

Lokal strukturierte Faserverstärkungen: Ein Ansatz zur Realisierung anisotroper Richtcharakteristiken in Ultraschallsensoren

Johannes Henneberg^a, André Gerlach^b, Holger Cebulla^c, Steffen Marburg^d

^a Robert Bosch GmbH Email: johannes.henneberg@de.bosch.com

^b Robert Bosch GmbH, Forschung, Akustik

^c Technische Universität Chemnitz, Professur Textile Technologien

^d TU München, Lehrstuhl für Akustik mobiler Systeme

Einleitung

Ultraschallsensoren werden in automobilen und industriellen Anwendungen zur Umfeldsensierung eingesetzt. Durch den wachsenden Automatisierungsgrad in automobilen und robotischen Anwendungen, steigt die Nachfrage nach Sensoren zur Umfeldsensierung kontinuierlich. Heutige Ultraschallsensoren in automobilen Anwendungsbereichen sind als metallbasierte Topfwandler ausgeführt [1]. Die elektro-mechanische Kopplung wird mit Hilfe eines piezokeramischen Elements realisiert. Zur Steigerung der Fernmessfähigkeit besitzen diese Ultraschallsensoren anisotrope Richtcharakteristiken. Diese weisen einen großen Öffnungswinkel in horizontaler Ebene und kleine Öffnungswinkel in vertikaler Ebene auf. In [1] werden geometrische Gestaltungen des Wandlertopfs zur Realisierung solcher Richtcharakteristiken vorgeschlagen. Eine anisotrope Richtcharakteristik wird überwiegend durch lokale Materialanhäufung auf der Innenseite der schwingenden plattenähnlichen Struktur erzielt. Die Anisotropie kann durch das Einbringen von Schlitzen in der Seitenwand verstärkt werden, wie in [2] gezeigt wird. Der Einfluss veränderter Randbedingungen auf die Richtcharakteristik wird in [3] untersucht. In [4] wird der Aufbau und das Schallabstrahlungsverhalten eines thermoakustischen Wandlers untersucht. Die Modellierung eines achsensymmetrischen, piezoelektrischen Ultraschallwandlers mittels finiter Elemente wird in [5] untersucht. Die Schallabstrahlung von Ultraschall in Fluide und Festkörper steht im Fokus der Untersuchungen.

Die vorliegende Arbeit untersucht ein neuartiges Konzept zur Realisierung von Ultraschallwandlern auf Basis von Faserverbundwerkstoffen. Anstelle metallischer Werkstoffe werden faserverstärkte Kunststoffe zur Herstellung des Wandlertopfs eingesetzt. Die elektro-mechanische Kopplung wird, wie aus dem Stand der Technik bekannt, mit Hilfe einer piezoelektrischen Keramik realisiert. Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen eröffnet die Möglichkeit das dynamische Verhalten von Komponenten durch die Auswahl und Anpassung der Faserverstärkung zu beeinflussen. In der Literatur gibt es Untersuchungen zur Schallabstrahlung und zum Schalldurchgang von faserverstärkten Platten [6, 7, 8]. Die vorliegende Arbeit untersucht die Möglichkeit anisotrope Richtcharakteristiken in Ultraschallwandlern durch die lokale Strukturierung von Faserverstärkungen zu erzielen. Die Strukturierung wird durch Bereiche mit koh-

lenstofffaserverstärkten Epoxidharzen und Bereiche unverstärkter Epoxidharze realisiert.

Richtcharakteristik im Fernfeld

Das Schallabstrahlungsverhalten von Ultraschallsensoren wird im sogenannten Fernfeld berechnet. Der Schalldruck p kann mit Hilfe des Rayleigh Integrals berechnet werden [9, 10]. Dafür wird der Ultraschallwandler als Schallsender in einer ebenen, unendlich ausgedehnten, schallharten Ebene angenommen. Unter diesen Bedingungen liefert das Rayleigh Integral die exakte Lösung des Schalldrucks im Halbraum vor dem Schallwandler [11]. Diese Randbedingungen werden in der Einbausituation eines Ultraschallsensor im Fahrzeugstoßfänger in erster Näherung erfüllt. Das Rayleigh Integral stellt somit eine geeignete Methode dar, das Schallabstrahlungsverhalten und die Richtcharakteristik eines Ultraschallsensors zu approximieren. In [12] werden drei Bedingungen benannt unter welchen die Fernfeldannahme gilt. Als erstes muss der Abstand R zwischen Strahler und Feldpunkt groß im Vergleich zur Strahlerabmessung l sein

$$R \gg l. \quad (1)$$

Um eine Phasenverschiebung kleiner gleich $\frac{\pi}{4}$ zu gewährleisten, muss die Bedingung

$$\frac{l}{\lambda} \ll \frac{R}{l} \quad (2)$$

erfüllt sein. Des Weiteren muss der Abstand zwischen Strahler und Aufpunkt groß im Vergleich zur Wellenlänge sein

$$R \gg \lambda. \quad (3)$$

In den nachfolgenden Untersuchungen wird der Schalldruck bei $R = 1$ m bestimmt. In diesem Fall sind die Fernfeldbedingungen für die untersuchten Modelle erfüllt.

Das Rayleigh Integral für eine ebene Oberfläche für eine zeitharmonische Abhängigkeit $e^{i\omega t}$ wird durch

$$p(\vec{y}) = \int_{\Gamma} -i \omega \rho_f G(\vec{x}, \vec{y}) \nu_f(\vec{x}) d\Gamma(\vec{x}) \quad (4)$$

mit

$$\text{with } G(\vec{x}, \vec{y}) = \frac{e^{-i k r}}{2 \pi r} \text{ and } r = |\vec{x} - \vec{y}|, \quad (5)$$

beschrieben [13]. Wobei Γ , ρ_f , ω , ν_f , k , i die schallabstrahlende Oberfläche, die Fluidichte, die Kreisfrequenz, die Fluidpartikeldichte, die Wellenzahl und die imaginäre Einheit beschreiben.

Eine Approximation des Schalldrucks im Fernfeld, ausgedrückt in Zylinderkoordinaten $((R, \vartheta, \varphi))$ ist in [12] mit

$$p(R, \vartheta, \varphi) = \frac{i \omega \rho_f}{2\pi R} e^{-ikR} \dots \int_{-l_y/2}^{l_y/2} \int_{-l_x/2}^{l_x/2} e^{i k \cdot Z(x_Q, y_Q)} v(x_Q, y_Q) dx_Q dy_Q \quad (6)$$

beschrieben, wobei $Z(x_Q, y_Q)$ durch

$$Z(x_Q, y_Q) = x_Q \sin \vartheta \cos \varrho + y_Q \sin \vartheta \sin \varrho \quad (7)$$

definiert ist.

Die Richtcharakteristik eines Ultraschallsensors erfordert einen großen Öffnungswinkel in horizontaler Ebene und einen kleinen in vertikaler Ebene. Der Öffnungswinkel ist definiert als Winkel bei dem ein Schalldruckabfall von -6 dB auftritt. Referenz ist der maximal abgestrahlte Schalldruck des Ultraschallwandlers. Der Winkel ist als der zwischen einer Referenzachse und einer Feldpunktachse definiert. Dabei verläuft die Referenzachse durch den Oberflächenmittelpunkt und ist senkrecht zur schallabstrahlenden Oberfläche. Die Feldpunktachse verläuft kollinear zum Vektor zwischen Oberflächenmittelpunkt und Feldpunkt. Da ein -6 dB Abfall zweimal vorhanden ist, wird der Öffnungswinkel als Summe der betragsmäßigen Winkel angegeben. Der Grad der Anisotropie der Richtcharakteristik wird durch einen Anisotropiefaktor α ausgedrückt. Dieser ist definiert durch

$$\alpha = \frac{\phi_{H,-6 \text{ dB}}}{\phi_{V,-6 \text{ dB}}}, \quad (8)$$

wobei $\phi_{H,-6 \text{ dB}}$ und $\phi_{V,-6 \text{ dB}}$ den horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel bezeichnen.

Modelle

Das Schallabstrahlungsverhalten von Ultraschallsensoren basierend auf Faserverbundwerkstoffen wird in einem vereinfachten Ultraschallwandler untersucht, der den Wandlertopf des Sensors repräsentiert. Dafür wird ein finites Elemente Modell aufgebaut. In einer harmonischen Analyse wird das dynamische Verhalten der Struktur ermittelt. Die Anregung des Wandlertopfes wird äquivalent zum Sendebetrieb des Ultraschallwandlers, durch das Anlegen einer elektrischen Spannung an die Elektroden der piezoelektrischen Keramik realisiert. Im Resonanzfall wird mit Hilfe des Rayleigh Integrals die Schallabstrahlung aus der Oberflächenschnelle berechnet. Zunächst wird ein Referenzmodell untersucht. Dieses enthält ein Kohlenstoffgewebe in Leinwandbindung ohne Strukturierung, Abbildung 1.

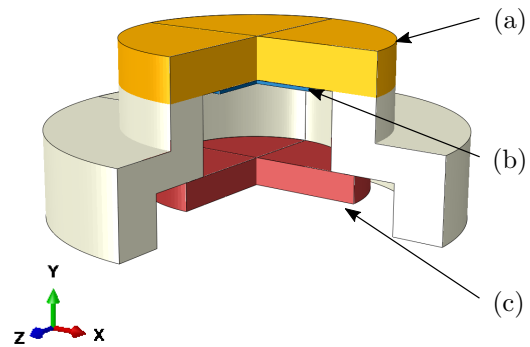


Abbildung 1: Referenzmodell ohne lokale Strukturierung der Faserverstärkung. (a) Faserverstärkte, schallabstrahlende Struktur. (b) piezoelektrische Keramik zur elektromechanischen Kopplung. (c) Leiterplatte.

Anschließend werden zwei unterschiedliche Designvarianten der Faserstrukturierung untersucht. Die erste Variante sieht halbkreisförmige Aussparungen der Faserverstärkung vor, siehe Abbildung 2 (a). Die zweite Strukturierung ist derart gestaltet, dass ein Bereich ohne Faserwerkstoff in Streifenform durch das Zentrum der schallabstrahlenden Struktur verläuft, Abbildung 2 (b).

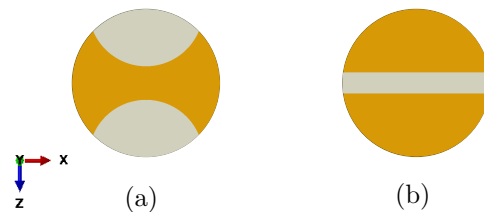


Abbildung 2: Strukturierungen der Faserverstärkung in der schallabstrahlenden Fläche. (a) Halbkreisförmige Strukturierung. (b) Strukturierung der Faserverstärkung mit Epoxidharzstreifen.

Beide Strukturierungsvarianten werden jeweils in zwei Ausführungsvarianten untersucht. Diese unterscheiden sich durch die Wahl des textilen Halbzeugs. Es wird zum Einen ein Kohlenstoffgewebe in Leinwandbindung und zum Anderen ein unidirektionales Gelege aus Kohlenstofffasern verwendet. Dadurch ergeben sich vier Designvarianten, wie in Tabelle 1.

Tabelle 1: Tabelle der untersuchten Designvarianten.

Strukturierung	Faserhalbzeug	
	Gewebe (WF)	Gelege (UD)
(a)	(a-WF)	(a-UD)
(b)	(b-WF)	(b-UD)

Im Falle der Verstärkung mit einem Gewebe entspricht die Orientierung der Kett- und Schussfäden der X- bzw. Y-Richtung des Koordinatensystems. Bei der Verstärkung mit einem unidirektionalen Gelege entspricht die Faserorientierung der X-Richtung und verläuft somit parallel zum Streifen aus Epoxidharz.

Ergebnisse

Im Folgenden sind die Richtcharakteristiken der untersuchten Varianten in Form von Polardiagrammen dargestellt.

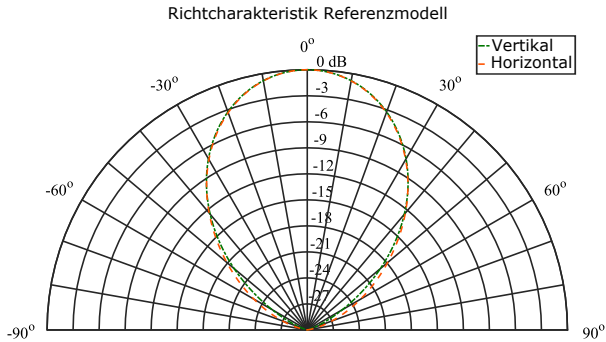


Abbildung 3: Polardiagramm der Richtcharakteristik des Referenzmodells, Resonanzfrequenz 45.3 kHz.

Abbildung 3 zeigt die Richtcharakteristik des Referenzmodells. Ein Abfall des Schalldrucks auf -6 dB ergibt sich bei einem Öffnungswinkel von 55°. Die Öffnungswinkel in horizontaler und vertikaler Ebene sind identisch. Wie zu erwarten, ergibt sich für das Referenzmodell eine isotrope Richtcharakteristik mit $\alpha = 1$.

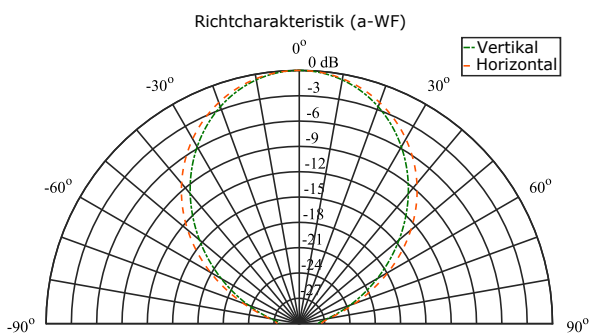


Abbildung 4: Polardiagramm der Richtcharakteristik der Designvariante (a-WF), Resonanzfrequenz 43.7 kHz.

Durch zwei Halbkreisausparungen in der Faserverstärkung, vgl. Abbildung 2 (a), kann eine geringfügig anisotrope Richtcharakteristik erzielt werden, wie in Abbildung 4 erkennbar ist. Der horizontale Öffnungswinkel vergrößert sich auf 68° während der vertikale auf 62° vergrößert wird. Dadurch ergibt sich ein Anisotropiefaktor $\alpha = 1.10$.

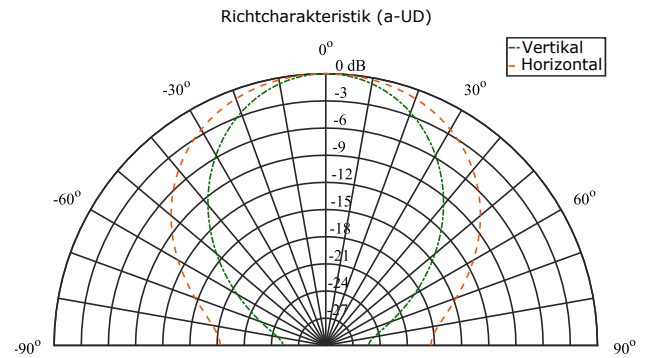


Abbildung 5: Polardiagramm der Richtcharakteristik der Designvariante (a-UD), Resonanzfrequenz 42.4 kHz.

Wird das Kohlenstoffgewebe durch ein unidirectionales Gelege ersetzt, kann eine größere Anisotropie der Richtcharakteristik erzielt werden, vgl. Abbildung 5. Der horizontale Öffnungswinkel vergrößert sich auf 90° bei einem unverändertem Öffnungswinkel von 62° in der Vertikalen. Dadurch erhöht sich der Anisotropiefaktor auf $\alpha = 1.45$.

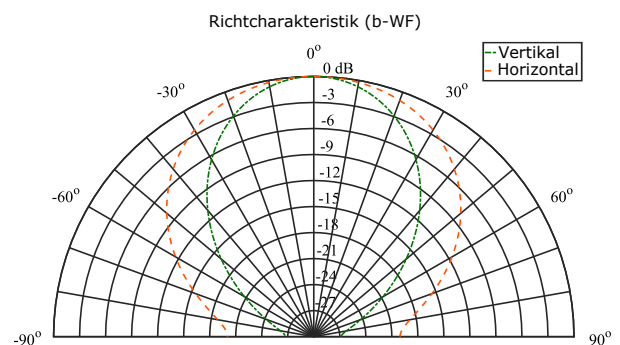


Abbildung 6: Polardiagramm der Richtcharakteristik der Designvariante (b-WF), Resonanzfrequenz 42.8 kHz.

Durch die Aufteilung der Faserverstärkung in zwei Teile und durch Einfügen eines Streifens aus Epoxidharz kann eine verstärkt anisotrope Richtcharakteristik erreicht werden. Mit der Designvariante (b-WF) werden schmale Öffnungswinkel in der vertikalen Ebene erreicht, 58°, bei gleichzeitig großen Öffnungswinkeln in horizontaler Ebene, 89°, vgl. Abbildung 6.

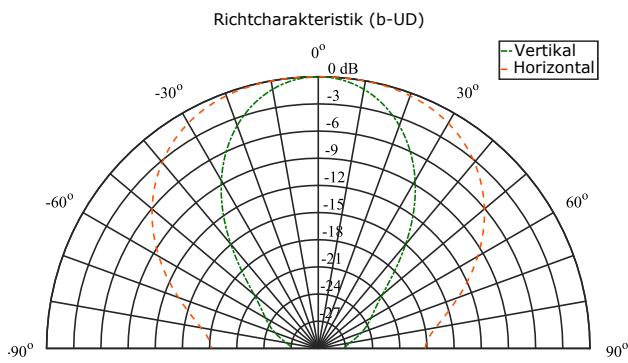


Abbildung 7: Polardiagramm der Richtcharakteristik der Designvariante (b-UD), Resonanzfrequenz 43.1 kHz

Der größte Anisotropiefaktor wird in der Designvariante (b-UD) erreicht. In dieser ist der horizontale Öffnungswinkel mit 100° annähernd doppelt so groß wie der vertikale, der 51° aufweist.

Die Ergebnisse zeigen unterschiedlich stark ausgeprägte anisotrope Richtcharakteristiken der untersuchten Designvarianten. Dabei werden mit der Strukturierungsvariante (b), vgl. Abbildung 2, höhere Anisotropiefaktoren erzielt. Der Einsatz textiler Halbzeuge mit stark anisotropen mechanischen Eigenschaften trägt unabhängig von der lokalen Strukturierung zur Steigerung der Anisotropie der Richtcharakteristik bei.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht das Schallabstrahlungsverhalten von Ultraschallsensoren deren Wandlerkopf aus Faserverbundwerkstoffen ausgeführt sind. Es wird ein neuartiger Ansatz zum Erzielen anisotroper Richtcharakteristiken durch lokale Strukturierung der Faserverstärkung vorgeschlagen. In finiten Element Simulationen werden die Richtcharakteristiken und deren Anisotropie für verschiedene Designvarianten untersucht. Die Ausprägung der Anisotropie, quantifiziert mit Hilfe eines Anisotropiefaktors, ist stark abhängig vom Design der Faserstrukturierung sowie von den mechanischen Eigenschaften des eingesetzten Faserhalbzeugs. Zusammenfassend wird die lokale Strukturierung von Faserverstärkungen als ein geeigneter Ansatz zum Erzielen anisotroper Richtcharakteristiken in Ultraschallsensoren identifiziert.

Literatur

- [1] Peter Rapps, Peter Knoll, Franz Pachner, Martin Noll und Michael Fischer. Ultrasonic transducer. United States Patent 5,446,332, 08 1995.
- [2] Chih-Chiang Cheng, Chia-Yu Lin, Wen-Jong Wu, Kuang-Chong Wu und Chih-Kung Lee. Highly anisotropic beam patterns for a pot-like ultrasonic sensor with penetrating slots configuration. In *2009 IEEE International Ultrasonics Symposium*, S. 775–778, Sept 2009.

- [3] J. H. Ho, C. C. Cheng, N. T. Tsou, C. S. Chen, J. Shieh, C. K. Lee und W. J. Wu. Ultrasonic transmitters far field beam pattern altering with boundary conditions design. In *2007 Sixteenth IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics*, S. 738–741, May 2007.
- [4] Takuya Nishioka, Yu Teshima, Takashi Mano, Ken Sakai, Takaaki Asada, Mami Matsukawa, Tetsuo Ohta und Shizuko Hiryu. Ultrasound radiation from a three-layer thermoacoustic transformation device. *Ultrasonics*, 57:84 – 89, 2015.
- [5] Jan Martin Kocbach. *Finite element modelling of ultrasonic piezoelectric transducers. Influence of geometry and material parameters on vibration response functions and radiated field*. PhD thesis, University of Bergen; Department of Physics, 2000.
- [6] C.H. Jiang, Y.H. Chang und T.Y. Kam. Optimal design of rectangular composite flat-panel sound radiators considering excitation location. *Composite Structures*, 108(Supplement C):65 – 76, 2014.
- [7] Bin Niu, Niels Olhoff, Erik Lund und Gengdong Cheng. Discrete material optimization of vibrating laminated composite plates for minimum sound radiation. *International Journal of Solids and Structures*, 47(16):2097 – 2114, 2010.
- [8] Olaf Täger, Martin Dannemann und Werner A. Hufenbach. Analytical study of the structural-dynamics and sound radiation of anisotropic multilayered fibre-reinforced composites. *Journal of Sound and Vibration*, 342:57 – 74, 2015.
- [9] John William Baron Rayleigh Strutt. *The Theory Of Sound Vol.2*. Dover Publications, 1896.
- [10] Gary H. Koopmann und John B. Fahline. *Designing Quiet Structures : A Sound Power Minimization Approach*. Elsevier Science, 1997.
- [11] Denny Fritze, Steffen Marburg und Hans-Jürgen Hardtke. Estimation of radiated sound power: A case study on common approximation methods. *Acta Acustica united with Acustica*, 95(5):833–842, 2009.
- [12] Michael Möser. *Technische Akustik (Technical acoustics)*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 10. aufl. edition, 2015.
- [13] Steffen Marburg. Developments in structural-acoustic optimization for passive noise control. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 9(4):291–370, 2002.