

Einseitig-berührungslose Ultraschallprüfung von Klebeverbindungen

Jens PRAGER¹, Marcus HEIDE², Tobias HOMANN¹, Mateusz GRZESZKOWSKI³,
Mate GAAL¹, Elmar DOHSE¹

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin

² Technische Universität Dresden, Institut für Festkörperelektronik, Dresden

³ Technische Universität Berlin, Institut für Energie und Automatisierungstechnik, Berlin

Kurzfassung. Durch den Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen und Multi-Material-Konstruktionen zur Gewichtsreduzierung erlangen Klebeverbindungen immer stärkere Bedeutung. Die Prüfung dieser Fügeverbindungen stellt neue Anforderungen an die zerstörungsfreie Prüfung. Hinzu kommt, dass die Zugänglichkeit häufig eingeschränkt und die Verwendung flüssiger Koppelmittel aufgrund konstruktiver oder fertigungstechnischer Gegebenheiten ausgeschlossen ist. Unter Berücksichtigung dieser Beschränkungen wurde ein Prüfverfahren entwickelt, das eine luftgekoppelte Anregung geführter Ultraschallwellen mit einer laserbasierten Detektion kombiniert. Nachdem das Prüfverfahren zunächst mit einer einfachen Signalauswertung im Zeitbereich getestet wurde, konnte in nachfolgenden Untersuchungen die örtliche Auflösung durch die Implementierung von Filteralgorithmen im Frequenz-Wellenzahl-Bereich und zusätzlich durch directionale Filter erhöht werden. Das resultierende bildgebende Prüfverfahren wurde an realitätsnahen Klebproben mit künstlichen Fehlern getestet. Die Zuverlässigkeit und Ortsauflösung des Verfahrens wurde im Vergleich mit herkömmlichen Prüfverfahren validiert. Mithilfe des Verfahrens können Poren, Einschlüsse und Bereiche mit ungenügender Verklebung detektiert werden.

Einführung

Konstruktive und fertigungstechnische Randbedingungen für die zerstörungsfreie Ultraschallprüfung erfordern zunehmend berührungslose Verfahren, die ohne Verwendung flüssiger Koppelmittel auskommen. Besonders für offenporige Werkstoffe, Werkstoffe mit empfindlichen Oberflächen und zunehmend auch für Kunststoffmaterialien ist die Verfügbarkeit solcher Verfahren unumgänglich. Die luftgekoppelte Ultraschallprüfung ist durch Verwendung verbesserter Ultraschallwandler und fortschrittlicher Signalverarbeitung in der Zwischenzeit zwar für die berührungslose Inspektion grundsätzlich geeignet, kann jedoch aufgrund prinzipbedingter Einschränkungen zumeist nur in Transmission eingesetzt werden. Dies widerspricht in vielen Fällen den konstruktiven Gegebenheiten, die oft nur eine einseitige Zugänglichkeit des Bauteiles zulassen. Für die Prüfung in Transmission werden zudem insbesondere bei ausgedehnten und komplex geformten Strukturen aufwendige Manipulatorsysteme benötigt, mit denen die synchrone Bewegung von Sende- und Empfangsprüfkopf realisiert werden kann.

Eine Verwendung von luftgekoppelten Verfahren in Impuls-Echo-Technik, die eine einseitige Anordnung der Prüfköpfe zulässt, scheitert zumeist an den starken Reflexionen des einfallenden Ultraschallimpulses an der Bauteiloberfläche. Diese unerwünschten



Reflexionen überdecken kleine Echos aus dem Inneren des Werkstoffs, was besonders bei dünnwandigen Bauteilen eine Anwendbarkeit des Verfahrens stark einschränkt.

Um diese prinzipbedingten Beschränkungen zu umgehen, ist die Kombination unterschiedlicher Sensorprinzipien für die Anregung und die berührungslose Detektion der Fehlerechos ein gangbarer Weg. Hierfür sind insbesondere solche Detektionsverfahren geeignet, die unempfindlich für die Eintrittsechos der Oberfläche sind. Diesem Ansatz folgend, wurde in den an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung durchgeführten Untersuchungen eine luftgekoppelte Anregung der Ultraschallwellen mit einer laseroptischen Detektion des Empfangssignals direkt auf der Bauteiloberfläche des Prüfobjektes erprobt. Um größere Bereiche des Bauteils ausgehend von einer Senderposition untersuchen zu können, verwendet das Verfahren eine Ultraschallausbreitung in Form geführter Wellen. Diese Form der Wellenausbreitung ergibt sich bei dünnwandigen Bauteilen, wie Platten und Klebeverbindungen zwischen Platten und Blechen, zudem zwangsläufig aus dem niedrigen Verhältnis von Bauteildicke zu Schallwellenlänge. Für die Auswertung des Empfangssignals wird vorausgesetzt, dass die Dispersionseigenschaften des Bauteils abhängig vom lokalen Zustand der Struktur sind. Änderungen der Bauteildicke, aber auch des Zustandes einer Klebeverbindung führen zu Änderungen des Dispersionsverhaltens und damit zu Änderungen der Wellenausbreitung und können durch geeignete Signalverarbeitungsalgorithmen aus dem Empfangssignal abgeleitet werden.

In vorangegangenen Untersuchungen wurde zunächst eine einfache Signalauswertung im Zeitbereich implementiert und erfolgreich getestet [1]. Im zweiten Schritt soll nun in dieser Arbeit eine Signalverarbeitung im Frequenz-Wellenzahl-Bereich vorgestellt werden. Es wird erwartet, dass die erweiterte Form der Signalverarbeitung eine deutlich verbesserte Ortsauflösung liefert. Ein ähnlicher Ansatz wurde bereits in [2] vorgestellt.

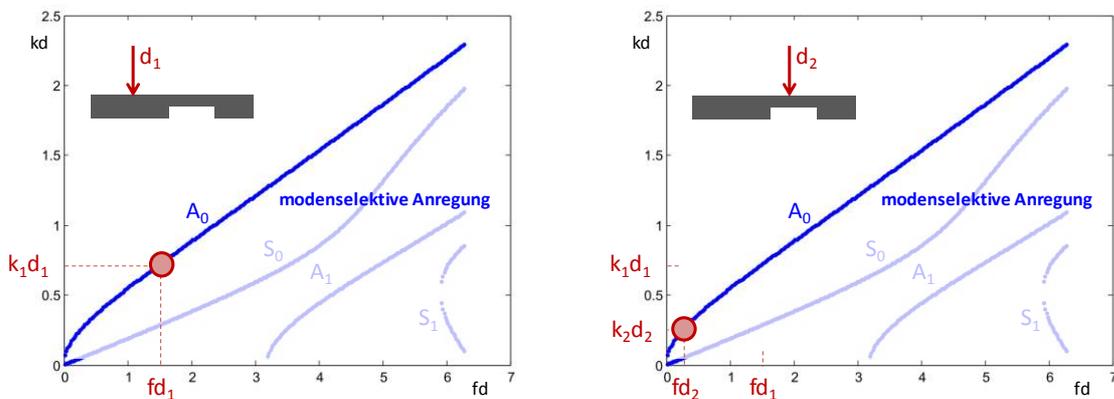


Abbildung 1: Prinzip des Prüfverfahrens.

Signalverarbeitung im Frequenz-Wellenzahl-Bereich

Das Grundprinzip des vorgeschlagenen Prüfverfahrens ist in Abbildung 1 für eine Platte mit variierender Dicke dargestellt. Die Anregung erfolgt modenselektiv. Im Folgenden wird daher beispielhaft nur die A_0 -Mode betrachtet. Unter Berücksichtigung einer konstanten Anregungsfrequenz f ergeben sich für unterschiedliche Plattendicken d_1 und d_2 die dargestellten Arbeitspunkte. Der Einfluss der Dispersion führt im gewählten fd -Bereich für die A_0 -Mode zu einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen Frequenz f und Wellenzahl k . Damit unterscheiden sind die resultierenden Wellenzahlen k_1 und k_2 . Es ist ersichtlich, dass das Verfahren nun dann funktioniert, wenn die Anregung in einem Bereich erfolgt, in

dem die betrachtete Mode dispersiv ist. Für die gewählte A_0 -Mode ist dies der Bereich niedriger Frequenzen.

Ziel der Signalverarbeitung ist die Erstellung einer Wellenzahlkarte, die die lokal gemessene Wellenzahl über den Ort darstellt. Die Wellenzahlkarte bildet die lokalen Dispersionseigenschaften, also z.B. Wellenzahländerungen der ausbreitungsfähigen Mode durch Dickenänderungen, aber natürlich auch Modenumwandlungen, die an den Impedanzübergängen auftreten, ab. Sie repräsentiert somit den Zustand der untersuchten Struktur. Neben dem gezeigten einfachen Fall einer Änderung der Plattendicke kann das Verfahren aber auch Fehler in Klebeverbindungen abbilden. Für eine intakte Klebeverbindung ergeben sich die Dispersionseigenschaften aus der Wellenausbreitung einer geschichteten Struktur, also z.B. Platte-Klebeschicht-Platte. Für Bereiche fehlender Verklebung fehlt die Kopplung zwischen den einzelnen Schichten, die Wellenausbreitung findet in der oberen und unteren Platte unabhängig voneinander statt, wobei jede Schicht ein eigenes Dispersionsverhalten aufweisen kann. Für sehr dünne Klebeschichten kann die Klebeschicht vernachlässigt werden. Unter dieser Annahme wirkt im verklebten Bereich die aufsummierte Dicke beider Platten, für den Bereich fehlender Verklebung nur die Dicke der oberen Platte.

Die selektive Anregung der Wellenmoden erfolgt unter Ausnutzung der Spuranpassung zwischen der Projektion eines schräg einfallenden Luftultraschallfelds und der Wellenlänge der gewünschten ausbreitungsfähigen Mode. Das Empfangssignal wird mit Hilfe eines Laservibrometers erfasst. Dabei wird die Normalkomponente der Schnelle $v(x,y,t)$ auf der Oberfläche der Struktur örtlich und zeitlich abgetastet. Der zeitliche und örtliche Abstand der Samples muss dabei so gewählt werden, dass das Abtasttheorem hinsichtlich Frequenz und Wellenzahl eingehalten wird. Die maximale Größe des abgetasteten, rechteckigen Bereiches vor dem Anregepunkt ist abhängig von den Dämpfungseigenschaften der zu prüfenden Struktur und wird so gewählt, dass an allen Abtastpunkten ein ausreichender Signal-Rausch-Abstand (SNR) gewährleistet werden kann. Zur Verbesserung des SNR wird über mehrere Messungen gemittelt. Für größere Plattenabschnitte kann die gesamte Prüfanordnung verschoben werden.

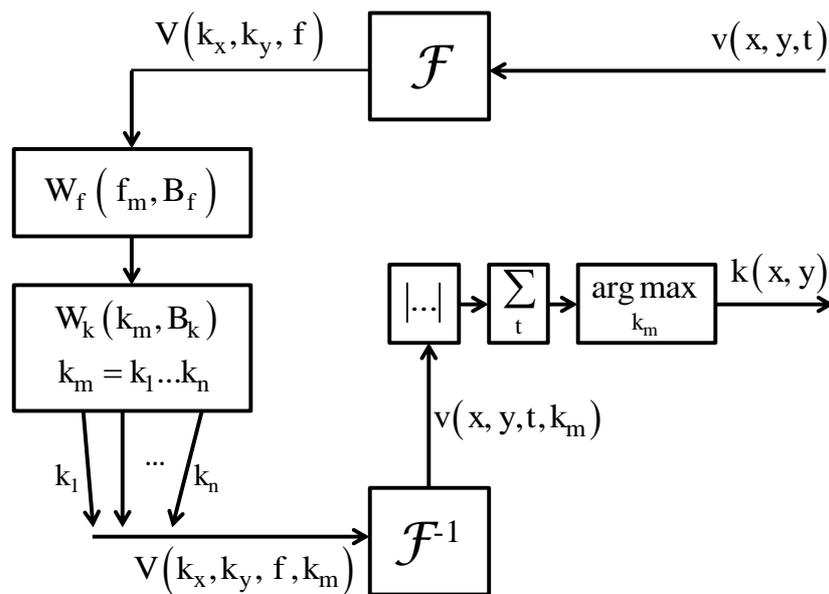


Abbildung 2: Prinzip der Signalverarbeitung im Frequenz-Wellenzahl-Bereich.

Grundprinzip des Prüfverfahrens ist, dass bei monomodaler Anregung die lokale Wellenzahl der ausbreitungsfähigen Mode durch Wellenzahlfilterung und anschließende Maximalwertsuche bestimmt wird. Entsprechend Abbildung 2 finden die wesentlichen Signalverarbeitungsschritte im Frequenz-Wellenzahl-Bereich statt. \mathcal{F} und \mathcal{F}^{-1} bezeichnen die dreidimensionale Fouriertransformation bzw. Rücktransformation des Signals. Die Bandpass-Frequenzfilterung $W_f(f_m, B_f)$ erfolgt bei der Mittenfrequenz f_m mit der Bandbreite B_f . $W_k(k_m, B_k)$ bezeichnet die Wellenzahl-Filterbank. Die einzelnen Filter mit den Mittenwellenzahlen k_m mit ($m=1 \dots n$) haben die Bandbreite B_k . Das Ergebnis der Filterung $V(k_x, k_y, f, k_m)$ wird durch inverse Fourier-Transformation der ersten drei Dimensionen zurück in den Orts-Zeit-Bereich überführt. Hier erfolgt zunächst die Bestimmung der Einhüllenden. Das dazu erforderliche monogene Signal ergibt sich durch Riesz-Transformation entlang der ersten drei Dimensionen von $v(x, y, t, k_m)$. Nach Summation der Matrixwerte hinsichtlich der Zeitachse erfolgt eine Maximalwertsuche in den Amplituden entlang der k_m -Richtung. Schließlich wird die Mittenwellenzahl des Wellenzahlfilters, das den maximalen Amplitudenwert liefert, für jeden Ortspunkt farbcodiert in die Wellenzahlkarte eingetragen.

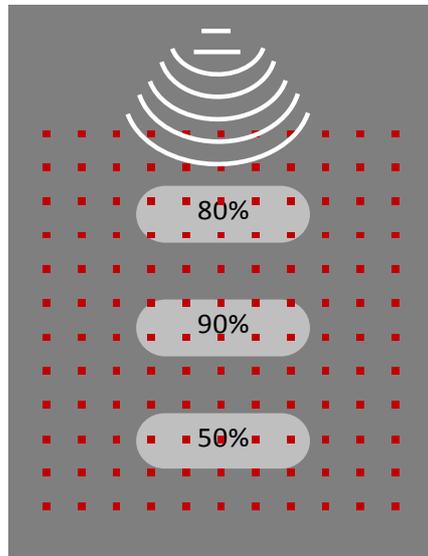


Abbildung 3: Testkörper, Aluminiumblech (1 mm dick) mit gefrästen Wanddickenreduzierungen. Die roten Punkte markieren die Abtastpunkte im Scanbereich (nicht maßstäblich).

Experimentelle Untersuchungen

Bevor mit den Untersuchungen an der Klebeverbindung begonnen wurde, sollte das Prüfverfahren an einen einfachen Testkörper validiert werden. Als Testkörper stand eine 1 mm dicke Aluminiumplatte mit einer Kantenlänge von 290 x 210 mm zur Verfügung (Abbildung 3). Die Platte enthält drei jeweils 60 x 20 mm große Fräsungen, in denen die verbleibende Restwanddicke jeweils 50, 80 bzw. 90% beträgt. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 4 dargestellt. Die modenselektive Anregung erfolgt mit einem ortsfesten, luftgekoppelten Ferroelektret-Wandler [3] mit einer Mittenfrequenz von etwa 200 kHz. Der Winkel α wurde so eingestellt, dass im Bereich der vollen Blechdicke die A_0 -Mode angeregt wird. Für die Abtastung stand ein Laservibrometer der Fa. Polytec mit einer Bandbreite von 24 MHz zur Verfügung, mit dem der Scanbereich auf der Platte mit einem Messpunktabstand von 1 mm abgetastet wurde. Die Messdaten wurden mit einer

Messwerterfassungskarte der Fa. Spektrum gesampled und anschließend in Matlab verarbeitet.

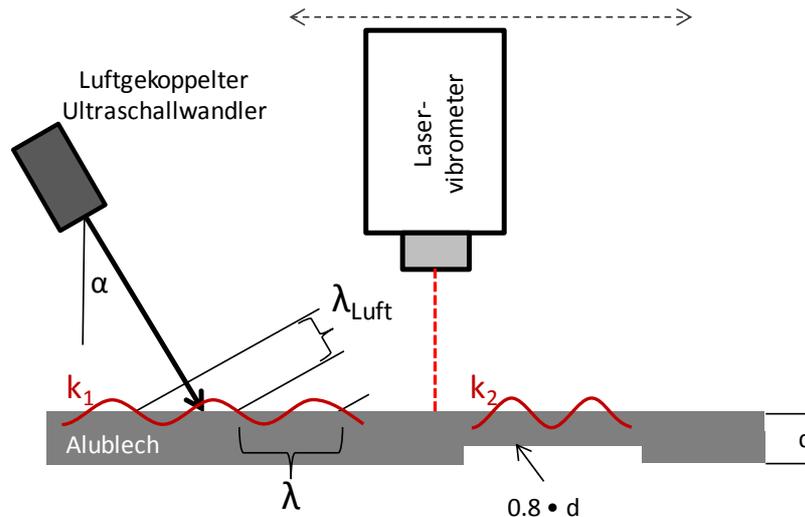


Abbildung 4: Messaufbau für die Platte mit Wanddickenreduzierung. Die Modenselektion erfolgt über die Spuranpassung der projizierten Wellenlänge in Luft λ_{Luft} und der ausbreitungsfähigen Mode in der Platte λ .

Abbildung 5 zeigt die berechnete Wellenzahlkarte für den beschriebenen Versuchsaufbau. Die Geometrie der Fräsungen bildet sich deutlich durch eine gegenüber der ungestörten Platte erhöhte Wellenzahl ab. Wie aus dem Dispersionsverhalten für die A_0 -Mode in Platten zu erwarten ist, sinkt die Phasengeschwindigkeit bei konstanter Frequenz und abnehmender Blechdicke. Folglich liefern dünnwandige Bereiche eine höhere Wellenzahl als dickwandige. Es ist ersichtlich, dass das vorgestellte Verfahren auch für geringe Wanddickenänderungen noch ausreichend empfindlich ist. Für die gewählten Arbeitspunkte liefert die Wanddickenreduzierung um 10 % (90% Restwanddicke) eine Änderung der Wellenzahl um 5 – 10 %. Durch die Wahl einer anderen Mode mit stärker ausgeprägter Dispersion könnte die Empfindlichkeit weiter erhöht werden.

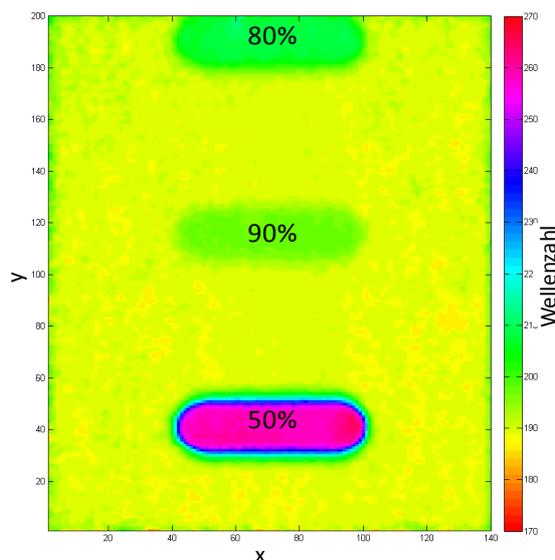


Abbildung 5: Prüfergebnis des Frequenz-Wellenzahl-Verfahrens für das Aluminiumblech mit Wanddickenreduzierungen.

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erläutert, lässt sich der gezeigte Ansatz auf geschichtete Strukturen, wie z.B. Klebeverbindungen übertragen. In [1] wurde ein ähnlicher Ansatz vorgestellt, der jedoch mit einer Signalauswertung im Zeitbereich arbeitet. Nachteil des Zeitbereichsverfahrens war dabei die im Vergleich zu einer Luftultraschallprüfung in Transmissionstechnik deutlich verringerte Ortsauflösung des einseitigen Prüfverfahrens. Nachfolgend soll untersucht werden, ob durch Anwendung der neuentwickelten Signalauswertung die Ortsauflösung verbessert werden kann. Das Frequenz-Wellenzahl-Verfahren wurde dazu auch auf die in [1] vorgestellte Blechklebeverbindung angewendet. Der Testkörper ist in Abbildung 6 dargestellt und besteht aus einem 1-mm-Stahlblech das mit einem 1-mm-Aluminiumblech verklebt ist. Für die 3 mm dicke Klebeschicht wurde ein 2-Komponenten-Polyurethan-Klebstoff verwendet und mit Testfehlern versehen. Aufgrund von Einschränkungen im Versuchsaufbau – es stand keine Möglichkeit der Verschiebung des Scanbereiches einschließlich der Anregung zur Verfügung – wurde nur der besonders interessante Bereich mit dünnen Kanälen von ca. 2 – 3 mm Durchmesser, die als Fehlstellen in die Klebeschicht eingebracht wurden, untersucht. Die Einschallung erfolgte wie in Abbildung 6 grün markiert. Als problematisch erwies sich die hohe Dämpfung der Schallausbreitung im Bereich der Verklebung, hervorgerufen durch den verwendeten PU-Kleber und dessen große Schichtdicke. Abweichend vom bereits beschriebenen Versuchsaufbau erfolgte die Anregung mit einem Luftultraschallwandler der Fa. Ultran.

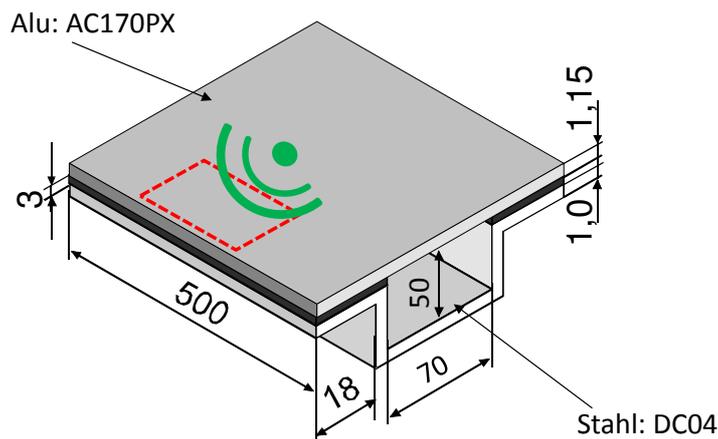


Abbildung 6: Testkörper mit Klebeverbindung.

Abbildung 7 vergleicht die Ergebnisse beider Verfahren für den ausgewählten Prüfbereich im Bereich der Kanäle (vgl. [1], Abbildung 9). Wie erwartet wurde durch die Anwendung der Signalauswertung im Frequenz-Wellenzahl-Bereich eine deutlich verbesserte Ortsauflösung des Prüfergebnisses im Vergleich zum Zeitbereichsverfahren erreicht. Die Änderung der Wellenzahl in Abbildung 7b zwischen den Bereichen intakter Verklebung und den Kanälen beträgt etwa 10 – 15 %.

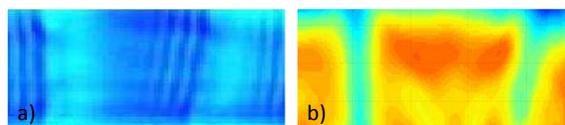


Abbildung 7: Vergleich der Prüfergebnisse für eine Blechklebeverbindung für a) Signalauswertung im Zeitbereich nach [1] und b) das vorgestellte Verfahren im Frequenz-Wellenzahl-Bereich.

Danksagung

Wir danken Herrn Dr. H. Gravenkamp für die Berechnung der Dispersionskurven mit der Scaled Boundary Finite Element Methode (SBFEM) [4]. Unser Dank gilt auch Frau Prof. E. Kühnicke und Herrn Dr. S. Kümritz für die Betreuung der Diplomarbeit von Herrn M. Heide.

Referenzen

- [1] Prager, J.; Dohse, E.; Gaal, M.; Gravenkamp, H.; Homann, T.; Grzeszkowski, M.: Anwendung geführter Ultraschallwellen für die Prüfung von Klebeverbindungen. DGZfP-Jahrestagung (2014).
- [2] Flynn, E. B.; Chong, S. Y.; Jarmer, G. J. S.; Lee, J.-R.: Structural imaging through local wavenumber estimation of guided waves. *NDT & E Int.* 59, (2013).
- [3] Döring, J.; Bovtun, V.; Gaal, M.; Bartusch, J.; Erhard, A.; Kreuzbruck, M.; Yakymenko, Y.: Piezoelectric and electrostrictive effects in ferroelectret ultrasonic transducers. *Journal of Applied Physics*, 112, (2012).
- [4] Gravenkamp, H.; Man, H.; Song C.; Prager, J.: The computation of dispersion relations for three-dimensional elastic waveguides using the Scaled Boundary Finite Element Method. *Journal of Sound and Vibration*, 332(15), (2013).