interesting for sonar applications, whereas high frequency ultrasonic transducers with working frequencies higher than 15 MHz are favorable for high-resolution imaging in biomedical and non-destructive evaluation. Conventional non-destructive testing devices and clinical ultrasound imaging systems are typically operated with ultrasonic transducers working at frequencies between 1 MHz and 10 MHz. Depending on the operational scenario, piezoelectric material as well as size and inner structure of the ultrasonic transducer has to be customized. Ultrasonic transducers represent the active part of an ultrasonic probe allowing for conversion of electrical energy into sound energy, and vice-versa. Combined with backing and matching layers they form an ultrasonic probe, which than has to be assembled with driving and controlling units to build an ultrasonic system. We here report on our investigation on different manufacturing technologies for ultrasonic transducers in a broad frequency range. 1-3 piezocomposites based on piezoceramic fibers can be fab-

***Korrespondenzautor:** Sylvia E. Gebhardt, Fraunhofer IKTS, Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems, Dresden, Smart Materials and Systems, Winterbergstr. 28, 01277 Dresden, Germany, E-Mail: sylvia.gebhardt@ikts.fraunhofer.de, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3497-7595>

Paul A. Günther, Holger Neubert, Fraunhofer IKTS, Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems, Dresden, Smart Materials and Systems, Winterbergstr. 28, 01277 Dresden, Germany
Kai Hohlfeld, Technische Universität Dresden, Institute of Materials Science, Dresden, Germany

ricated in almost every thickness allowing for transducer frequencies between 40 kHz and 8 MHz. The soft mold process enables the fabrication of high frequency ultrasonic transducers with potential frequencies of 5 MHz up to 40 MHz. Highly integrated ultrasonic transducers can be prepared by screen-printing a sequence of electrode, piezoceramic, and isolation layers on microelectronic substrates. By this, patterned ultrasonic transducers with working frequencies between 5 MHz and 30 MHz are possible.

Keywords: Ultrasonic transducer, 1-3 piezocomposite, phased array, piezofiber composite, soft mold process, piezoceramic thick film.

1 Einleitung

Ultraschallwandler werden häufig für die Bildgebung in Sonar-, zerstörungsfreien und medizinischen Diagnoseverfahren verwendet. Sie sind besonders vorteilhaft im Vergleich zur Röntgenanalyse aufgrund ihres nicht-ionisierenden Charakters, der vergleichsweise geringen Kosten und der Tatsache, dass aus den gewonnen Bildern und Messungen physikalische sowie strukturelle Informationen der untersuchten Medien abgeleitet werden können [1]. Während für Sonaranwendungen Ultraschallwandler mit Frequenzen von 1 kHz bis 1 MHz benötigt werden (1–100 kHz für Waffensonar und 100 kHz bis 1 MHz für bildgebendes Sonar), sind höhere Frequenzen für die zerstörungsfreie Prüfung sowie die medizinische Diagnostik erforderlich [2]. Herkömmliche zerstörungsfreie Prüfsysteme und klinische Ultraschallbildgebungssysteme werden typischerweise bei Frequenzen zwischen 1 MHz und 10 MHz betrieben. Um die räumliche Auflösung von Ultraschallbildern zu verbessern, sind Ultraschallwandler mit höheren Arbeitsfrequenzen erforderlich. Aufgrund der abnehmenden Eindringtiefe mit zunehmender Frequenz ermöglichen Hochfrequenz-Ultraschallwandler eine oberflächennahe oder intrakorporale Bildgebung, beispielsweise im Rahmen dermatologischer, ophthalmologischer, dentaler oder intravasculärer Untersuchungen. Sie sind zudem für präklinische Labortieruntersuchungen sowie die zerstörungsfreie Prüfung von faserverstärkten Kunststoffen, stoffschlüssigen Verbindungen und elektronischen Bauteilen in der Halbleiterindustrie interessant.

Die Konstruktion von Ultraschallprüfköpfen unterliegt immer einem Kompromiss zwischen hoher Empfindlichkeit für eine große Eindringtiefe und großer Band-

breite für eine hohe axiale Auflösung. Diese Eigenschaften werden in erster Linie durch die Parameter des verwendeten piezoelektrischen Materials bestimmt, außerdem durch den Dämpfungskörper (Backing) und die elektrische bzw. akustische Impedanz [3]. Dabei wird im Folgenden auf die Entwicklung von Ultraschallwandlern als Herzstück des Ultraschallprüfkopfs eingegangen. Als Ultraschallwandler oder Schwinger wird das aktive Element des Prüfkopfs, das die Umwandlung von elektrischer Energie in Schallenergie und umgekehrt ermöglicht, bezeichnet [4]. Für den Aufbau eines Ultraschallprüfkopfs sind daneben Dämpfungskörper sowie akustische Anpassschichten notwendig, die die Funktionsweise des Ultraschallwandlers beeinflussen, jedoch nicht Forschungsgegenstand der vorliegenden Arbeit sind. 1-3-Piezokomposite aus piezoelektrischen Stäbchen in einer nicht-piezoelektrischen und elastischen Polymermatrix ermöglichen die Herstellung von Wandlern mit höherer Empfindlichkeit und Bandbreite im Vergleich zu monolithischen piezokeramischen Komponenten. Dies liegt an der um 40 % bis 50 % höheren elektromechanischen Kopplung, der anpassbaren und bis zu einem Faktor 5 geringeren akustischen Impedanz sowie der niedrigeren Dielektrizitätskonstante. Die schwache akustische Kopplung zwischen diskreten Stäbchen in der Polymermatrix ermöglicht den Aufbau von Phased-Array-Wandlern mit akustisch getrennten Elementen durch die Verwendung strukturierter Elektroden anstelle von Vollelektroden. Darüber hinaus können aufgrund der mechanischen Flexibilität der Polymermatrix sehr einfach gekrümmte Fokus-Wandler gefertigt werden.

Aufgrund der Periodizität von piezokeramischen Stäbchen innerhalb von 1-3-Piezokompositen werden Störmoden durch Stäbchen-Stäbchen-Wechselwirkungen ausgebildet [5]. Diese können die Effizienz des Ultraschallwandlers drastisch beeinflussen, wenn sie in der Nähe der Betriebsfrequenz bzw. Dickenschwingung auftreten [6]. Es ist daher notwendig, Störmoden auf Frequenzen zu verschieben, die etwa doppelt so hoch sind wie die Dickenresonanz. Dies entspricht einem Verhältnis $t/p > 3$ zwischen der Dicke des piezoelektrischen Komposits t und seiner Periodizität p [7]. Technologien zur Herstellung von 1-3-Piezokompositen für Wandler unterschiedlicher Frequenzbereiche müssen daher nicht nur die entsprechende Kompositdicke, sondern auch eine ausreichend feine innere Strukturierung ermöglichen. Dies ist insbesondere eine Herausforderung für Frequenzen oberhalb von etwa 15 MHz, die in den letzten 20 Jahren aufgrund des Wunsches nach einer hochauflösenden Bildgebung zunehmend gewünscht sind.

Die Dice-and-Fill-Methode ist eine seit langem etablierte und anerkannte industrielle Technologie zur Herstellung solcher 1-3-Piezokomposite [8]. Dabei werden zwei Serien paralleler Sägeschnitte in einen monolithischen piezokeramischen Block eingebracht, welche senkrecht zueinander ausgerichtet sind. Die resultierenden Gräben werden anschließend mit einem Polymer verfüllt und der keramische Bodenkörper sowie das überschüssige Polymer auf der Oberseite durch Schleifen und Polieren entfernt. Diese Methode eignet sich für die Herstellung von Ultraschallwandlern mit Frequenzen zwischen 1 MHz und 15 MHz. Für Frequenzen bis zu 20 MHz werden bereits gefüllte Stäbchenstrukturen weiter unterteilt, um eine kleinere laterale Periodizität, genannt Pitch, zu erreichen. Die Tiefe und Breite des Sägeblatts sowie die Sprödigkeit des piezoelektrischen Materials begrenzen die Dice-and-Fill-Methode. Feinkörnige Piezokeramiken sind notwendige Voraussetzung für Hochfrequenz-Ultraschallwandler mit kleinen Pitches.

Für Ultraschallwandler mit Frequenzen unter 1 MHz sind 1-3-Piezokomposite mit einer Dicke von mehr als 2 mm erforderlich. So weisen z. B. 100 kHz-Wandler Dicken von ca. 15 mm auf. Diese Anforderungen werden von 1-3-Piezokompositen auf Basis piezoelektrischer Fasern erfüllt. Piezokeramische Fasern sind in nahezu jeder beliebigen Länge herstellbar. Nur die zur Polung erforderliche elektrische Spannung begrenzt die Dicke des Piezofaser-Komposits. Für piezoelektrische Materialien auf der Basis von weichen PZT (Blei-Zirkonat-Titanat)-Materialien werden elektrische Felder von 2 kV/mm für die Polung benötigt. Für einen Piezofaser-Komposit mit 50 mm Dicke wäre folglich eine elektrische Polungsspannung von etwa 100 kV notwendig.

2 Piezofaser-Komposite auf Grundlage der Arrange-and-Fill-Methode

2.1 Piezofaser-Komposite mit unregelmäßiger/zufälliger Faseranordnung

Das Arrange-and-Fill-Verfahren wurde im Jahre 2002 am Fraunhofer IKTS entwickelt und erlaubt die Herstellung von 1-3-Piezokompositen auf Basis piezokeramischer Fasern [9]. Dabei werden Bündel oder feste Anordnungen piezokeramischer Fasern in einer Form ausgerichtet und anschließend mit einem Polymer infiltriert. Nach der Aushärtung kann der Piezokomposit-Strang in einzelne Scheiben gesägt werden, deren Dicke je nach gewünschter Resonanzfrequenz eingestellt werden kann. Darüber hinaus ermöglicht der weiche Charakter des Verbundwerkstoffs die CNC-Bearbeitung (Computerized Numerical Control) in praktisch jeder Form und Größe. Somit ist eine schnelle und kostengünstige Herstellung großer Mengen von Piezokompositen möglich [10]. Abbildung 1 zeigt eine Auswahl möglicher Piezofaser-Komposite und einen Querschnitt eines 1-3-Piezofaser-Komposits mit unregelmäßiger Verteilung von Fasern des Durchmessers 300 μm .

Zur Herstellung von piezokeramischen Fasern werden in der Literatur verschiedene Herstellungstechnologien beschrieben. Piezokeramische Fasern mit Durchmessern zwischen 100 μm und 1000 μm werden typischerweise mittels Faserspinn- oder Extrusionsverfahren gewonnen. Zum Faserspinnen werden piezokeramische Pulver in einer Bindemittellösung dispergiert, um einen homogenen Schlicker mit hoher Feststoffkonzentration zu bilden. Der Schlicker wird anschließend durch eine Düse

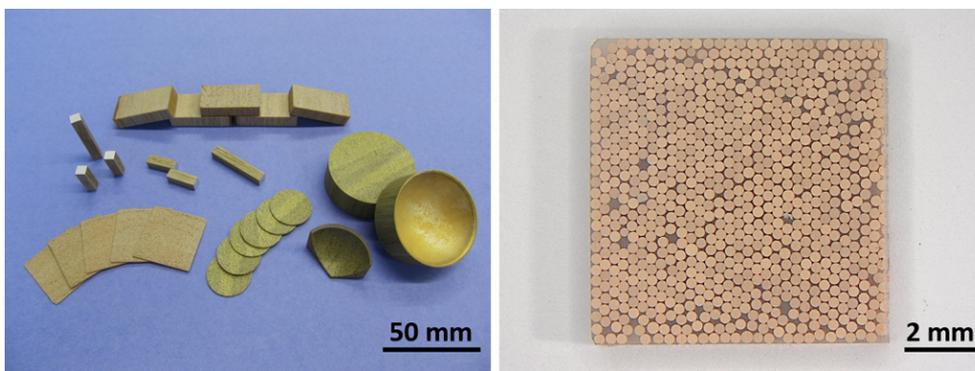


Abb. 1: Piezofaser-Komposite in verschiedener Form und Größe (links) sowie Querschliff eines 1-3-Piezofaser-Komposits mit unregelmäßiger Verteilung von 300 μm PZT-Fasern (rechts).

in ein Koagulationsbad gesponnen. Dort fällt die Bindemittellösung aus und erzeugt eine starre Grünfaser, welche nun getrocknet und gesintert werden kann. In der Literatur beschriebene Technologien sind der viskose Suspensions-Spinnprozess (VSSP), bei dem Viskose als Polymerbinder verwendet wird [11] und das ALCERU-Verfahren (Alternative Cellulose aus Rudolstadt) auf Basis von Cellulosebindern [12]. Kürzlich wurde durch die Autoren das Polysulfon-Spinnverfahren zur Herstellung von piezokeramischen Fasern eingeführt [13]. Hierbei wird eine Bindemittellösung aus Polysulfon-Binder und N-Methylpyrrolidon (NMP) als Lösungsmittel verwendet. Bei allen Spinnverfahren kann der Faserdurchmesser durch den Durchmesser der Spinnöse, die Vorschubgeschwindigkeit des Schlickers und die Spinnengeschwindigkeit eingestellt werden.

Die Faserextrusion ist eine relativ einfache Methode, um keramische Fasern mit unterschiedlichen Querschnitten herzustellen. Zunächst wird ein Ausgangsstoff aus Bindemittel und piezokeramischem Pulver gebildet, welcher dann mittels eines Schneckenextruders durch eine Düse extrudiert wird [14], [15]. Wiederum werden die erzeugten Grünfasern entbindert und gesintert.

Aufgrund der zufälligen Verteilung der piezokeramischen Fasern sind die resultierenden Piezofaser-Verbundwerkstoffe frei von durch Periodizitäten hervorgerufenen Störmoden. Die maximale Arbeitsfrequenz wird durch den Durchmesser und damit durch die Planarform der piezokeramischen Faser bestimmt. Darüber hinaus lassen sich dicke Piezokomposit-Blöcke mit flachen oder konvex/konkav gekrümmten Oberflächen leicht durch Sägeprozesse und CNC-Bearbeitung herstellen. Somit eignen sich Piezofaser-Verbundwerkstoffe besonders gut für breitbandige Ultraschallwandler mit Frequenzen zwischen 40 kHz und 8 MHz, wie sie z. B. in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung oder in der Sonartechnik benötigt werden.

2.2 Piezofaser-Komposite mit regelmäßiger/periodischer Faseranordnung

Zur Herstellung regelmäßiger bzw. periodischer Faserkomposite werden piezokeramische Fasern gemäß dem gewünschten Layout in einer Positionierungsmaske eingebracht. Der fixierte Aufbau wird in eine Form eingelegt und anschließend mit einem Polymer infiltriert. Nach der Aushärtung des Polymers kann der gesamte Strang in die gewünschte Form gefräst und in einzelne Wandler gesägt werden. Piezofaser-Komposite mit regelmäßi-

ger Faser-Anordnung sind besonders für Ultraschallwandler mit einem definierten Volumengehalt an piezokeramischen Fasern interessant. Daneben können Teilbereiche des Wandlers mit festen Faserpositionen erzeugt werden, was akustisch getrennte Array-Elemente ermöglicht.

Einen völlig neuen messtechnischen Ansatz bietet die Verwendung von piezokeramischen Einzelfasern als Punktstrahler. Zur Entwicklung eines 3-D-Ultraschall-Computer-Tomographie-Systems (3D USCT) zur Brustkrebsfrüherkennung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurden durch die Autoren in einem ersten Aufbau 1-3-Piezokomposite mit 13 Einzelfasern, welche an definierten Positionen im Komposit angeordnet waren, erforscht [16]. Herzstück des USCT-Systems ist ein dreidimensional halbellipsoid-förmiger wassergefüllter Behälter mit 2041 unfokussierten Ultraschallwandlern, die in die Peripherie (Wand) des Behälters integriert sind. Dabei werden 628 Wandler zum Senden von Ultraschallwellen in Richtung des zu messenden Objektes genutzt. Die transmittierten Wellen interagieren mit dem Messobjekt und werden von den restlichen 1413 Wandlern empfangen. In einem zweiten Schritt wird aus den zurückgesendeten Schallwellen ein Bild des Messobjekts erzeugt. Auf diese Weise können Messobjekte dreidimensional abgebildet werden ähnlich zur Röntgen-Computer-Tomographie, wobei die USCT ohne ionisierende Strahlung auskommt. Bisher wurde zum Aufbau der Wandler die Dice-and-Fill-Technik verwendet. Damit war es möglich quadratische Ultraschallelemente zu erzeugen, die jedoch aufgrund der quadratischen Form und der Fläche von $0,81 \text{ mm}^2$ jedes Elements sowohl im Öffnungswinkel als auch in der Schalldruckhomogenität begrenzt waren. Außerdem ist die Fertigungstechnik sehr arbeitsaufwendig. Die 3-D-Simulation potenzieller Wandler-Designs ergab, dass runde Wandler mit einer aktiven Fläche von $0,16 \text{ mm}^2$ ideal in Bezug auf Schalldruck und Öffnungswinkel sind. Aus diesem Grund wurden erstmalig piezokeramische Fasern als Punktquelle mit definiertem Querschnitt für den Aufbau piezoelektrischer Wandler im USCT untersucht.

Für das betrachtete Design wurden piezokeramische Fasern mit einer Länge von 150 mm und einem Durchmesser von $460 \mu\text{m}$ in einer Maske in einem bestimmten Muster angeordnet und mit einem Polymer verfüllt. Die Anordnung der Fasern wurde so gewählt, dass eine periodische Nahordnung vermieden wurde um optische Artefakte auszuschließen und ein optimales Signal-Rausch-Verhältnis in den erzeugten Bildern zu erhalten. Nach der Aushärtung wurden aus dem 150 mm langen Ver-gussblock Scheiben mit unterschiedlicher Dicke gesägt. Auf diese Weise wurden mehrere Ultraschallwandler mit identischen Faser-Positionen und Eigenschaften erzeugt.

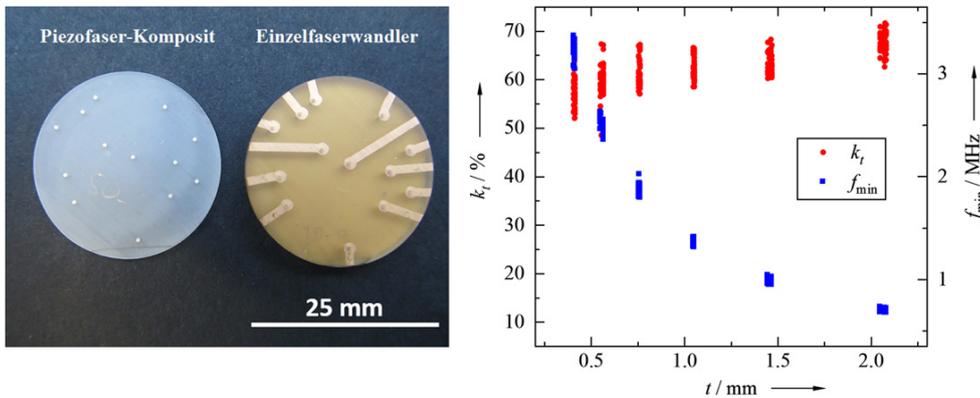


Abb. 2: 1-3-Piezofaser-Komposit mit 13 Einzelfasern, die als Einzelfaserwandler über gesputterte Elektroden angesteuert werden können (links) sowie Kopplungsfaktor und Resonanzfrequenz der Dickenschwingung in Abhängigkeit von der Dicke des Faserwandlers (rechts).

Zum Schluss wurde auf jede einzelne Faser strukturierte Gold-Elektroden mittels Sputtertechnik aufgebracht und mit der äußeren Steuerelektronik verbunden. Damit konnte jede Faser einzeln zum Senden und Empfangen von Ultraschallwellen angesteuert werden. Abbildung 2 zeigt sowohl die über Arrange-and-Fill-Methode hergestellten 1-3-Piezokomposit-Scheiben mit 13 Einzelfaserwandlern, als auch die Messergebnisse bzgl. des Kopplungsfaktors und der Resonanzfrequenz der Dickenschwingung in Abhängigkeit von der Dicke der Scheiben. Der Kopplungsfaktor der Piezofaserwandler mit einer Dicke größer 0,8 mm erreichte Mittelwerte von $k_t > 60\%$. Bei Wandlern mit geringerer Dicke interferierte die Planarschwingung der Piezofasern mit der Dickenschwingung, was zu einem verringerten Kopplungsfaktor und größerer Streuung der Messwerte führte. In Zukunft muss der Faserdurchmesser reduziert werden, um die höchste Performance bei 2,5 MHz zu erreichen.

3 Piezokomposite auf Grundlage des Soft-Mold-Verfahrens

Das Soft-Mold-Verfahren ermöglicht die Herstellung feinskaliger Piezokomposite mit freier Gestaltung der piezokeramischen Stäbchen sowie deren räumlicher Verteilung [17]. Dies macht das Verfahren besonders für die Entwicklung von Hochfrequenz-Ultraschallwandlern interessant. Besonderes Merkmal des Verfahrens ist die direkte Gießformgebung piezokeramischer Stäbchenanordnungen. Dazu werden flexible Negativformen von positiven Masterformen abgeformt, welche durch Mikrosystemtechnologien wie dem Siliziumtiefenätzen (Deep Reactive Ion Etching – DRIE) oder der LIGA-Technik (Lithographie, Gal-

vanik und Abformung) strukturiert wurden. Die weichen Zwischenformen werden unter Vakuum mit einer keramischen Suspension gefüllt. Nach der Trocknung erfolgen die Entformung sowie die Sinterung der keramischen Grünkörper. Dabei erfahren die Grünlinge eine lineare Schwindung von etwa 20–25%. Die Zwischenräume zwischen den piezokeramischen Stäbchen können nun mit einem Polymer gefüllt werden. Nach dessen Aushärtung wird sowohl die Oberseite als auch die Unterseite abgeschliffen. Die schematische Darstellung des Prozesses ist in Abbildung 3 gezeigt. Im Gegensatz zur Dice-and-Fill-Technik können Form, Größe, Abstand und Anordnung der piezokeramischen Stäbchen in großer Vielfalt gewählt werden. Die Masterformen sowie die weichen Zwischenformen sind wiederverwendbar, was den Prozess kostengünstig macht. Außerdem sind Zeit und Aufwand für die Herstellung unabhängig von der Stäbchengröße und deren Layout.

Für die Herstellung eines 20 MHz Ultraschallwandlers wurde der Einfluss von Form, Anordnung und Abstand verschiedener Stäbchengemetrien auf die Erzeugung und die Frequenz von Störmoden untersucht [18]. Keramische Stäbchen auf Basis von unsymmetrischen Geometrien neigen beim Sintern zum Umfallen. Die besten Ergebnisse wurden für Rundstäbchen erzielt. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden Silizium-Masterformen aus runden Stäbchen mit einer Höhe von 200 μm , einem Durchmesser von 45 μm und einem Pitch von 55 μm oder 60 μm hergestellt. Die Stäbchenanordnung wurde zwischen quadratisch und hexagonal variiert. Nach dem Entformen und Sintern konnten keramische Stäbchen mit 160 μm Höhe, 34 μm Durchmesser und 42 μm oder 45 μm Mittenabstand erzeugt werden. Die gesinterten PZT-Strukturen zeigen eine dichte, feinkörnige und homogene Mikrostruktur wie in Abbildung 4 zu sehen ist.

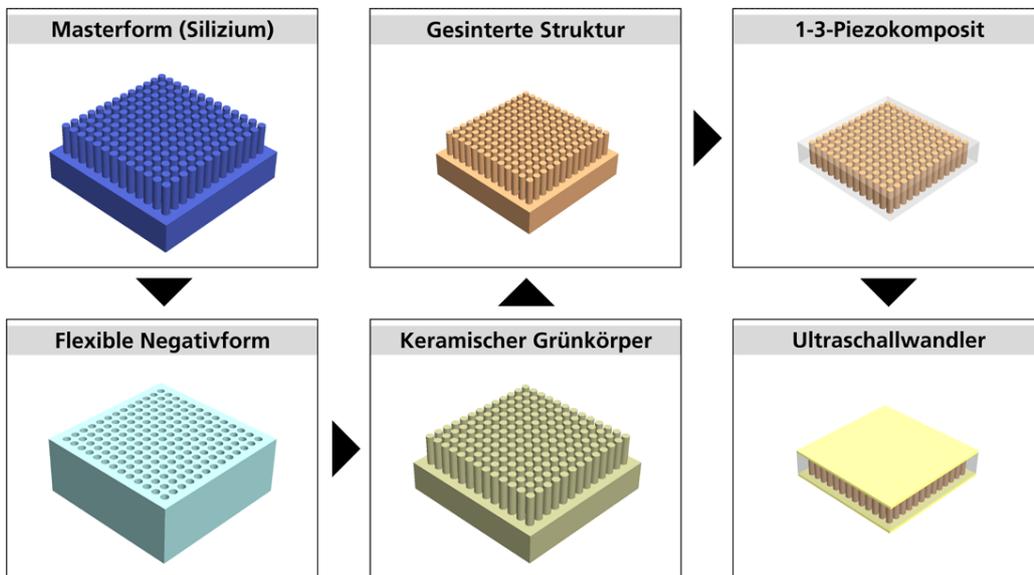


Abb. 3: Schematische Darstellung des Soft-Mold-Verfahrens.

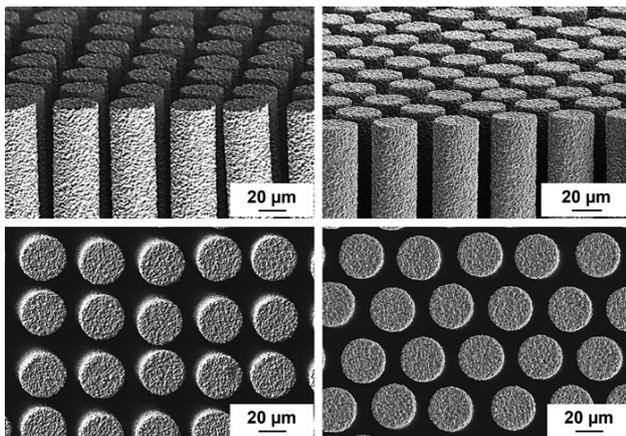


Abb. 4: Rasterkraftmikroskopische Aufnahmen gesintertter PZT-Stäbchen in quadratischer (links) und hexagonaler (rechts) Anordnung hergestellt über das Soft-Mold-Verfahren.

Die gesinterten Stäbchenarrays in quadratischer und hexagonaler Anordnung wurden mit einem Polymer gefüllt und nach Aushärtung auf eine Dicke von etwa 90 µm geschliffen, um eine Dickenresonanz von 20 MHz zu erreichen.

Die 1-3-Piezokomposite wurden anschließend beidseitig mit Gold-Sputterelektroden versehen und bei einer elektrischen Feldstärke von 3 kV/mm für die Dauer von 3 min im Ölbad gepolt. Die Charakterisierung der hergestellten Ultraschallwandler hinsichtlich ihrer elektrischen Impedanzspektren erfolgte im Frequenzbereich von 1 MHz bis 40 MHz unter Verwendung des Gerätes „4194A“ der Fa. Hewlett Packard. In Abbildung 5 sind die Messergeb-

nisse vergleichend dargestellt. Je nach Stäbchenanordnung und Pitch traten bei höheren Frequenzen Störmoden auf. Für die quadratische Anordnung von runden Stäbchen wurde die erste Resonanz, die durch Stäbchen-Stäbchen-Wechselwirkung verursacht wurde, bei 24 MHz (45 µm Pitch) und bei 27 MHz (42 µm Pitch) gemessen. Durch die hexagonale Anordnung konnte das Resonanzverhalten verbessert werden, indem die erste Störmode auf höhere Frequenzen von 28 MHz (45 µm Pitch) bzw. 37 MHz (42 µm Pitch) verschoben wurde.

Die Technologie des Soft-Mold-Verfahrens besitzt das Potenzial, sowohl die Stäbchendurchmesser, als auch deren Abstände weiter zu reduzieren. Entsprechend konnten kürzlich hexagonal angeordnete piezokeramische Stäbchenstrukturen mit Stäbchendurchmessern von 15 µm und einem Pitch von 19 µm erfolgreich hergestellt werden. Abbildung 6 zeigt das elektrische Impedanzspektrum eines auf diesem Layout basierenden Ultraschallwandlers mit einer Dicke von 65 µm. Die Messergebnisse belegen, dass durch die Verkleinerung des Stäbchenlayouts die erste Störmode auf Frequenzen > 80 MHz gelegt werden konnte. Damit qualifizieren sich derartige Wandler für Betriebsfrequenzen von mindestens 40 MHz.

4 Siebgedruckte Ultraschallwandler

Piezokeramische Dickschichten mit einer typischen Dicke von 30 µm bis 150 µm ermöglichen integrierte Lösun-

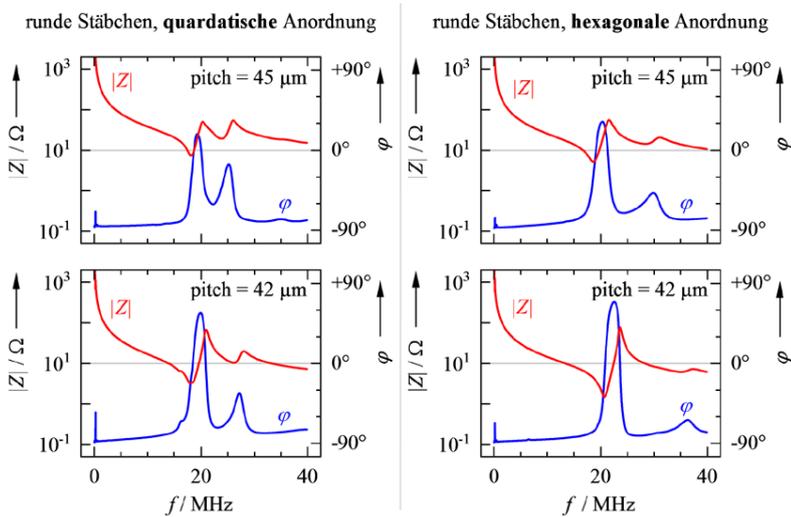


Abb. 5: Elektrische Impedanzspektren von Ultraschallwandlern mit variierender Stäbchenanordnung und variierendem Pitch. Stäbchendurchmesser konstant bei ca. $34 \mu\text{m}$; Wandlerdicke konstant bei ca. $90 \mu\text{m}$.

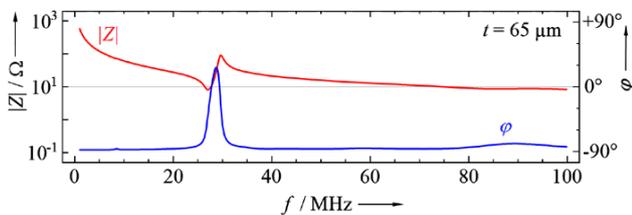


Abb. 6: Elektrisches Impedanzspektrum eines Ultraschallwandlers mit runden Stäbchen in hexagonaler Anordnung und einer Dicke von $65 \mu\text{m}$. Stäbchendurchmesser und Pitch betragen $15 \mu\text{m}$ bzw. $19 \mu\text{m}$.

gen auf der Basis von Mikrosystemtechnologien. Mittels Siebdruckverfahren lassen sich endkonturnahe Strukturen ohne weitere Bearbeitung auf flächigen oder tubularen Substraten aufbringen. Dazu wurde eine piezokeramische Dickschichtpaste auf Basis von niedrigsinterndem PZT-Pulver entwickelt. Diese kann auf elektronischen Standardwerkstoffen wie Aluminiumoxid (Al_2O_3), low temperature cofired ceramics (LTCC), Zirkoniumdioxid (ZrO_2) und ausgewählten Stahlsorten gedruckt und gesintert werden. In Kombination mit dem schrittweisen Aufbringen von Elektroden- und Isolationschichten lassen sich so kompakte Mikrosysteme realisieren.

Für einen 2-D-Matrix-Array-Wandler wurde eine Sequenz von strukturierten Dickschichten auf ein $0,25 \mu\text{m}$ dickes Al_2O_3 -Substrat (99,6%, Rubalit 710, CeramTec, Deutschland) gedruckt, welche eine Gold-Grundelektrode, eine PZT-Dickschicht, eine Gold-Deckelektrode, dielektrische Isolierungspads sowie Gold-Kontaktierungen umfasst [19]. Die Dicke der PZT-Dickschicht wurde durch wiederholtes Aufdrucken von PZT auf $140 \mu\text{m}$ Stärke eingestellt. 6×6 PZT-Elemente der Abmessungen $2,0 \text{ mm} \times 2,0 \text{ mm}$ mit $1,7 \text{ mm} \times 1,7 \text{ mm}$ Deckelektrodenpads

wurden mit einem Element-Pitch von $2,3 \text{ mm}$ angeordnet. Abbildung 7 zeigt die Draufsicht der finalen Komponente.

Die Resonanzfrequenzen gedruckter Ultraschallwandler hängen stark von der Substratdicke sowie der Dicke der PZT-Schicht ab. Da die PZT-Schicht direkt auf die Oberseite des Substrats gedruckt und gesintert wird, erfolgt eine starke Bindung zwischen der aktiven piezoelektrischen Schicht und dem Substratmaterial. Dabei schwingen PZT-Dickschicht und Substrat gemeinsam. Im Falle des 2-D-Matrix-Array-Wandlers basierend auf einem $0,25 \mu\text{m}$ dicken Al_2O_3 -Substrat und einer $0,14 \mu\text{m}$ dicken PZT-Schicht wurde die Resonanzfrequenz bei $7,4 \text{ MHz}$ gemessen. Diese Frequenz konnte für den Aufbau eines planaren Ultraschallwandlers zur Partikelmanipulation eingesetzt werden. Dazu wurde beim Kooperationspartner IMSaT (Institute for Medical Science and Technology) der University of Dundee eine Fluidhohlraumkammer mit einem Glasreflektor an dem Al_2O_3 -Substrat angebracht und mit Wasser gefüllt. Als Modellstrukturen für die Teilchenmanipulation fanden $10 \mu\text{m}$ fluoreszierende Polystyrol-Mikrokügelchen Verwendung. Durch Ansteuern der einzelnen PZT-Elemente mit einem Sinussignal von $7,5 V_{p-p}$ bei der Resonanzfrequenz wurden Mikropartikel innerhalb der Flüssigkeit in Schwebung gebracht und in den ausgebildeten Druckknotenpunkten in der Fluidkammer eingefangen. Die Experimente konnten zeigen, dass durch Siebdruck hergestellte Ultraschallwandler eine ausreichende akustische Leistung für sogenannte Ultraschall-Pinzetten erzeugen können.

In Abhängigkeit von den akustischen Eigenschaften des Substratmaterials sowie dem Layout und der Dicke von PZT-Dickschicht und Substrat können auch höhere Resonanzfrequenzen aktiviert werden. Ein tiefgreifendes Verständnis der Wellenausbreitung und eine exakte Di-

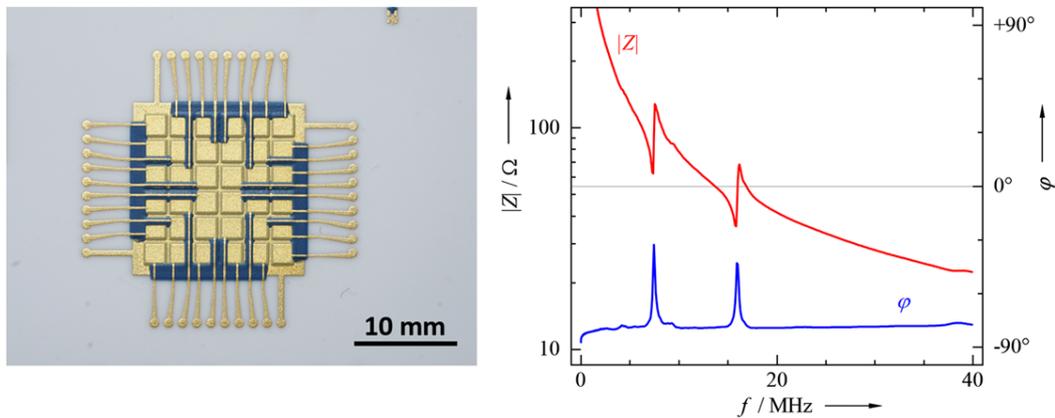


Abb. 7: 2-D-Matrix-Array-Wandler bestehend aus ganzflächiger Grundelektrode sowie strukturierter PZT-, Deckelektrode-, Isolations- und Kontaktierungsschicht auf Al_2O_3 -Substrat (links), sowie Impedanzspektrum eines Wandler-Segments (rechts).

mensionierung sind notwendig, um Ultraschallwandler mit Resonanzfrequenzen zwischen 5 MHz und 30 MHz zu konstruieren.

5 Zusammenfassung

Zur Fertigung anwendungsspezifischer Ultraschallwandler ist es sinnvoll, unterschiedliche Fertigungstechnologien auszuwählen. Während ein Großteil der in Ultraschallprüfköpfen verbauten Ultraschallwandler nach dem Dice-and-Fill-Verfahren hergestellt werden, bieten sich besonders für Frequenzen < 1 MHz und > 20 MHz alternative Fertigungsverfahren an. Der Artikel gibt einen Überblick über Prozesstechnologien, die in den letzten 20 Jahren von den Autoren entwickelt wurden und für den Aufbau von Prüfköpfen bei Geräteherstellern verwendet werden können. Der Artikel soll dabei das Blickfeld der Ultraschallgerätehersteller auf breitere Einsatzgebiete und kundenspezifische Lösungen erweitern.

1-3-Piezokomposite auf Basis von Piezofasern sind besonders für niederfrequente Ultraschallwandler geeignet. Je nach den Anforderungen der Anwendung lassen sich die Fasern regelmäßig oder zufällig anordnen. Ein neuer Ansatz zur kostengünstigen Herstellung von 2041 Wandlern in einem 3D USCT-System wurde basierend auf Piezokompositen mit definierten Positionen einzelner piezokeramischer Fasern entwickelt. Unter Verwendung strukturierter Elektroden konnte jede Faser einzeln angesteuert werden und als Punktstrahler arbeiten. Der Kopplungskoeffizient der Piezofaser-Wandler erreichte abhängig von der Dicke des Wandlers mittlere Kopplungsfaktoren $k_t > 60\%$.

Das Soft-Mold-Verfahren ermöglicht die Herstellung von 1-3-Piezokompositen mit einer großen Vielfalt bezüglich Stäbchenform, -größe, -abstand und -anordnung und ermöglicht aufgrund der geringen möglichen Strukturmaße die Entwicklung von Ultraschallwandlern bis zu 40 MHz. Damit wird eine wichtige Lücke in der Herstellung von Ultraschallwandlern zwischen Dice-and-Fill-Verfahren (1 MHz bis 15 MHz) und Dünnschichttechnologie (> 100 MHz) geschlossen. Für die Entwicklung eines 20 MHz Wandlers wurden quadratische und hexagonale Anordnungen von runden Stäbchen mit unterschiedlichen Abständen untersucht. Die besten Ergebnisse konnten mit 1-3-Piezokompositen aus runden Stäbchen in hexagonaler Anordnung mit einem Durchmesser von $34\ \mu\text{m}$ und einem Pitch von $42\ \mu\text{m}$ erzielt werden. Auf diese Weise konnten die Störmoden auf Frequenzen bis 37 MHz verschoben werden. Durch eine weitere Reduzierung des Stäbchendurchmessers auf $15\ \mu\text{m}$ und des Mittenabstands auf $19\ \mu\text{m}$ war es möglich 40 MHz Wandler aufzubauen, die bis zu einer Frequenz von 80 MHz frei von sekundären Moden waren.

Für den Aufbau von hochintegrierten Ultraschallwandlern in Mikrosystemtechnik eignen sich piezokeramische Dickschichten, die am Fraunhofer IKTS entwickelt wurden. Durch den sequenziellen Siebdruck von Elektroden-, Piezokeramik- und Isolationsschichten auf Substraten wie Al_2O_3 , LTCC, ZrO_2 und ausgewählten Stahlsorten ist es möglich strukturierte Ultraschallwandler mit Arbeitsfrequenzen zwischen 5 MHz und 30 MHz aufzubauen. Die Resonanzfrequenz der siebgedruckten PZT-Dickschichtsysteme hängt dabei stark von den akustischen Eigenschaften des Substratmaterials sowie von der Dicke der PZT-Dickschicht und des Substrats ab.

Finanzierung: Diese Arbeit wurde teilweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs/Transregio 39 PT-PIESA (Teilprojekt A01 und K04) und im Rahmen des Grants GE-2078/5-1 unterstützt.

Literatur

1. M. Lethiecq, F. Levassort, D. Certon, L. P. Tran-Huu-Hue: Piezoelectric Transducer Design for Medical Diagnosis and NDE. Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications, 1st ed., A. Safari and E. K. Akdogan, Ed. New York, NY, USA: Springer Science+Business Media (2008) 191–215.
2. J. F. Tressler: Piezoelectric Transducer Designs for Sonar Applications. Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications, 1st ed., A. Safari and E. K. Akdogan, Ed. New York, NY, USA: Springer Science+Business Media (2008) 217–239.
3. J. W. Hunt, M. Arditi, S. Foster: Ultrasound Transducers for Pulse-Echo Medical Imaging. IEEE Trans. on Biomedical Engng., (8) (1983) 453–481.
4. DIN EN 1330-4 Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 4: Begriffe der Ultraschallprüfung; Dreisprachige Fassung EN 1330-4:2010. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth Verlag, Berlin 2010.
5. T. R. Gururaja, W. A. Schulze, L. E. Cross, R. E. Newnham, B. A. Auld, Y. J. Wang: Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. Part I: Resonant modes of vibration of PZT rod-polymer composites. IEEE Trans. Sonics Ultrason., 19985 (32) (1985) 481–498.
6. R. Rouffaud, F. Levassort, M. P. Thi, C. Bantignies, M. Lethiecq, A.-C. Hladky-Hennion: Super-Cell Piezoelectric Composite With 1–3 Connectivity. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Control, 12(63) (2016) 2215–2223.
7. J. A. Hossack, G. Hayward.: Finite-element Analysis of 1–3 Composite Transducers. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Control, 6(38) (1991) 618–629.
8. H. P. Savakus, K. A. Klicker, R. E. Newnham: PZT-Epoxy Piezoelectric Transducers: A Simplified Fabrication Procedure. Mater. Res. Bull., 6(16) (1981) 677–680.
9. L. Seffner, A. Schönecker, S. Gebhardt: Verfahren zur Herstellung eines piezoelektrischen Wandler (Method for Producing a Piezoelectric Transducer). Patent DE 199 54 020. February 28 (2002).
10. A. Schönecker: Piezoelectric Fiber Composite Fabrication. Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications, 1st ed., A. Safari and E. K. Akdogan, Ed. New York, NY, USA: Springer Science+Business Media (2008) 261–287.
11. R. B. Cass: Fabrication of Continuous Ceramic Fiber by the Viscous Suspension Spinning Process. Ceram. Bulletin, 3(70) (1991) 424–429.
12. D. Vorbach, T. Schulze, E. Taeger: Verfahren zur Herstellung von Cellulose-Filamenten mit sehr hohem Anteil an Zusatzstoffen. Patent DE 4426966. July 29 (1994).
13. K. Hohlfeld, S. Gebhardt, A. Schönecker, A. Michaelis: PZT Components Derived from Polysulphone Spinning Process. Advances in Applied Ceramics, 4(114) (2015) 231–236.
14. A. C. Dent, L. J. Nelson, C. R. Bowen, R. Stevens, M. Cain, M. Stewart: Characterization and Properties of Fine Scale PZT Fibers. Journ. Europ. Ceram. Soc., (25) (2005) 2387–2391.
15. J. Heiber, A. Belloli, P. Ermanni, F. Clemens: Ferroelectric Characterization of Single PZT Fibers. Journ. Intelligent Material Systems and Structures, (20) (2009) 379–385.
16. M. Zapf, K. Hohlfeld, N. V. Ruiter, P. Pfister, K. W. A. Van Dongen, H. Gemmeke, A. Michaelis, S. E. Gebhardt: Development of Single Fiber Piezocomposite Transducers for 3D Ultrasound Computer Tomography. Advanced Engineering Materials, 1800423 (2018) 1–8, doi: 10.1002/adem.201800423.
17. S. Starke, A. Schönecker, W. Gebhardt: Fine Scale Piezoelectric 1-3 Composites: A New Approach of Cost Effective Fabrication. Proc. 11th IEEE Intern. Symp. Appl. Ferroelect., Montreux, Switzerland, Aug. 24-27 (1998), 393–396.
18. S. Gebhardt, P. Günther, S. Fröhlich, H. Neubert: Towards Fabrication of High Frequency Ultrasonic Transducers Using Soft Mold Process. Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium, Tours, France, September 18-21 (2016), doi: 10.1109/ULTSYM.2016.7728555.
19. Y. Qiu, H. Wang, S. Gebhardt, A. Bolhovitins, C. E. M. Démoré, A. Schönecker, S. Cochran: Screen-printed Ultrasonic 2-D Matrix Array Transducers for Microparticle Manipulation. Ultrasonics (2015), doi: 10.1016/j.ultras.2015.05.010.

Autoreninformationen



Sylvia E. Gebhardt

Fraunhofer IKTS, Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems, Dresden, Smart Materials and Systems, Winterbergstr. 28, 01277 Dresden, Germany
sylvia.gebhardt@ikts.fraunhofer.de

Sylvia E. Gebhardt studierte Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg und promovierte 2000 zum Thema „Entwicklung und Charakterisierung von feinskaligen 1-3-Piezokompositen für hochfrequente Ultraschallwandler“. Seit 1997 arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Intelligente Materialien und Systeme des Fraunhofer Instituts für Keramische Technologien und Systeme IKTS in Dresden. Ihr Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung von Technologien und Komponenten auf Basis von piezokeramischen Dickschichten, Mehrlagenkeramiken, Mikrostrukturen, Fasern und Verbundwerkstoffen für Sensor-, Aktor- und Ultraschallanwendungen.

**Paul A. Günther**

Fraunhofer IKTS, Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems, Dresden, Smart Materials and Systems, Winterbergstr. 28, 01277 Dresden, Germany
paul.guenther@ikts.fraunhofer.de

Paul A. Günther studierte bis 2015 Werkstofftechnik Glas & Keramik an der Universität Koblenz-Landau und der Hochschule Koblenz, Höhr-Grenzhausen. Seit 2015 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Intelligente Materialien und Systeme des Fraunhofer Instituts für Keramische Technologien und Systeme IKTS in Dresden tätig. Sein Forschungsschwerpunkt liegt in der Entwicklung von feinskaligen 1-3-Piezokompositen für hochfrequente Ultraschallwandler.

**Holger Neubert**

Fraunhofer IKTS, Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems, Dresden, Smart Materials and Systems, Winterbergstr. 28, 01277 Dresden, Germany
holger.neubert@ikts.fraunhofer.de

Holger Neubert studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität Dresden und promovierte 2000 zum Thema „Simultan lösbare Verbindungen“. Von 2000–2014 arbeitete er Gruppenleiter am Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design an der Technischen Universität Dresden. Seit 2014 leitet er die Abteilung Intelligente Materialien und Systeme am Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS in Dresden. Sein Forschungsprofil umfasst die Auslegung elektromagnetischer und piezoelektrischer Aktoren und Systeme, den thermischen Entwurf sowie die Entwicklung von Systemmodellen.

**Kai Hohlfeld**

Technische Universität Dresden, Institute of Materials Science, Dresden, Germany
kaihohlfeld@gmx.de

Kai Hohlfeld studierte Maschinenbau mit Vertiefung Luft- und Raumfahrttechnik an der Technischen Universität Dresden und promovierte 2016 zum Thema „Herstellung und Charakterisierung piezokeramischer Komponenten und daraus abgeleiteter Piezokomposite“. Von 2010–2018 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffwissenschaft der Technischen Universität Dresden. Sein Forschungsgebiet umfasst die Entwicklung von piezokeramischen Komponenten und Verbundwerkstoffen für die Sensorik, Aktorik und Ultraschallmesstechnik.