

Experimentelle und numerische Untersuchungen von textilverstärkten thermoplastischen Verbundwerkstoffen mit eingebetteten piezoelektrischen Sensor-Aktor-Arrays hinsichtlich der gerichteten Abstrahlung von akustischen Wellen

Anja Winkler^{1,*}, Martin Dannemann¹, Klaudiusz Holeczek¹, Eric Starke^{1,+}, Niels Modler¹, Manuel Weiß², Stefan J. Rupitsch²

¹Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), Technische Universität Dresden, 01307 Dresden

²Lehrstuhl für Sensorik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 91052 Erlangen

*E-Mail: anja.winkler@tu-dresden.de; +bis 2016 wiss. Mitarbeiter am ILK

Einleitung

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) ermöglichen durch ihren schichtweisen Aufbau sowie durch die spezifischen Herstellungsprozesse die Integration von Sensoren und Aktoren in den Verbundaufbau. Hierdurch können zahlreiche neuartige Bauteilfunktionalitäten wie etwa Abstands- oder Durchflussmesssysteme erschlossen werden. Dabei kann durch die Integration mehrerer äquidistant verteilter piezoelektrischer Aktoren sowie deren gezielte zeitversetzte Ansteuerung eine gerichtete Plattenwelle erzeugt werden [1, 2]. Die Plattenwellen wiederum strahlen unter einem definierten Winkel zur Plattenoberfläche Schall ab, der durch das umgebende Medium propagiert [3]. Eine entsprechende Auswertung der eingekoppelten Plattenwellen, die durch Teilreflexionen von einem Hindernis hervorgerufen werden, ermöglicht die Realisierung einer Abstandsmessfunktionalität. Auf ähnliche Weise können auch Wellen, die durch ein sich bewegendes Medium propagieren, analysiert werden, um daraus z. B. Rückschlüsse auf die Durchflussmenge zu ziehen.

Im vorliegenden Manuskript wird die experimentelle Erfassung abgestrahlter Ultraschallwellen am Beispiel einer Demonstratorstruktur mit integriertem piezokeramischen Wandlerarray behandelt. Hierfür wurde mit einer Messvorrichtung punktweise das von der Versuchsplatte abgestrahlte Schallfeld ermittelt. Im Rahmen der anschließenden Visualisierung können die Betrachtungsebenen räumlich und zeitlich frei gewählt werden

Auslegung und Herstellung einer Struktur mit integriertem Wandlerarray

Die Demonstratorstruktur besteht aus einem glasfaserverstärkten Polyamid (PA) mit zwei integrierten Wandlerarrays. Jedes der Wandlerarrays besteht aus vier Einzelmodulen mit einer Größe von 10 mm x 10 mm x 0,2 mm im Abstand von 5 mm zueinander (Abb. 1). Die Fertigung der Demonstratorstruktur erfolgte in einem Autoklavprozess unter Nutzung von vorkonfektionierten Funktionsschichten (sog. ePreform, vgl. etwa [4]). Hierfür wurde eine 2 mm dicke textilverstärkte Faserverbundplatte (TEPEX®102 RG600(x) 47 %, LANXESS Deutschland GmbH (BondLaminates)) als Tragstruktur eingesetzt. Im Autoklav erfolgte bei einer Temperatur von 270 °C und einem Druck von 5 bar die Verschmelzung der artgleichen thermoplastischen Komponenten – Faserverbundmatrix, ePreform und Trägerfolie der Piezokeramikmo-

dule. Somit wurden die Piezokeramikmodule in die Faserverbundstruktur integriert.

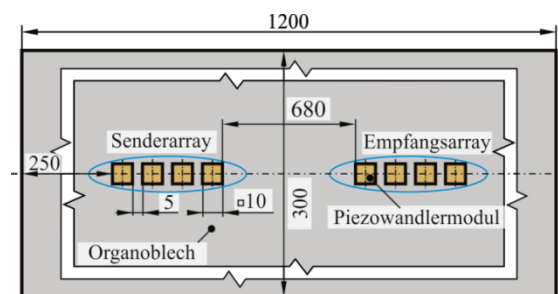


Abbildung 1 Geometrische Konfiguration der untersuchten Platte (in mm).

Abbildung 2 zeigt den Sendebereich der Demonstratorstruktur. Darauf sind die vier oberflächennah integrierten Piezomodulare (thermoplastverbundkompatible Piezokeramikmodule – TPM) mit den flächigen Elektroden, die ePreform (weiß umrandeter Bereich) sowie die weitere Kontaktierung zur Verbindung der Struktur mit dem Messaufbau (Drähte, Lüsterklemmleiste) zu erkennen.

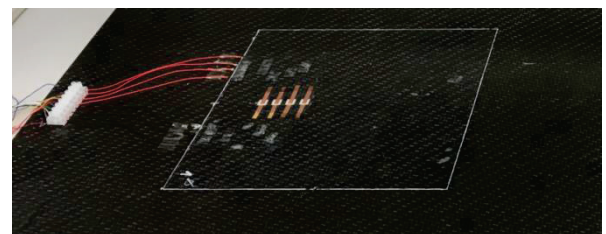


Abbildung 2 Faserverbundplatte mit TPM-Array.

Experimentelle Erfassung der abgestrahlten Ultraschallwellen

Zum Nachweis der Funktionalität des piezokeramischen Wandlerarrays und zur Bestätigung der theoretischen Betrachtungen zur gerichteten Schallabstrahlung wurde das abgestrahlte Schallfeld in einem reflexionsarmen Raum (Lehrstuhl für Sensorik, FAU) experimentell untersucht (siehe Abb. 3). Hierzu wurde das von den vier integrierten piezoelektrischen Ultraschallwandlern ① erzeugte Schallfeld mit einem 1/8 Zoll G.R.A.S. Mikrophon ② erfasst. Das Mikrophon wurde mit einer Schrittweite von 2,5 mm durch eine ISEL- Traverse ③ in der xy-Ebene verfahren. Ein Mikrophonverstärker ④ (B&K Nexus) filterte das Mikrophonsignal (Bandpass: 20 kHz – 100 kHz) und stellte dieses dem Datenerfassungssystem ⑤ (National Instruments PXI) zur Verfügung.

Mit einem LabVIEW-Programm erfolgte die Datenerfassung, Steuerung der Traverse und die zeitversetzte Ansteuerung der einzelnen piezoelektrischen Wandler.

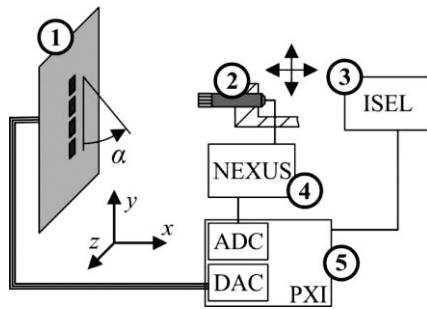


Abbildung 3 Skizze des Versuchsaufbaus zur experimentellen Bestimmung der Abstrahlcharakteristik des piezoelektrischen Wandlerarrays.

Die verwendeten Ansteuersignale hatten folgende Eigenschaften:

- Frequenz: 35 kHz (mit 1.000.000 Samples/s)
- 4 Perioden (mit Hann-Fensterung)
- Spannungsamplitude: 15 V
- Zeitdifferenz zwischen den einzelnen Ansteuersignalen: $\Delta t = 21,7 \mu s$

Der zu erwartende Abstrahlwinkel α im Untersuchungsgebiet

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\Delta t \cdot c}{l}\right) \approx 60^\circ$$

ergibt sich aus dem Mittelpunktabstand l der Einzelwandler ($l = 15 \text{ mm}$) und der Schallgeschwindigkeit c in Luft ($c = 346 \text{ m/s}$, bei 25°C) [5].

Zur Veranschaulichung der Abstrahleigenschaften des Wandlerarrays zeigt Abb. 4 den Schalldruck p (Pa) entlang der xy -Ebene zum Zeitpunkt $t = 400 \mu s$.

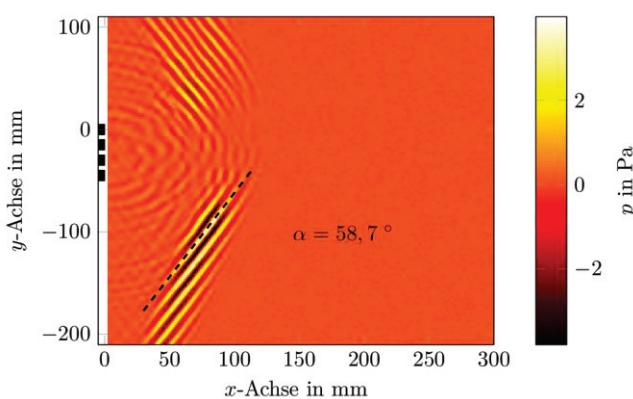


Abbildung 4: Schalldruck p bei einem Zeitversatz von $\Delta t = 21,7 \mu s$ zur Anregung des optimalen Abstrahlwinkels $\alpha = 60^\circ$ in der xy -Ebene zum Zeitpunkt $t = 400 \mu s$.

Die vier eingezeichneten, schwarz gefüllten Rechtecke kennzeichnen die Wandlerpositionen. Die Messung zeigte, dass eine gerichtete Ausbreitung mit $\alpha = 58,7^\circ$ erfolgt. Neben der Hauptausbreitung wurde eine Wellenausbreitung in die positive y -Richtung mit niedriger Amplitude festgestellt,

welche für Anwendungen wie Abstandsmessung und Durchflussmessung aufgrund der entgegengesetzten Ausbreitungsrichtung vernachlässigbar ist. Somit konnte die Funktionalität des Wandlerarrays nachgewiesen werden.

Um die Vorüberlegungen zu den Abstrahleigenschaften des Wandlerarrays zu stützen, wurde beispielhaft ein theoretischer Abstrahlwinkel von $\alpha = 30^\circ$ angestrebt (siehe Abb. 5). Hierfür wurden die Signale mit einem Zeitversatz von $\Delta t_{30} = 37,5 \mu s$ angesteuert. Es bestätigte sich, dass – anders als bei klassischen Ultraschallarrays, die direkt den Schall in Luft abstrahlen – Abstrahlwinkel $\alpha \neq 60^\circ$ nicht durch das Wandlerarray realisiert werden können. Stattdessen bildete sich in diesem Fall hauptsächlich eine gerichtete Ausbreitung in die positive y -Richtung aus.

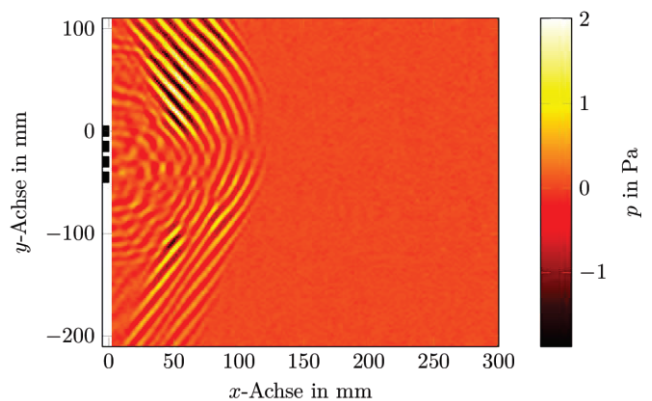


Abbildung 5 Schalldruck p bei einem Zeitversatz von $\Delta t = 37,5 \mu s$ zur Anregung eines Abstrahlwinkels $\alpha = 30^\circ$ in der xy -Ebene zum Zeitpunkt $t = 400 \mu s$.

Im Weiteren wird zur Untersuchung der Abstrahlcharakteristik über die xy -Ebene nun der Schalldruckpegel L_p (dB) [5]

$$L_p = 20 \cdot \log_{10}(p_{\text{rms}}/20 \mu\text{Pa}) \log_{10}(p_{\text{rms}}/20 \mu\text{Pa}) \text{ dB}$$

der Mikrofonssignale im Frequenzbereich p_{rms} (Fast-Fourier-Transformation) über die gesamte Messdauer ($t_m = 1 \text{ ms}$) für $\alpha = 60^\circ$ betrachtet (siehe Abb. 6). Es zeigte sich, dass sich das Schallfeld ($f = 35 \text{ kHz}$) insbesondere auf den Bereich unterhalb der weißen, gestrichelten Linie beschränkt. Im restlichen untersuchten Gebiet konnten nur lokal entsprechende Frequenzanteile festgestellt werden.

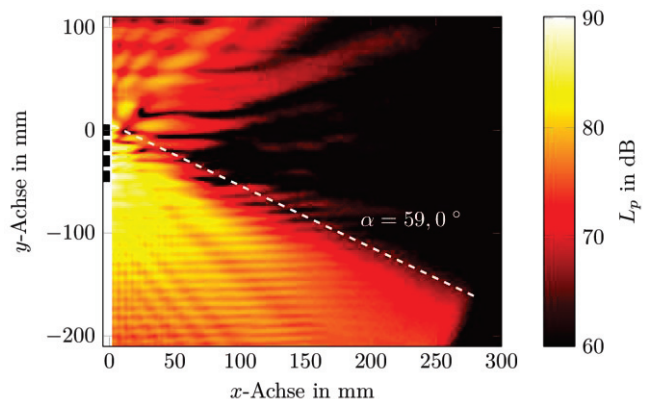


Abbildung 6 Schalldruckpegel L_p (dB) bei einem Zeitversatz von $\Delta t = 21,7 \mu s$ zur Anregung des optimalen Abstrahlwinkels $\alpha = 60^\circ$ in der xy -Ebene bei $f = 35 \text{ kHz}$.

Numerische Untersuchungen zur Erzeugung eines gerichteten Schallfelds

Die anwendungsbezogene Auslegung und funktionspezifische Optimierung integrierter Wandlerarrays für die Erzeugung eines gerichteten Schallfelds erfolgt mit Hilfe einer Simulation in der kommerziell verfügbaren Finite-Elemente-Simulationsumgebung ANSYS. Hierfür wurde ein zweidimensionales Modell erstellt, das einen Schnitt der betrachteten Platte in der Wandlerarrayebene abbildet. Die Abmessungen, Randbedingungen sowie Elementtypen sind in Abb. 7 schematisch dargestellt. Es wurden 200 Schritte der gekoppelten akusto-mechano-elektrischen Transientenanalyse simuliert. Dabei wurden Elemente vom Typ PLANE13, FLUID29 und PLANE42 genutzt [6]. Die Materialeigenschaften der einzelnen Bestandteile sowie der Ansteuermodus des Wandlerarrays wurden analog zum Experiment festgelegt.

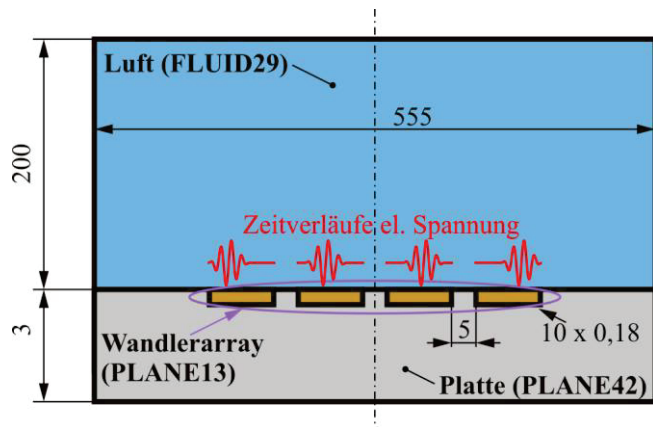


Abbildung 7 Konfiguration des aufgebauten FE-Modells und Elementtypen für die Simulation der Erzeugung eines gerichteten Schallfelds mithilfe des integrierten Wandlerarrays (nicht maßstabgerecht).

In Abb. 8 sind die berechnete Schalldruckverteilung sowie der resultierende Abstrahlwinkel dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Winkel unter welchem sich die Schallwelle ausbreitet eine sehr gute Übereinstimmung zum experimentell ermittelten Wert darstellt.

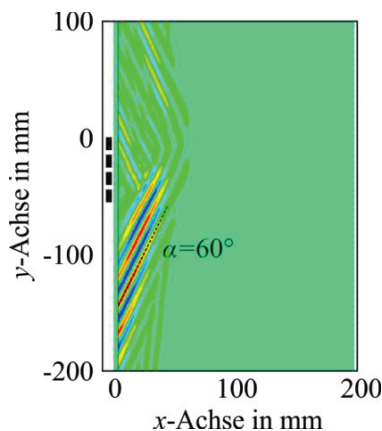


Abbildung 8 Darstellung der Schallabstrahlung durch eine gerichtete Plattenwelle sowie des aus dem Wellenlängenverhältnis resultierender Abstrahlwinkels α (Darstellung des Schalldrucks in Luft: rot=positiv; blau=negativ).

Konzeption und Aufbau eines Abstandsmesssystems

Ein mögliches Anwendungsfeld funktionsintegrierter Faser-Kunststoff-Verbunde stellt die Nahbereichsabstandsmessung dar. Dafür sind Kenntnisse zur Ausbreitung von Oberflächenwellen und der Interaktion abgestrahlter Schallwellen mit Gegenständen in der Umgebung zwingend notwendig. Die Bestimmung des Abstands zur reflektierenden Oberfläche erfolgt dabei durch die Analyse der Laufzeiten der ausgesendeten und empfangenen Wellenpakete. Abb. 9 stellt schematisch das Konzept eines derartigen Systems dar.

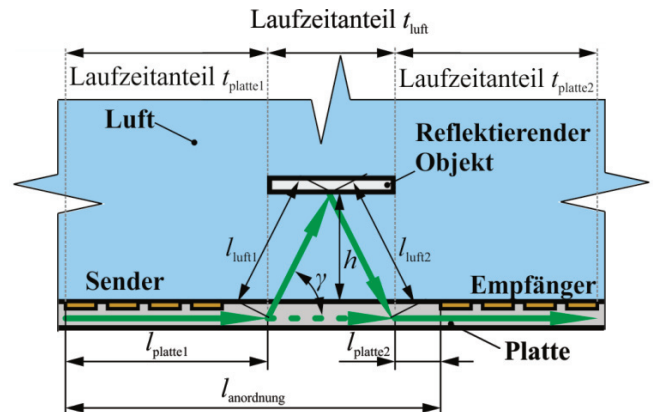


Abbildung 9 Schematische Darstellung der Laufzeitanteile von Plattenwellen und Schallwellen bei der Nahbereichsabstandsmessung (nicht maßstabgerecht).

Die Laufzeit der Welle in der Plattenstruktur lässt sich aus dem Arrayabstand $l_{anordnung}$, dem Abstrahlwinkel γ , dem Abstand h zum reflektierenden Objekt und der Phasengeschwindigkeit c_p der Welle in der Platte berechnen als:

$$t_{platte} = \frac{l_{anordnung} - \frac{2h}{\tan \gamma}}{c_p} \quad (1)$$

Für die Berechnung des Laufzeitanteils der Welle in Luft ist zusätzlich die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit c_s in Luft notwendig:

$$t_{luft} = \frac{2h}{c_s \sin \gamma} \quad (2)$$

Aus der Summe der Zeiten t_{platte} und t_{luft} ergibt sich die Gesamtlaufzeit der Welle. Unter Kenntnis der Geometrie der Sensor-Aktor-Anordnung und der Ausbreitungsgeschwindigkeiten lässt sich dann mit Hilfe dieser Zusammenhänge der Messobjektabstand aus den gemessenen Laufzeiten berechnen:

$$h = \frac{t_{platte} + t_{luft} - \frac{l_{anordnung}}{c_p}}{2 \left(\frac{1}{c_s \sin \gamma} - \frac{1}{c_p \tan \gamma} \right)} \quad (3)$$

Die experimentellen Untersuchungen für die Bestätigung des Messkonzeptes erfolgten an der bereits hergestellten Demonstratorstruktur. Der Versuchsaufbau orientierte sich an der in Abb. 9 dargestellten Konfiguration. Als reflektierendes Objekt wurde ein Aluminiumblech (300 mm x 150 mm x 3 mm) verwendet, das sich in einem beliebigen Abstand zur Demonstratorstruktur positionieren lässt. Für die Anregung der Plattenwellen wurde ein gefensterter 35 kHz Burst mit vier Sinusperioden verwendet. Die Aufzeichnung der reflektierten

tierten Wellen erfolgte mittels des Empfängerarrays. In Abb. 10 ist beispielhaft ein aufgezeichnetes Signal dargestellt.

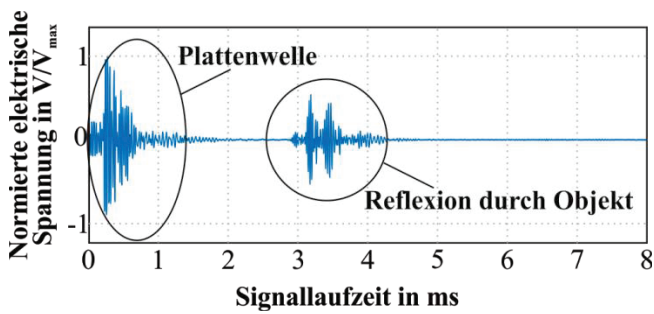


Abbildung 10 Beispiel eines durch einen Wandler des Empfängerarrays aufgezeichneten Signals.

Es lassen sich sowohl die Wellen, die direkt durch die Demonstratorstruktur propagieren als auch die Wellen, die durch die Reflexion vom Objekt hervorgerufen werden, identifizieren. In weiteren theoretischen Betrachtungen wurden die Messgrenzen des Abstandmesssystems mit integrierten piezokeramischen Wandlerarrays abgeschätzt.

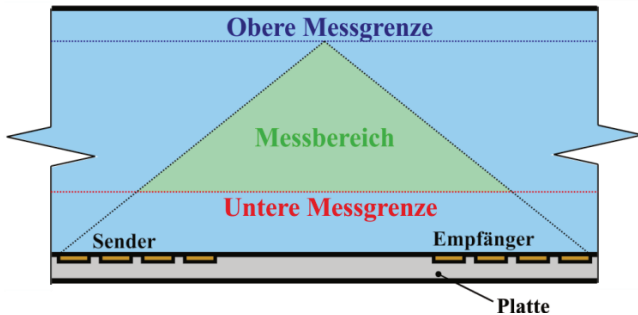


Abbildung 11 Schematische Darstellung des Messbereiches der Demonstratorstruktur.

Die Einschränkung des Messbereiches obliegt zwei unterschiedlichen Gründen, die die Ober- und Untergrenzen für die Messung des Abstandes definieren. Aufgrund der Tatsache, dass die Schallwellen in einem definierten Winkel von der Struktur abgestrahlt werden, ergeben sich Bereiche vor der Demonstratorstruktur, die nicht vom Abstandmesssystem erfasst werden können. Damit nimmt, wie in Abb. 11 zu sehen, der Messbereich mit zunehmender Abstandsweite des Messobjektes ab. Bei einer bestimmter Abstandsweite kann die Reflexion theoretisch gesehen nur an einem Punkt so erfolgen, dass die reflektierten Wellenpakete wieder auf dem Empfängerarray auftreffen. Mit zunehmender Abstandsweite treffen die reflektierten Wellenpakete nicht mehr auf der Plattenstruktur auf. Die Untergrenze des Abstandmesssystems wird durch die Laufzeit der Plattenwelle zwischen den Sender- und Empfängerarrays definiert. Um das Signal der reflektierten Welle eindeutig von dem Signal der Plattenwelle zu unterscheiden, darf keine Überlagerung der beiden Wellensignale vorliegen. Daraus kann eine minimale Signallaufzeit der reflektierten Wellenpakete definiert werden, die anschließend in eine Untergrenze des Messsystems umgerechnet werden kann.

Fazit

Die dargestellten Untersuchungen zeigen neben der Fertigbarkeit von Faserverbundstrukturen mit integrierten piezokeramischen Wandlerarrays insbesondere die hiermit realisierbare gerichtete Abstrahlung von Ultraschallwellen. Hierfür werden die einzelnen Wandlermodule innerhalb eines Arrays zeitversetzt angesteuert. Diese gerichtete Abstrahlung konnte sowohl in Simulationen als auch im Experiment nachgewiesen werden. Mittels einer Demonstratorstruktur mit zwei integrierten Wandlerarrays (Sende- und Empfängerarray) konnte eine auf gerichteter Abstrahlung basierende Funktionalität der Abstandsmessung realisiert werden. Hierfür wurden die Laufzeiten unterschiedlicher Wellenanteile messtechnisch erfasst und ausgewertet.

Literatur

- [1] Holeczek, K.; Starke, E.; Winkler, A.; Dannemann, M.; Modler, N.: Numerical and experimental characterisation of fibre-reinforced thermoplastic composite structures with embedded piezoelectric sensor-actuator-arrays for ultrasonic applications. *Applied Sciences*, 55 (2016) 6.
- [2] Starke, E.; Dannemann, M.; Winkler, A.; Holeczek, K.; Modler, N.: Herstellung und Charakterisierung von Faserverbundstrukturen mit integrierten piezoelektrischen Wandlerarrays für die gerichtete Abstrahlung von Ultraschall. Tagungsband 41. Jahrestagung für Akustik- DAGA, Nürnberg, 16.-19.03, 2015.
- [3] Winkler, A.; Modler, N.; Dannemann, M.; Starke, E.; Holeczek, K.: Aktive faserverstärkte Thermoplastverbunde mit materialhomogen integrierten Piezokeramikmodulen – ein Ausblick. In: *Proceedings of 4SMARTS, Symposium für Smarte Strukturen und Systeme – 4SMARTS*, Darmstadt, 06.-07.04, 2016.
- [4] Hufenbach, W.; Modler, N.; Winkler, A.: Experimentelle Studien zur Entwicklung einer neuartigen e-preforming-Technologie für die großseriengerechte Fertigung aktiver Thermoplastverbundstrukturen. In: *Tagungsband Verbundwerkstoffe: 19. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*, Karlsruhe, 03.-05.07., 2013
- [5] Lerch, R; Sessler, G; Wolf, D: *Technische Akustik – Grundlagen und Anwendungen*. Springer-Verlag, 2009.
- [6] ANSYS® Academic Research, Release 12.1, Help System, Element Reference: I. Element Library, ANSYS, Inc.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Arbeiten im Rahmen des Transregio TR39 PT-PIESA (Teilprojekte B04, T03 und C06). Herrn Martin Nebe danken wir für die Durchführung der Experimente und die Unterstützung bei der Datenauswertung.