Herstellung und Charakterisierung von Faserverbundstrukturen mit integrierten piezoelektrischen Wandlerarrays für die gerichtete Abstrahlung von Ultraschall

Eric Starke, Martin Dannemann, Anja Winkler, Klaudiusz Holeczek, Niels Modler

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), Technische Universität Dresden, 01307 Dresden, E-Mail: eric.starke@tu-dresden.de

Funktionalisierte Faserverbunde

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) haben ein hohes Leichtbaupotenzial und ermöglichen damit z. B. im Luftfahrt- oder Automobilsektor eine Senkung des Kraftstoffverbrauchs und der CO_2-Emissionen. Darüber hinaus bieten einige FKV die Möglichkeit Sensoren, Aktoren und elektronischen Schaltungen direkt in Leichtbaukomponenten zu integrieren. Derartige Bauteile weisen somit neben der primären Tragfunktion zusätzliche Funktionalitäten auf. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht möglicher Anwendungsfelder für derartige *funktionalisierte Faserverbunde* (siehe Starke [1]).

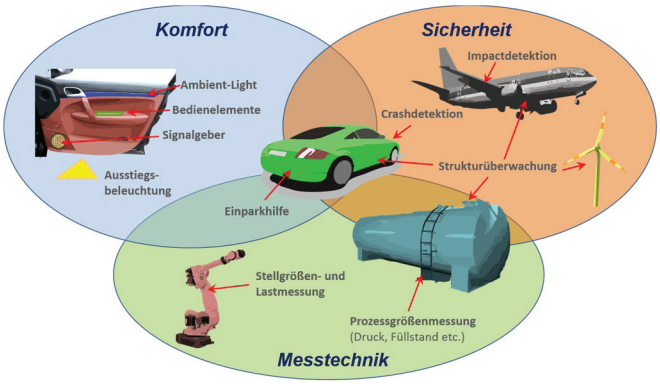

Abbildung 1: Anwendungsfelder funktionalisierter Faserverbunde mit sensorischen, aktorischen und elektronischen Komponenten (Starke [1])

Ein Beispiel für die Funktionalisierung ist die Verwendung von integrierten piezoelektrischen Wandlerarrays für Ultraschallsensorsysteme wie von Kunadt et al. [2] vorgestellt. Bisher werden dafür typischerweise kommerzielle piezoelektrische Wandler händisch in bzw. auf Verbundbauteile ein- bzw. aufgebracht. Für eine kommerzielle Verwendung solcher funktionalisierter Verbundkomponenten sind jedoch effiziente Technologien notwendig, die eine automatisierbare Produktion ermöglichen und gleichzeitig die mechanischen Eigenschaften des Bauteils nicht signifikant beeinträchtigen.

In diesem Beitrag werden zunächst der Aufbau und die Herstellung eines thermoplastischen FKVs mit einem integrierten piezoelektrischen Wandlerarray vorgestellt, das die genannten Forderungen erfüllt. Für dieses funktionalisierte Bauteil werden anschließend die akustischen Eigenschaften charakterisiert. Besonderes Augenmerk liegt hier auf den Abstrahleigenschaften. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden verschiedene Anwendungsmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen diskutiert.

Fertigung von FKV-Bauteilen mit integrierten piezoelektrischen Wandlerarrays

Für anwendungsreife Verbundstrukturen mit integrierten Wandlerarrays fehlen derzeit durchgängige Herstellungsprozesse für die Wandlerarray- und die Bauteilfertigung. Ziel ist es deshalb Gestaltungsregeln und seriengerechten Prozesse für die effiziente und reproduzierbare Fertigung zuverlässiger FKV mit integrierten Wandlerarrays zu erarbeiten. Der Ansatz hierzu ist, angepasste piezoelektrische Wandler maschinell auf einen matrixkompatiblen Zwischenträger aufzubringen und mit den erforderlichen Anschlussleitungen zu versehen. Dieser vorkonfektionierte Zwischenträger wird als „*ePreform*“ bezeichnet. Zwei ausgewählte Verfahrensvarianten für die Realisierung derartiger funktionalisierter FKV werden in Abbildung 2 dargestellt. Für duroplastische Verbunde (Abbildung 2 a)) wird eine *ePreform* z. B. auf Basis eines Vlieses aufgebaut und mit Prepreglagen (duroplastisches Halbzeug) zum gewünschten Verbundaufbau zusammengefügt und anschließend in einem Werkzeug ausgehärtet. Für thermoplastische FKV (Abbildung 2 b)) wird eine *ePreform* basierend auf einer Folie aus zum Verbundwerkstoff matrixgleichem Material aufgebaut. Diese Folie wird z. B. zusammen mit sogenannten Organoblechen (thermoplastische Halbzeuge) in einem Presswerkzeug zusammengeführt und unter Temperatur und Druck umgeformt und konsolidiert.

Speziell für die Integration von Wandlern in den thermoplastischen Verbund wurden am ILK sowohl thermoplastkompatible piezoelektrische Wandler als auch ein dafür angepasstes effiziente Fertigungsverfahren entwickelt.

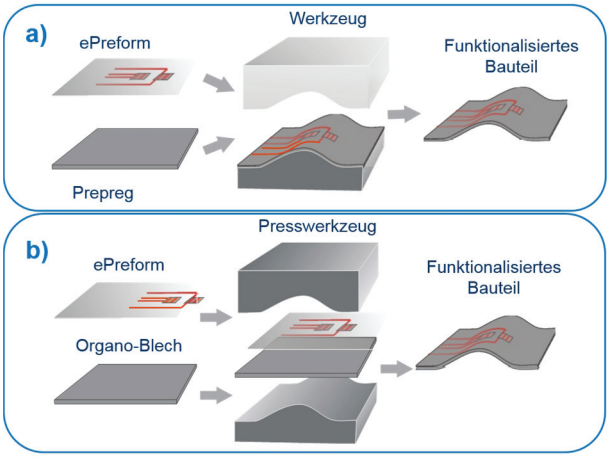

Abbildung 2: Schematische Darstellung der Herstellungsprozesse für funktionalisierte FKV mit Wandlerarrays
a) Beispielprozess für duroplastische Verbunde und
b) Beispielprozess für thermoplastische Verbunde

Eine detailliertere Beschreibung ist in Hufenbach et al. [3] zu finden. Einen Vorteil dieses Bauteilherstellungsprozesses zeigt Abbildung 3. Durch die Verwendung des thermoplastkompatiblen Wandleraufbaus werden unnötige Schichten, wie zusätzliche Isolations- oder Klebstoffschichten, vermieden. Dies führt zu einer sehr guten mechanischen Ankopplung des Wandlers an die Verstärkungsfasern, sodass nachgiebige Zwischenschichten, die eine Kraftübertragung vom/zum Wandler verringern würden, minimiert werden.

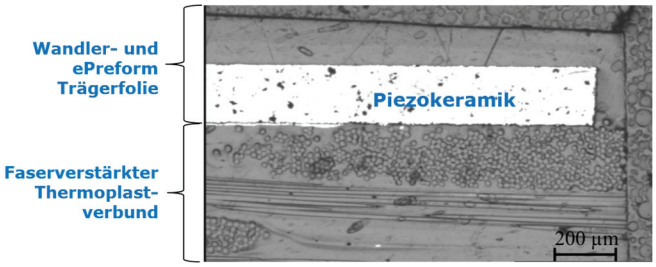

Abbildung 3: Schliffbild eines thermoplastischen FKV mit integriertem piezoelektrischem Wandler; zu erkennen ist die gute Ankopplung des Wandlers an die Verstärkungsfasern (dunkle Kreise: Fasern normal zur Blattebene)

Funktionsdemonstrator

Zur Demonstration sowohl des Fertigungsprozesses als auch einer möglichen Anwendung von funktionalisierten Bauteilen zur Erzeugung von Platten- und Schallwellen wurde ein thermoplastischer Funktionsdemonstrator aufgebaut. Hierzu wurden thermoplastkompatible Wandler bestehend aus Piezokeramikplättchen (Material: PZT 5A1, Abmessungen 10 mm Länge, 10 mm Breite, 0,2 mm Dicke), Kupferfolienstreifen (Bezeichnung: Advanced Tape AT526, 5 mm Breite, Länge ca. 50 mm) sowie 100 µm dicke Polyamid-6 (PA6)-Folie als Trägerfolie angefertigt (siehe Abbildung 4). Sechs dieser Wandler wurden mit einem Versatz von 15 mm hintereinander auf einer PA6 Trägerfolie angeordnet und fixiert. Gleichzeitig wurden die einzelnen Wandler mit den automatisiert fixierten elektrischen Zuleitungen (verzinnter Kupferdraht ⌀ 0,21 mm) kontaktiert. Für den prototypischen Verbundaufbau wurde die so entstandenen ePreform mit hitzebeständigem Klebeband auf einem Glasfaser/Polyamid6 (GF/PA6) Organoblech (1000mm x 600mm x 2mm) positioniert (siehe Abbildung 5 links unten). Die Konsolidierung erfolgte im Autoklaven bei einer Temperatur von 230°C und einem Druck von 2 bar. Für einen späteren Serienprozess sind die Verwendung von konturangepassten *ePreforms* sowie die Fertigung im Pressprozess geplant, um kurze Zykluszeiten zu erreichen.

Abbildung 5 oben rechts zeigt das Wandlerarray nach der Konsolidierung. Eine elektrische Messung der Wandlerimpedanzen zeigte keine Resonanzen im Bereich von 1 kHz bis 100 kHz. Die Kapazitäten der Wandler liegen zwischen 7,2 nF und 8 nF. In der Abbildung ist die prototypische Kontaktierung der Wandler erkennbar. Diese Lösung ist nicht serienfähig und wird aktuell weiterentwickelt. Eine weitere große Herausforderung stellt die Positioniergenauigkeit der Einzelwandler dar. Insbesondere bei einer weiteren Verkleinerung der Abstände und Erhöhung der Wandleranzahl müssen die Fixiermethoden beim *ePreform*-Aufbau und der Verbundherstellung verfeinert werden, um geringe Positionstoleranzen sicherstellen zu können.

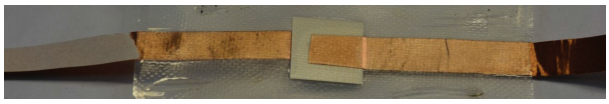

Abbildung 4: Piezoelektrischer Wandler mit Anschlussleitungen auf PA6 Trägerfolie

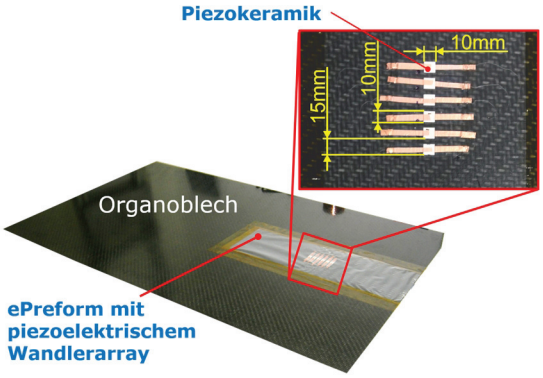

Abbildung 5: Auf Organoblech fixierte *ePreform* mit Wandlerarray vor der Konsolidierung (links unten) sowie Wandlerarray nach der Konsolidierung (rechts oben)

Gerichte Abstrahlung von Plattenwellen

Das im vorherigen Abschnitt vorgestellte Wandlerarray ermöglicht es die FKV-Struktur gezielt anzuregen. Um dies zu untersuchen, wurde die funktionalisierte FKV-Struktur, wie in Abbildung 6 gezeigt, in einem Halterahmen mittels dünner Fäden gelagert und die Oberflächengeschwindigkeit mit einem scannenden Laservibrometers (Polytec PSV-400) gemessen.

Die Anregung erfolgte mit einem gefensterten 35 kHz Burst mit vier Sinusperioden. Abbildung 7 zeigt die resultierenden Oberflächenschnellen bei einer Anregungsamplitude von 6 V_{peak}. Bei Verwendung von nur einem Wandler (Abbildung 6 ganz links) erfolgt wie erwartet eine allseitige Abstrahlung mit einer Amplitude von ca. 0,5 mm/s in 10 cm Abstand.

Ziel der Integration des Wandlerarray in die Platte war die Nutzung zur gezielten Ultraschallanregung. Hierfür müssen zunächst gerichtete Plattenwellen erzeugt werden. Um einen möglichst hohen Schalldruckpegel abstrahlen zu können, wird für die Auslegung der Arrayansteuerung als Ziel eine konstruktive Überlagerung der Einzelsignale in Hauptabstrahlrichtung definiert. Dies wird durch eine zeitversetzte Ansteuerung der Arrayelemente erreicht, sodass sich die

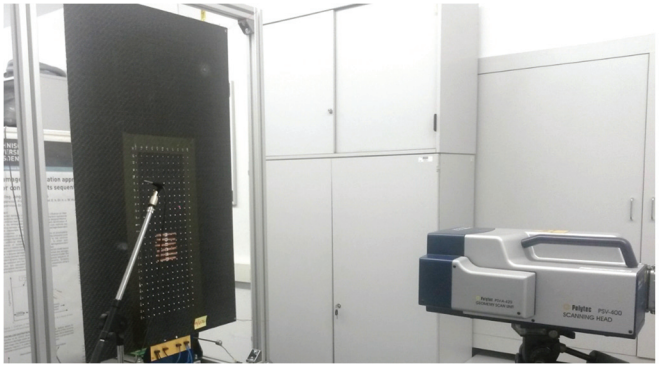

Abbildung 6: Untersuchung der Plattenwellenanregung mittels Scanning-Laservibrometer (Polytec PSV-400)

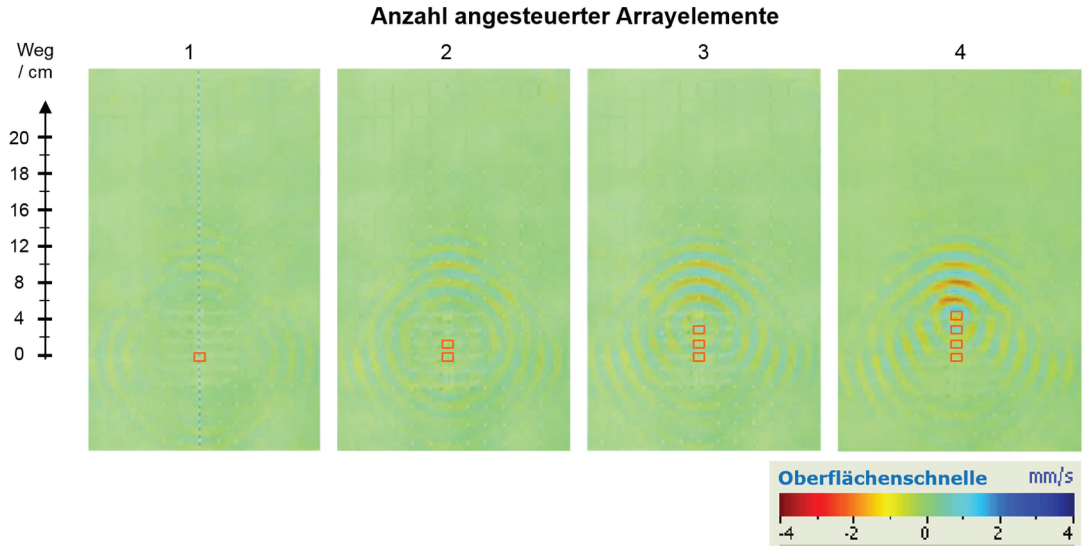

Abbildung 7: Vergleich der erzielten Plattenwellenanregung bei Verwendung von 1, 2, 3 bzw. 4 Wandler

erzeugten Plattenwellen phasenrichtig addieren. Der erforderliche Zeitversatz kann analytisch aus den Plattenwelleneigenschaften der Struktur abgeschätzt werden. Unter vereinfachter Annahme der Isotropie können für die Platte aus GF/PA6 (E=20 GPa, ρ=1800 kg/m³, ν=0,3) die in Abbildung 8 abgebildeten Dispersionskurven für Phasengeschwindigkeiten der Plattenwellen berechnet werden. Für die Schallabstrahlung ist die erste asymmetrische Plattenmode, die sogenannte A_0-Mode relevant. Für diese resultiert bei 35 kHz eine Phasengeschwindigkeit von $c_P = 640\,\mathrm{m/s}$. Mit dem Versatz der Wandler von $\Delta l = 15\,\mathrm{mm}$ folgt für die Zeitverzögerung:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{c_P} = \frac{15\,\mathrm{mm}}{640\,\mathrm{m/s}} \approx 23{,}4\,\mu\mathrm{s}\ . \qquad (1)$$

Verwendet man diesen Zeitversatz zur Ansteuerung des Arrays, so lässt sich eine deutliche Richtwirkung in die Hauptabstrahlrichtung erzielen. Abbildung 7 zeigt die unterschiedlich stark ausgeprägte Richtwirkung in Abhängigkeit der Anzahl der verwendeten Arrayelemente. Bei der Untersuchung wurde zunächst eine Maximalanzahl von vier Wandlern festgelegt. Zwei Wandler der funktionalisierten Platte blieben ungenutzt.

In Abbildung 7 rechts ist die Oberflächenschnelle bei Nutzung von vier Arrayelementen dargestellt. Es werden Amplituden von knapp 2 mm/s in 10 cm Abstand vor dem Array erreicht. Nach hinten erfolgt eine Auslöschung. Bei der gewählten Arrayauslegung hinsichtlich Wandlergröße, Wandlerversatz und Zeitversatz treten ungewollte

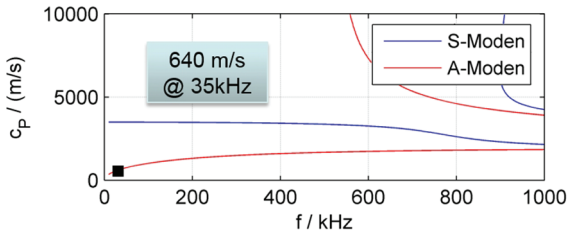

Abbildung 8: Dispersionsdiagramm für die Phasengeschwindigkeiten der Plattenwellen einer 2 mm GF/PA6 Platte (unter Annahme der Isotropie)

Nebenkeulen bei ca. ±110° auf, die durch Änderung der Arrayauslegung minimiert werden können.

Der Vergleich der Oberflächenschnellen einer Simulation unter Annahme isotroper Platteneigenschaften und einer Messung in Abbildung 9 zeigt, dass eine gute Vorhersage mit der vereinfachten isotropen Simulation getroffen werden kann. Sowohl qualitativ als auch quantitativ stimmen die Ergebnisse gut überein. Bei näherer Betrachtung ist dennoch ein Unterschied in der Form der Wellenfronten zu sehen. Hier zeigt sich in den gemessenen Daten, dass die Lage der Verstärkungsfasern (0°/90°; entspricht bezogen auf das Bild einer vertikalen/horizontalen Ausrichtung) wie erwartet zu einer richtungsabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit führt. Da die Geschwindigkeit bei 0° höher ist als bei 45° folgt eine „Abflachung" der Wellenfronten bei ±45°.

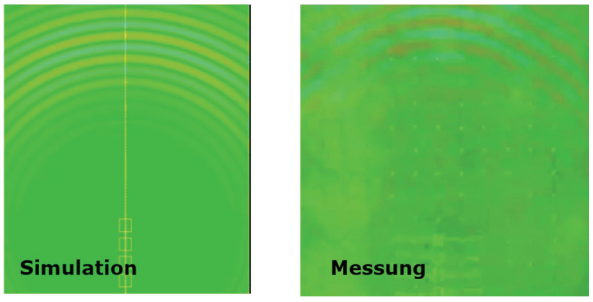

Abbildung 9: Vergleich der Oberflächenschnellen einer Simulation (isotrop) und einer Messung

Schallabstrahlung

Die Abstrahlung von Schall erfolgt durch die in der Platte laufende Biegewelle (entspricht A_0-Mode). Von dieser Biegewelle werden wie in Abbildung 11 verdeutlicht stückweise ebene Wellenfronten in die angekoppelte Luft abgestrahlt. Dies erfolgt unter dem Winkel Φ der sich aus dem Verhältnis der Wellenlänge in Luft λ_L zur Wellenlänge der Biegewelle in der Platte λ_P, bzw. analog aus den Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten c_L und c_P, wie folgt berechnen lässt:

$$\Phi = \mathrm{acos}\frac{\lambda_L}{\lambda_P} = \mathrm{acos}\frac{c_L}{c_P} = \mathrm{acos}\frac{340\,\mathrm{m/s}}{640\,\mathrm{m/s}} \approx 58°\ . \qquad (2)$$

Dieser Winkel deckt sich mit den in Abbildung 11 dargestellten Ergebnissen einer Finite-Elemente-Simulation.

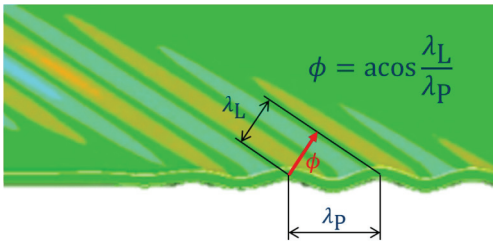

Abbildung 11: Verdeutlichung der Schallabstrahlung durch eine Plattenwelle sowie des aus dem Wellenlängenverhältnis resultierenden Abstrahlwinkels Φ (Darstellung des Schalldrucks in Luft: rot=positiv; blau=negativ)

Die Ergebnisse einer Messung der maximalen Schalldrücke in zwei Ebenen, 1 cm und 7 cm über der Platte, zeigt Abbildung 10. Hierfür wurde das Schallfeld in einem 2 cm Raster mittels eines Mikrofons (Microtech Gefell MK301) vermessen In der Ebene 1 cm über der Platte wird ein maximaler Schalldruck von 90 dB am Ende des Array erreicht. In der Ebene 7 cm über der Platte beträgt der maximale Schalldruckpegel ca. 85 dB.

Bei genauer Betrachtung der Messergebnisse wird auch die seitliche Abstrahlung von Luftschall (Nebenkeulen) deutlich. Diese wird von den weiter oben diskutierten in der Struktur auftretenden Nebenkeulen verursacht, und kann durch eine geänderte Arrayauslegung verhindert werden.

Anwendungen und Anwendungsgrenzen

Das vorgestellte werkstoffintegrierte Wandlerarray ermöglicht eine gerichtete Abstrahlung von Plattenwellen und bei entsprechender Auslegung eine Abstrahlung von Schallwellen. Der Effekt kann auch umgekehrt zum gerichteten Empfang von Plattenwellen und damit auch Schallwellen genutzt werden. Insbesondere die Abstrahlung und der Empfang von Ultraschall schafft die Möglichkeit für eine sensorische Anwendung. So könnten Systeme zur Abstandsdetektion oder auch Füllstandsmessung direkt in Anbauteile oder Behälter integriert werden. Die Systeme sparen dadurch Bauraum und sind durch die werkstoffliche Integration von externen Einflüssen geschützt. Als Voraussetzung müssen die am Anfang dieses Beitrags beschriebenen Technologien und Prozesse weiterentwickelt werden, sodass die funktionalisierten Verbunde effizient – dies beinhaltet auch kosteneffizient – herstellbar sind sowie eine hohe Langzeitzuverlässigkeit aufweisen. Einen interessanten Aspekt stellt die Anisotropie des Verbundes dar. Diese könnte bei geschickter Auslegung als zusätzlicher Freiheitsgrad zur Beeinflussung der Richtwirkung genutzt werden.

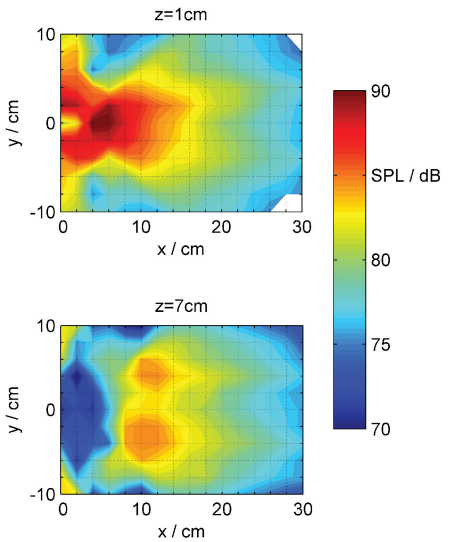

Abbildung 10: Gemessener maximaler Schalldruckpegel in den Ebenen 1 cm bzw. 7 cm über der Platte

Für eine Anwendung im Bereich Ultraschallmesstechnik ist zu beachten, dass die erforderlichen Übertragungsfaktoren nur bei konsequenter Nutzung von Arrayanordnungen erreichbar sind. Weiterhin stellt die FKV-Platte selbst den mechanisch-akustischen Wandler dar, sodass alle Quereinflüsse, die die Wellenausbreitungseigenschaften der Platte ändern auch direkten Einfluss auf die Eigenschaften des Messsystems haben. Um dies auszugleichen sind Methoden zur Selbstkalibrierung bzw. Kompensation erforderlich. Zusätzlich ist die Körperschallkopplung der Sende- und Empfangssysteme zu berücksichtigen.

Bei der Fertigung des funktionalisierten Faserverbunds ergeben sich Beschränkungen durch auf die Funktionselemente angepasste Prozessbedingungen. Durch die Randbedingungen des Herstellungsprozesses erlaubt nicht jede Faser-Matrix-Kombination sensorische, aktorische und elektronische Systeme effizient und zuverlässig zu integrieren.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die Funktionalisierung von Faserverbundstrukturen durch werkstoffintegrierte piezoelektrische Wandlerarrays sowie Ansätze für eine effiziente Herstellung solcher Systeme vorgestellt. Zur Verdeutlichung wurde anschließend die Herstellung eines Funktionsdemonstrators beschrieben sowie die gerichtete Abstrahlung von Platten- und Schallwellen anhand von Mess- und Simulationsergebnissen gezeigt und diskutiert.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 639, Teilprojekt D3, sowie des Sonderforschungsbereiches/Transregios 39 PT-PIESA, Teilprojekte A05, B04 und T03.

Literatur

[1] Starke, E.: Sensor- und Elektronikintegration in Faserverbundstrukturen, 20. Workshop Smart Monitoring Systems, Chemnitz, 24. Sept. 2014

[2] Kunadt, A., Pfeifer, G., Fischer W.-J.: Ultrasonic Flow Meter with Piezoelectric Transducer Arrays Integrated in the Walls of a Fiber-Reinforced Composite Duct, IEEE Sensors, Taipei, 28-31 Oct. 2012

[3] Hufenbach, W., Gude, M., Modler, N., Heber, Th., Winkler, A., Weber, T.: Process chain modelling and analysis for the high-volume production of thermoplastic composites with embedded piezoceramic modules, Smart Materials Research, 2013