Aussagefähigkeit von Fehlstellenimitaten in der ZfP

Andreas Sebastian Schmelt¹, Zhe Li², Torben Marhenke³, Jörg Hasener⁴, Jens Twiefel⁵

¹ Institut für für Dynamik und Schwingungen, 30167 Hannover, Deutschland, Email: schmelt@ids.uni-hannover.de

² Institut für für Dynamik und Schwingungen, 30167 Hannover, Deutschland, Email: planetearth_lizhe@126.com

³ Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG, 31061 Alfeld (Leine), Deutschland, Email: torben.marhenke@fagus-grecon.com

⁴ Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG, 31061 Alfeld (Leine), Deutschland, Email: joerg.hasener@fagus-grecon.com

⁵ Institut für Dynamik und Schwingungen, 30167 Hannover, Deutschland, Email: twiefel@ids.uni-hannover.de

Einleitung

Seit Sokolov 1929 [1] erstmals Ultraschall für die zerstörungsfreie Prüftechnik (ZfP) von Werkstoffen vorschlug, haben sich die Sender- und Empfängereinheiten stetig weiterentwickelt. Diese werden aufgrund des Impedanzunterschiedes des Senders an das Umgebungsmedium in der Regel in einem flüssigen Medium eingesetzt. Es gibt jedoch einige Materialien, die nicht in eine Flüssigkeit eingetaucht werden dürfen, auch nicht für die Prüfung. Dazu gehören Wasser empfindliche Materialien, wie z.B. trocken gepresste Grünkeramiken, Metallschäume oder Holzfaserplatten, die die Flüssigkeit absorbieren und damit ihre Eigenschaften verändern [2]. Aufgrund der akustischen Impedanz können bei beispielsweise einer Luft/Holz-Grenzfläche nur 0,1% des Sendedrucks übertragen werden [3]. In den letzten Jahren wurden leistungsfähige Ultraschallwandler und empfindliche Empfänger entwickelt, um eine Prüfung in Luft möglich zu machen [4]. Piezoelektrische Ultraschallwandler haben den Vorteil einer weniger aufwendigen Konstruktion, wenn sie keinen zusätzlichen Schutz gegen Flüssigkeiten benötigen. So hat sich für empfindliche Materialien luftgekoppelter Ultraschall in vielen Bereichen der ZfP etabliert, nachdem der hohe Impedanzunterschied zwischen Festkörper und Gas durch neue Entwicklungen (z.B. Aufbringen einer Anpassungsschicht zur Impedanzanpassung von Piezokeramiken an Luft) überwunden werden konnte [5]. Um die Systeme zu evaluieren, werden Proben mit realen Fehlern oder Proben mit Fehlstellenimitaten benötigt. Besonders bei plattenförmigen Proben eignen sich Fehlstellenimitate, die entweder bei der Fertigung mit eingelegt werden oder bei bereits gefertigen Platten auf der Oberfläche platziert werden können. Fehlstellenimitate werden dann je nach Material der Platte ausgewählt. Für plattenförmige Faser verstärkte Kunststoffe (CFK) wird beispielsweise Teflonband bei der Fertigung in die Platten eingefügt, um reale Fehlstellen zu imitieren [6, 7, 8]. Für Holzspanplatten oder mitteldichte Faser (MDF) Platten werden Papierstücke eingesetzt. Denn es wird davon ausgegangen, dass das Papier ähnliche Materialeigenschaften besitzt wie die Holzplatten. Damit ist bei diesem Imitat nicht das Papier die Fehlstelle, sondern die dünne Luftschicht die sich zwischen Papier und Holzplatte befindet [9, 10]. Um die Fehlstellen zu identifizieren, werden Transmissionsmessungen durchgeführt. Je nach dem ob ein Punkt oder eine Linie von Punkten oder eine Fläche dargestellt wird, kann in die folgenden Darstellungsverfahren unterschieden werden [11]: Ein A-Scan (auch A-Bild), es wird das Zeitverhalten eines Punktes dargestellt. Bei einem B-Scan (auch B-Bild) wird das Zeitverhalten einer Linie von Punkte als Fläche oder als Linie mit den Amplituden der Punkte dargestellt [12]. Der C-Scan (auch C-Bild) erfordert hier den höchsten Aufwand, da eine durch ein Gitter diskretisierte Fläche nacheinander Punkt für Punkt einzeln gemessen wird [13]. Das C-Bild stellt die Amplituden einer Fläche dar. Mit der Re-Radiation Methode [9, 10, 14, 15, 16] (ein Verfahren der Ultraschallholographie) lassen sich die Schalldrücke aus den Informationen der einzelnen Messverfahren bis auf die Oberfläche der Platte berechnen und darstellen. Durch die Anwendung dieses Verfahrens konnten Fehlstellenimitate mit einem Durchmesser unterhalb der Wellenlänge der Anregungsfrequenz identifiziert werden [10]. Ein Nachweis darüber, welche Arten von Fehlstellen die Fehlstellenimitate, mit der Re-Radiation Methode, abbilden können, wurde bisher nicht erbracht.

Um diese Lücke zu schließen, werden in dieser Arbeit unterschiedlich große Fehlstellenimitate mit realen Lufteinschlüssen verglichen. Dafür wird eine speziell präparierte MDF Platte verwendet und mit Transmissionsmessungen in der Plattenebene zweidimensional vermessen und untersucht. Es werden 2D-Simulationen mit der MATLAB Toolbox k-Wave durchgeführt und die Ergebnisse mit Linienscans aus den Experimenten verglichen. Dafür werden sowohl die Daten aus dem Experiment als auch die Daten aus der Simulation mit der 2D Re-Radiation verarbeitet, so dass das 2D Schallfeld bis hin zur Plattenoberfläche bestimmt und visualisiert werden kann. Durch den Vergleich von Simulation und Experiment, sowohl mit Fehlstellen als auch mit Fehlstellenimitaten wird in dieser Arbeit ein Teil dieser Lücke geschlossen. Wir zeigen Fehlstellenimitate die Fehlstellen abbilden können um ein Sender-Empfänger-System durch ein Flächenscan, bzw. Linienscan mit der Re-Radiation Methode zu evaluieren.

Re-Radiation

Die Re-Radiation Methode basiert auf der Lösung des Rayleigh-Sommerfeld Beugungsintegrals. Durch Messung einer Linie oder einer Fläche ist es möglich durch die holographische Berechnungen und der Nutzung eines linearen Models die Schallfeldausbreitung zu bestimmen. Die Gleichung für die 2D Re-Radiation lautet:

$$p(x, z, \omega) \cong 2h_p^2 p(x_m, z_0, \omega) * -\frac{ikz}{4R} H_1^2(kR).$$
 (1)

Für die 3D Re-Radiation lautet die entsprechende Gleichung:

$$p(x, y, z, \omega) \approx h_p^2 p(x_m, y_m, z_0, \omega) * \frac{z e^{-ikR}}{2\pi R^2} (\frac{1}{R} + ik).$$
 (2)

Dabei ist p der Schalldruck, x, y, z die Koordinaten an dem der Schalldruck berechnet werden soll, x_m, y_m, z_0 die Koordinaten der Messebene, ω , die Kreisfrequenz h_p die Seitenlänge des quadratischen Messpunktes, k die Wellenzahl, R der direkte Abstand im zwei- bzw. dreidimensionalen Raum, i die komplexe Einheit, H_1^2 ist die Hankel-Funktion erster Ordnung und zweiter Art und * ist der Faltungsoperator. Eine genaue Herleitung und Beschreibung sind in [9, 10, 14, 15, 16] zu finden.

Versuchsaufbau



Abbildung 1: Versuchsaufbau

Im Abb. 1 gezeigten Versuchsaufbau wird als Sender ein Transducer mit einem Ø45 mm und einer Betriebsfrequenz von f=50 kHz (AT50, Airmar) verwendet. Als Empfänger werden zwei Mikrofone (SPH0641LU4H-1, Knowles) verwendet. Die Spannungsversorgung der Empfänger erfolgt über die Spannungsquelle (GPS-4303, GW Instek). Die Empfänger erhalten ihr Clock-Signal (Rechtecksignal mit f=3,90625 MHz) vom Funktionsgenerator (33210A, Agilent). Die Empfänger sind an einer XYZ-Verfahreinheit (RoboCylinder) montiert. Der Abstand zwischen Sender und Empfänger beträgt 310 mm. In einem Abstand von 200 mm zum Sender befindet sich eine $25 \,\mathrm{mm}$ dicke, um $12,5^{\circ}$ geneigte MDF Platte, die aus zwei Platten verpresst wurde. Dabei war eine Platte fehlerfrei und die andere mit Sacklochbohrungen (Ø10- $35 \,\mathrm{mm}$ und $5 \,\mathrm{mm}$ tief) als Fehlstelle versehen. Bei allen Messungen bewegten sich nur die Empfänger, der Sender war stets ortsfest. Der Sender wird mit einem sinusförmigen Impuls mit 10 Zyklen und einer Amplitude von 40 V betrieben. Durch den Funktionsgenerator (PXIe-5423, NI) wird das Signal für den Sender erzeugt und mit dem Verstärker (1040L, E&I) auf die entsprechende Amplitude verstärkt. Die Messdaten werden von einer Messkarte (PXIe-5171R, NI) aufgezeichnet und mit der Karte PXIe-8398, welche sich mit den anderen in dem Chassis PXIe-1085 befindet, an den Computer gesendet.

Simulation



Abbildung 2: Schematischer Aufbau des 2D Simulationsraumes mit Beispielhaft aufgelegtem oberen Papierstück und Fehlstelle mit einer Dicke=5 mm und Länge=15 mm. Bei der Simulation waren nie Papierstück und Fehlstelle gleichzeitig enthalten.

Die Simulationen wurden mit der MATLAB Toolbox k-Wave durchgeführt. In Abb. 2 ist der 2D Simulationsraum dargestellt. Er besitzt eine Höhe von 370 mm und Breite von 210 mm. Der Gitterpunktabstand beträgt dx=dy=0,1715 mm, was ungefähr 40 Punkte pro Wellenlänge entspricht. Im Simulationsraum ist der Sender und die Empfängerebene um einen Winkel von 12,5° zur Holzplatte geneigt. Die wichtigsten Parameter für die Simulation sind in Tabelle 1 aufgeführt. Dabei ist ρ die

Tabelle 1: Parametereinstellung. FS: Fehlstelle.

	Parameter				
	ρ	С	С	α	α
		Druck-	Scher-	Druck-	Scher-
		welle	welle	welle	welle
	$[kg/m^3]$	[m/s]		$[dB/(MHz^2cm)]$	
Luft/	1,205	343	0	1,0	0
\mathbf{FS}					
Holz-	600-	417-	170-	0,2-	0,2-
platte	800	482	197	0,4	0,4
Papier	700	450	185	0,3	0,3

Dichte in $[kg/m^3]$, c die Schallgeschwindigkeit in [m/s]und α der Absorptionsparameter in $[dB/(MHz^2cm)]$. In Abb. 2 ist zu erkennen, dass sowohl die Fehlstelle als auch das Papier auf der akustischen Achse des Schwingers platziert ist. Zwischen dem Stück Papier und der Holzplatte befindet sich ein kleiner Luftspalt von drei Gitterpunkten.

Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus dem Experiment und der Simulation vorgestellt, ausgewertet und verglichen. Es gibt vier verschiedene Situationen: 1. Fehlerfrei, 2. Fehlstelle in der Platte, 3. Imitat unter der Platte und 4. Imitat auf der Platte. In Abb. 3 ist die Schalldruckverteilung auf der Oberfläche der Holzplatte, die mit der Re-Radiation Methode berechnet wurde, dargestellt. Um mit einem vergleichsweise groben Messgitter (dx=dy=5 mm) auch die kleinen Fehlstellen bzw. Imitationen zu erkennen, wurde die Technik aus [16] verwendet. Dabei wird ein virtuelles Messgitter mit einen Git-

terpunktabstand von dx=dy=1 mm eingesetzt. In Abb. 3



Abbildung 3: C-Bilder der berechneten Schallfelder auf der Oberfläche der um $12,5^{\circ}$ geneigten Holzplatte aus dem Experiment mit einer Flächenvermessung. (a) Sit. 1, (b) Sit. 2, Fehlstelle mit Durchmesser von D=10 mm, (c) Sit. 4, Imitat mit D=10 mm, (d) Sit. 2, Fehlstelle mit D=20 mm, (e) Sit. 4, Imitat mit D=20 mm, (f) Sit. 3, Imitat mit D=20 mm.

ist in Blau der Bereich geringen Druckes dargestellt. Der rötliche Bereich ist der Einflussbereich des Senders. Befindet sich im rötlichen Bereich blaue Stellen, so ist dies ein Indikator für eine Fehlstelle. In (a) ist deutlich zu erkennen, dass im Vergleich zu den anderen Bildern in Abb. 3, keine Fehlstelle vorhanden ist. In (b) ist die eingebrachte Fehlstelle als Schalldruckabfall in der Mitte des Einflussbereiches des Senders deutlich zu erkennen. Im Vergleich zu (c), bei dem ein $D=10 \,\mathrm{mm}$ Papierstück auf die Oberseite gelegt wurde, ist der Druckabfall jedoch geringer. Bei beiden lässt sich die Position in der Ebene, als auch die Fläche bestimmen. In (d) bis (f) ist der Durchmesser der Fehlstelle bzw. Imitate $D=20\,\mathrm{mm}$. Während in (d) eine leichte Umschallung der eingebrachten Fehlstelle zu erkennen ist (der blaue Bereich im roten Einflussbereich des Senders ist nicht kreisrund), zeigt das Papierstück auf der Holzplatte, zu sehen in (e), einen deutlichen Kreis auf. In (f) ist das Papierstück auf der Unterseite der Holzplatte befestigt, was eindeutig an der Schalldruckverteilung zu erkennen ist. Der Schallkegel vom Sender wird nicht nur an dem Impedanzsprung zwischen dem Papierstück und der Holzplatte stark vermindert, er beugt sich auch um die Kanten des Papierstückes und die Schallwellen können sich im Holz hinter dem Papier ausbreiten. So lässt sich dieses annähernde Kreisringmuster in (f) erklären. Aus diesen Ergebnissen kann bereits gefolgert werden, dass eine Fehlstelle in der Holzplatte bei einer Flächenvermessung und Auswertung mit der Re-Radiation Methode mit Papierstücken simuliert werden kann. Die realen Fehlstellen stellen im Ergebnisbild einen Zwischenstand von einem Papierstück auf der Holzplatte und einem Papierstück unter der Holzplatte dar. In Abb. 4 sind die Ergebnisse aus den simulierten Daten mit dem berechneten Schallfeld aus der 2D Re-Radiation zu erkennen.Es wurde nur bis zur Oberfläche der Platte die Schalldrücke bestimmt. Die weißen Flächen in Abb. 4 und in Abb. 5 sind in der Holzplatte bzw. hinter der Holzplatte und somit unbekannt. In (a) ist sehr gut zu ermitteln, dass keine Fehlstelle das Schallfeld beeinflusst. In (b) ist eine D=10 mm Fehlstelle in der Platte und in (c) ein Papierstück in der selben Größe auf der Platte. Es ist ein sehr ähnliches Schallfeld zu erkennen, nur der



Abbildung 4: C-Bilder der berechneten Schallfelder bis zur Oberfläche der Holzplatte aus den Daten der 2D-Simulation. Empfängerpunkten sind um $12,5^{\circ}$ zur Holzplatte geneigt. (a) Sit. 1, (b) Sit. 2, Fehlstelle mit D=10 mm, (c) Sit. 4, Imitat mit D=10 mm, (d) Sit. 2, Fehlstelle mit D=20 mm, (e) Sit. 4, Imitat mit D=20 mm, (f) Sit. 3, Imitat mit D=20 mm.

Schalldruck ist leicht unterschiedlich. In (d) bis (f) ist eine Fehlstelle bzw. Imitat mit D=20 mm genutzt. Es ist ersichtlich, dass die Schalldruckverteilung mit Imitat auf der Platte (e) nahezu identisch mit der Fehlstelle in der Platte ist. Die Schalldruckverteilung mit dem Imitat unter der Platte weißt hingegen einen breiteren Einflussbereich auf der Platte auf, die Druckwerte sind niedriger. Die Simulationen zeigen ein ähnliches Verhalten wie die Ergebnisse aus dem Flächenvermessung des Experiments. In Abb. 5 sind die gleichen Situationen dargestellt wie



Abbildung 5: C-Bilder der berechneten Schallfelder bis zur Oberfläche der um $12,5^{\circ}$ geneigten Holzplatte aus den Messdaten vom Experiment mit der Linienvermessung. (a) Sit. 1, (b) Sit. 2, Fehlstelle mit Durchmesser von D=10 mm, (c) Sit. 4, Imitat mit D=10 mm, (d) Sit. 2, Fehlstelle mit D=20 mm, (e) Sit. 4, Imitat mit D=20 mm, (f) Sit. 3, Imitat mit D=20 mm. Der rote Balken auf der x-Achse beschreibt die Position der Fehlstelle bzw. des Imitates auf der x-Achse.

in Abb. 3, hier wurde jedoch ein Linienscan ausgewertet. Die Daten wurden ebenfalls mit der Technik aus [16] für die 2D Re-Radiation von dem Messpunktabstand dx=5,1525 mm auf dx=0,1715 mm verfeinert. Abb. 5 (a) zeigt den fehlerfreien Fall, der bis auf überlagertes Rauschen, identisch zu dem in Abb. 4 (a) ist. In Abb. 5 (b) und (d) ist die Fehlstelle nicht exakt auf der akustischen Achse des Senders (aufgrund der sehr komplizierten Ausrichtung der nicht sichtbaren Fehlstelle zur Sendeachse), wodurch es zu Abweichungen zur Simulation in Abb. 4 (c) und (d) kommt. Die aufgelegten Imitate in Abb. 5 (c) und (e) zeigen entsprechen dem Schallfeld aus der Flächenvermessung und Auswertung aus Abb. 3. Sie besitzen weniger Übereinstimmung zu den Ergebnissen aus der Simulation in Abb. 4 (c) und (e). Abb. 5 (f), bei dem das Imitat an der Unterseite befestigt ist, zeigt sowohl eine gute Übereinstimmung mit der Simulation Abb. 4 (f), als auch mit dem Ergebnis aus Abb. 3. Die Abweichungen zur Simulation liegen an der idealen Annahme der 2D Simulation und der unberücksichtigten Fasern bzw. Späne in der Holzplatte.

Diskussion und Zusammenfassung

Wir haben gezeigt, wie sich Fehlstellen in einer Holzplatte auf die Auswertung mit der 2D bzw. 3D Re-Radiation Methode auswirken. Soll eine reale Fehlstelle mit Papierstücken imitiert werden, so haben wir gezeigt, dass ein Papierstück auf der Holzplatte das Signal stärker abschwächt als eine Fehlstelle in der Platte. Ein Papierstück unter der Platte, streut und beugt das Signal stärker als die Fehlstelle in der Platte. Um sicher zu gehen, dass das gewünschten Sender-Empfänger System Fehlstellen einer bestimmten Größe zuverlässig bestimmen kann, muss sowohl das Papierstück auf, wie unter der Holzplatte identifiziert werden können. Diesen Schluss lassen auch die stark vereinfachten Simulationen zu. Papier oder Material gleiche Fehlstellenimitate wie die Probe stellen somit eine gute Alternative zur Probenpräparierung dar.

Literatur

- Sokolov, S. Y.: On the problem of the propagation of ultrasonic oscillations in various bodies. Elek. Nachr. 343 Tech. (1929), 454–460.
- [2] Hasenstab, A. G. M.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertation, Technischen Universität Berlin, Deutschland, (2005).
- [3] Fleming, M. R.;Bhardwaj, M. C.; Janowiak, J. J.; Shield, E. J.; Roy, R.; Agrawal, D. K.; Bauer, L. S.; Miller, D. L.; Hoover, K.: Noncontact ultrasound detection of exotic insects in wood packing materials. Forest Products Journal 55 6 (2005), 33–37.
- [4] Chimenti, D. E.: Review of air-coupled ultrasonic materials characterization. Ultrasonics 54 (2014), 1804–1816, doi:10.1016/j.ultras.2014.02.006.
- [5] Hillger, W.; Bühling, L.; Ilse, D.: Review 0f 30 years ultrasonic systems and developments for the future. In Proc. of 11th European Conf. on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague, Czech Republic (2014).
- [6] Jurek, M.; Radzienski, M.; Kudela, P.; Ostachowicz, W.:Non-contact excitation and focusing of guided waves in CFRP composite plate by air-coupled transducers for application in damage detection. Procedia Structural Integrity 13(2018), 2089-2094, https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.203.
- [7] Berger, D.; Zai
 ß, M.; Lanza, G.; Summa, J.; Schwarz, M.; Herrmann, H.-G.; Pohl, M.; G
 ünther,

F.; Stommel, M.:Predictive quality control of hybrid metal-CFRP components using information fusion. Production Engineering 12 2 (2018), 161-172, https://doi.org/10.1007/s11740-018-0816-1.

- [8] Quaegebeur, N.; Micheau, P.; Masson, P.; Maslouhi, A.:Structural health monitoring strategy for detection of interlaminar delamination in composite plates. Smart Mater. Struct. 19 (2010) 085005 (9pp), doi:10.1088/0964-1726/19/8/085005.
- [9] Marhenke, T.; Sanabria, S. J.; Twiefel, J.; Furrer, R.; Neuenschwander, J.; Wallaschek, J.: Three dimensional sound field computation and optimization of the delamination detection based on the re-radiation. In Proc. of 12th European Conf. on Non-destructive Testing (12th ECNDT), Gothenburg, Sweden (2018), ISBN 978-91-639-6217-2
- [10] Marhenke, T.; Neuenschwander, J.; Furrer, R.; Zolliker, P.; Twiefel, J.; Hasener, J.; Wallaschek, J.; Sanabria, S.: Air-coupled ultrasound time reversal (ACU-TR) for subwavelength non-destructive imaging. IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Contr. 67 3 (2020), 651-663, doi: 10.1109/TUFFC.2019.2951312.
- [11] Döring, D.: Luftgekoppelter Ultraschall und geführte Wellen für die Anwendung in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Dissertation (2011) Universität Stuttgart, Deutschland.
- [12] Matthies, K.; Gohlke, D.: Der Ultraschall-Volumenscan als Werkzeug zur Prüfung komplizierter Geometrien und komplexer Gefüge. In Proc. of DGZfP- Jahrestagung, Fürth, Germany, (2007), Vortrag 57, ISBN: 978-3-931381-98-1
- [13] Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: Werkstoffprüfungen mit Ultraschall; Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Deutschland (1986) 73–80 ISBN 978-3-662-10909-0.
- [14] Sanabria, S. j.; Marhenke, T.; Furrer, R.; Neuenschwander, J.: Calculation of Volumetric Sound Field of Pulsed Air-Coupled Ultrasound Transducers Based on Single-Plane Measurements. IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Contr. 65 1 (2018), 72-84, doi: 10.1109/TUFFC.2017.2773619.
- [15] Schmelt, A. S.; Marhenke, T.; Twiefel, J.: Identifiying objects in a 2D-space utilizing a novel combination of a re-radiation based method and of a difference-image-method. In Proc. of 23rd International Congress on Acoustics (ICA2019), Aachen, Germany (2019), 8156-8163, ISBN 978-3-939296-15-7.
- [16] Schmelt, A. S.; Marhenke, T.; Hasener, J.; Twiefel, J.: Investigation and Enhancement of the Detectability of Flaws with a Coarse Measuring Grid and Air Coupled Ultrasound for NDT of Panel Materials Using the Re-Radiation Method, MDPI, Appl. Sci. (2020), 10, 1155, doi:10.3390/app10031155.