

Reduktion von Abbildungsfehlern bei luftgekoppeltem Ultraschall mit einseitigem Zugang

Marlies SPRINGMANN¹, Peter FEY¹, Gerhard BUSSE¹, Marc KREUTZBRUCK¹
¹ Universität Stuttgart, Stuttgart

Kurzfassung. Der Einsatz von modernen Leichtbaumaterialien erfordert aus Sicherheitsgründen präzise Prüfmethode. Neben der reinen Detektion von Defekten gewinnt auch die präzise Charakterisierung von Defekten an Bedeutung. Zusätzlich soll eine zerstörungsfreie Prüfung möglichst berührungslos sein und mit einseitigem Zugang zum Prüfobjekt arbeiten. Geführte Wellen, die durch luftgekoppelten Ultraschall erzeugt werden und deren Ultraschallemission ebenfalls luftgekoppelt detektiert wird, sind eine geeignete Methode für die einseitige Prüfung von Faserkunststoffverbunden ohne Koppelmittel.

Allerdings kommt es bei dieser Methode zu einer „Verschmierung“ der Abbildung in der Ausbreitungsrichtung der Welle. Diese wird von der Messanordnung beeinflusst und kann durch eine Transferfunktion charakterisiert werden. Die Transferfunktion kann als Faltungskern verstanden werden, mit dem der reale Defekt gefaltet wird, um den in der Messung erzeugten C-Scan zu erzeugen. Dieser Faltungskern kann an einer Referenzprobe mit bekannten Defektmaßen durch Rückfaltung ermittelt werden. Die Rückfaltung der Transferfunktion kann auf weitere Messungen mit derselben Messanordnung an anderen Proben angewendet werden und so das unverschmierte Bild des jeweiligen Defekts liefern. Die Aussagefähigkeit hinsichtlich der Abmessungen und Position eines Defekts wird mit dieser Methode im Vergleich zu unbearbeiteten C-Scans deutlich gesteigert.

1 Einleitung

Faserkunststoffverbunde (FKV) werden häufig in Strukturbauteilen eingesetzt, da sie eine hervorragende massenspezifische Steifigkeit und Festigkeit besitzen. In der regelmäßigen Inspektion von Bauteilen ist daher zum einen eine schnelle Beurteilung gefragt, ob das Bauteil defektfrei ist oder nicht. Zum anderen sind auftretende Defekte möglichst präzise zu charakterisieren, um ihre Relevanz für den weiteren Einsatz beurteilen zu können oder geeignete Reparaturmaßnahmen einleiten zu können. Bei Metallen wird dafür häufig auf kontakt- oder wassergekoppelten Ultraschall zurückgegriffen. Leichtbaustrukturen sind allerdings durch z. B. Waben- oder Schaumkerne nicht dazu geeignet, in ein Wasserbad getaucht zu werden. Bei solchen Strukturen wird luftgekoppelter Ultraschall oft bevorzugt.

In Durchschallungsanordnung messende Luftultraschallanlagen sind auch für die Anwendung an komplex geformten Bauteilen geeignet, z. B. Heckausleger von Hubschraubern [1]. Bei Bauteilen, an denen nur eine Seite der zu untersuchenden Wand zugänglich ist, wäre dagegen eine Prüfung analog zur Puls-Echo-Technik erstrebenswert.



Durch die schmalbandige Anregung von Luftultraschallprüfköpfen kommt es allerdings zu einem deutlichen Nachschwingen des Prüfkopfs. Daher wird das Rückwandecho vom Eintrittsecho verdeckt. Eine Möglichkeit, diese Herausforderung zu meistern, sind Thermoakustische Ultraschallwandler, die in der Lage sind, einen sehr breitbandigen Luftultraschallpuls zu erzeugen [2]. Hierbei muss die Detektion der Ultraschallsignale allerdings immer noch über einen zweiten Prüfkopf durchgeführt werden, da es keine thermoakustischen Empfänger gibt. Durch die Nutzung von polarisiertem zellulärem Polypropylen gelang es, effiziente Luftultraschallprüfköpfe herzustellen, die deutlich breitbandiger senden und empfangen als die herkömmlichen Piezokompositprüfköpfe [3], [4].

Unabhängig von der immer fortschreitenden Entwicklung neuer Prüfköpfe wurden auch alternative Messmodi entwickelt, um mit einseitigem Zugang luftgekoppelten Ultraschall verwenden zu können. Durch schräge Einschallung ist es möglich, geführte Wellen an der Oberfläche des Bauteils zu erzeugen, die dann entweder in einer Durchschallungsanordnung [5] oder einer einseitigen Prüfkopfanordnung [6–8] genutzt werden können (siehe Abbildung 1), um Defekte im Bauteil zu detektieren. Dabei muss der Einschallwinkel so gewählt werden, dass die auf die Probenoberfläche projizierte Wellenlänge in Luft der Wellenlänge der anzuregenden geführten Welle entspricht, ähnlich der Anregung einer evaneszenten Lichtwelle. Neben der Amplitudendämpfung kann auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der geführten Wellen Informationen über den Schädigungszustand eines Bauteils liefern [9].

Da bei der Prüfung mit geführten Wellen zwei Prüfköpfe in einem konstanten Abstand genutzt werden, enthält das detektierte Signal stets über die gesamte Laufstrecke integrierte Informationen. Hierdurch sind zwar alle Informationen erfasst, aber nicht für den Anwender sichtbar dargestellt. Die Anzeigen im C-Scan sind über die Laufstrecke verschmiert oder erscheinen doppelt. Hier wird eine Methode vorgestellt, die die Verschmierung und Doppelbilder rückgängig macht.

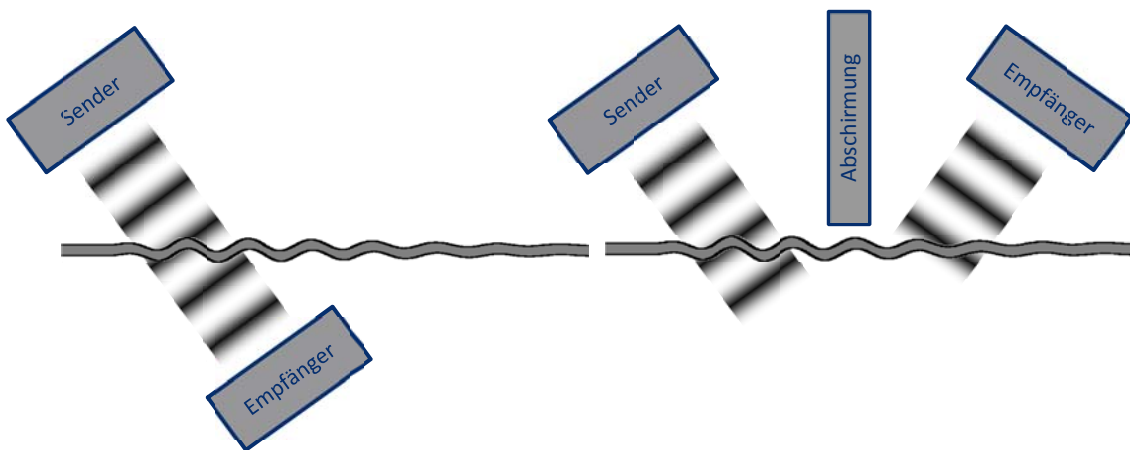


Abbildung 1: Sende- und Empfangsprüfkopf in Transmissionsanordnung (links), Sende- und Empfangsprüfkopf mit einseitigem Probenzugang (rechts).

2 Algorithmus zur Bildoptimierung

Der Grundgedanke der vorgestellten Methode ist, dass sich die Messungen mit Hilfe der mathematischen Faltung beschreiben lassen. Der in der Messung erzeugte C-Scan entsteht aus einer Faltung des realen Defektes (Eingangsfunktion) mit einer Transferfunktion. Diese Transferfunktion lässt sich als Faltungskern interpretieren und wird maßgeblich durch die Messanordnung beeinflusst.

Basis der hier verwendeten Faltung ist die ortsabhängige diskrete Faltung, da die Messdaten als diskrete Werte in Form von Matrizen vorliegen. Die Faltung bzw. Rückfaltung erfolgt daher elementweise. Das Faltungsprodukt diskreter Signale lässt sich als Faltungssumme beschreiben. Dabei entspricht $x[n]$ der diskreten Eingangsfunktion, $h[n]$ der diskreten Transferfunktion und $y[n]$ der diskreten Ausgangsfunktion. [10]

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot h[n-k] = x[n] * h[n]. \quad (1)$$

Für das hier gestellte Problem entspricht die aus der Messung erhaltene Matrix C_Scan der Ausgangsfunktion $y[n]$, die Matrix T der Transferfunktion $h[n]$, d. h. dem Faltungskern und die Defektmatrix D als Eingangsfunktion $x[n]$ dem realen Defekt. Mit Hilfe einer Fourier-Transformation lässt sich das Faltungsprodukt

$$C_Scan = D * T \quad (2)$$

auf das Problem einer einfacheren (Matrizen-)Multiplikation reduzieren:

$$\mathcal{F}\{C_Scan\} = \mathcal{F}\{D\} \cdot \mathcal{F}\{T\} \quad (3)$$

Die Bestimmung der Matrix T (Transferfunktion) erfolgt anhand einer Referenzprobe. Dabei kann, neben der Matrix C_Scan_{ref} als Ergebnis der Referenzmessung, die Defektmatrix D_{ref} (Eingangsfunktion) aufgrund der bekannten Defektmessungen definiert werden. Da nun die Eingangsfunktion und das Ergebnis der Faltung bekannt sind, kann durch das Prinzip der Rückfaltung die gesuchte Transferfunktion bestimmt werden.

$$\mathcal{F}\{T\} = \frac{\mathcal{F}\{C_Scan_{ref}\}}{\mathcal{F}\{D_{ref}\}} \quad (4)$$

Eine inverse Fourier-Transformation der Fourier-transformierten Matrix $\mathcal{F}\{T\}$ liefert die gesuchte Transferfunktion T im Ortsbereich.

$$T = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{T\}\} = \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{\mathcal{F}\{C_Scan_{ref}\}}{\mathcal{F}\{D_{ref}\}}\right\} \quad (5)$$

Analog kann die unbekannte Defektmatrix D (Eingangsfunktion) einer Messung mit Hilfe der Transferfunktion aus der Referenzmessung und dem C-Scan der Messung über die Rückfaltung bestimmt werden.

$$\mathcal{F}\{D\} = \frac{\mathcal{F}\{C_Scan\}}{\mathcal{F}\{T\}} \quad (6)$$

Die gesuchte Defektmatrix D im Ortsbereich liefert dann ebenfalls die inverse Fourier-Transformation der Matrix $\mathcal{F}\{D\}$ [11], [12]. Die Wirksamkeit der Methode wird im Folgenden an Messbeispielen demonstriert.

3 Experimentelles

3.1 Proben

Die verwendeten Proben sind verschiedene Kunststoffproben mit rückseitig eingefrästen Nuten als simulierte Defekte. Diese rechteckigen Proben aus Polyethylen weisen unterschiedliche Probendicken auf, entweder 4 mm oder 10 mm. Die Defekte sind durch Nuten unterschiedlicher Breite realisiert und lassen sich aufgrund ihrer einfachen Geometrie leicht in der Defektmatrix der Referenzmessung definieren. Die Breite der Nuten liegt zwischen 4 mm und 8 mm, die Restwanddicke bei 2 mm. In Abbildung 2 ist eine Skizze einer entsprechenden Probe dargestellt.

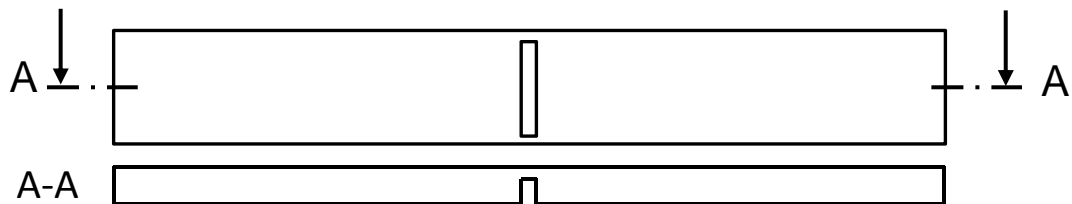


Abbildung 2: Skizze Kunststoffprobe

3.2 Messaufbau und Messdurchführung

Die Messungen werden in Reemissions-Anordnung durchgeführt. Folglich befinden sich beide Luftultraschallprüfköpfe auf derselben Seite der Probe, die Probe wird also einseitig abgescannt. Für die Messungen werden nicht fokussierte Luftultraschallprüfköpfe des Typs AS200T von Airstar Inc. verwendet. Betrieben werden diese Prüfköpfe bei ihrer Resonanzfrequenz von 207 kHz. Das Messsystem basiert auf einer Entwicklung des Ultrasound Institute der Kaunas University of Technology in Litauen.

3.3 Definition der Defektmatrix

Eine der großen Herausforderungen bei der Bestimmung der Transfermatrix ist die möglichst realitätsnahe Definition der Defektmatrix (Eingangssignal) der Referenzmessung. Das Wissen über Art, Größe und Position des Defektes ist dabei Grundvoraussetzung. Die Defektmatrix D wird für den abgescannten Bereich, d. h. für das Messfeld definiert. Somit sind Defektmatrix und Messfeld gleich groß, und jeder Eintrag der Matrix entspricht damit einer bestimmten Position im Messfeld. Als geeignetste Variante zur Defektdefinition hat sich ein Rechtecksignal herausgestellt. Dazu werden alle Einträge der Defektmatrix, an denen sich bei den zugehörigen Positionspunkten im Messfeld der Defekt befindet auf den Wert 1 gesetzt. Alle Einträge, die defektfreien Positionen entsprechen, werden auf den Wert 0 gesetzt (vgl. Abbildung 3).

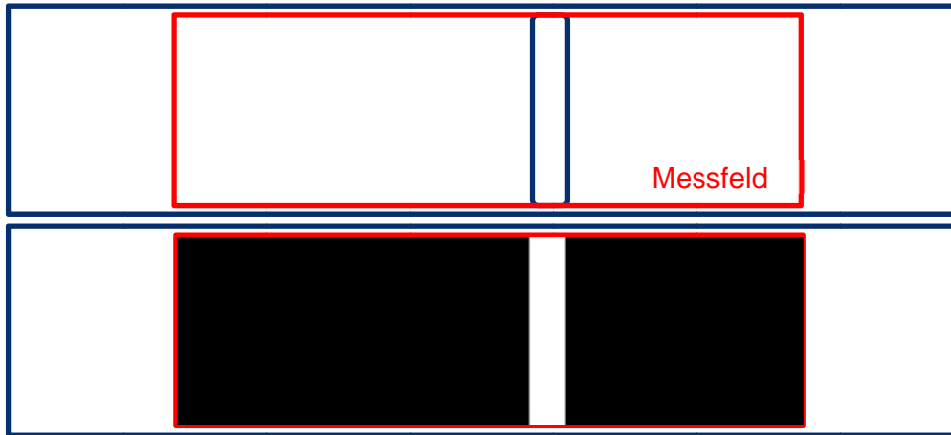


Abbildung 3: Oben: Skizze der Probe mit eingezeichnetem Messfeld. Unten: zusätzlich mit definierter Defektmatrix (Weiß entspricht dem Wert 1, Schwarz dem Wert 0)

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Dicke Proben

Für die Referenzmessung wird eine der „dicken“ Proben mit 10 mm Dicke und einer Nut von 4 mm verwendet. Die Restwanddicke an der Nut beträgt 2 mm. In Abbildung 4 oben ist der C-Scan der Referenzmessung dargestellt. Wie bereits erwähnt erscheint der Defekt im C-Scan doppelt. Mit Hilfe der bekannten Defektmatrix der Referenzmessung (vgl. Abbildung 3 unten) kann die Transferfunktion (vgl. Abbildung 4 unten) in Form einer Matrix über die Rückfaltung berechnet werden.

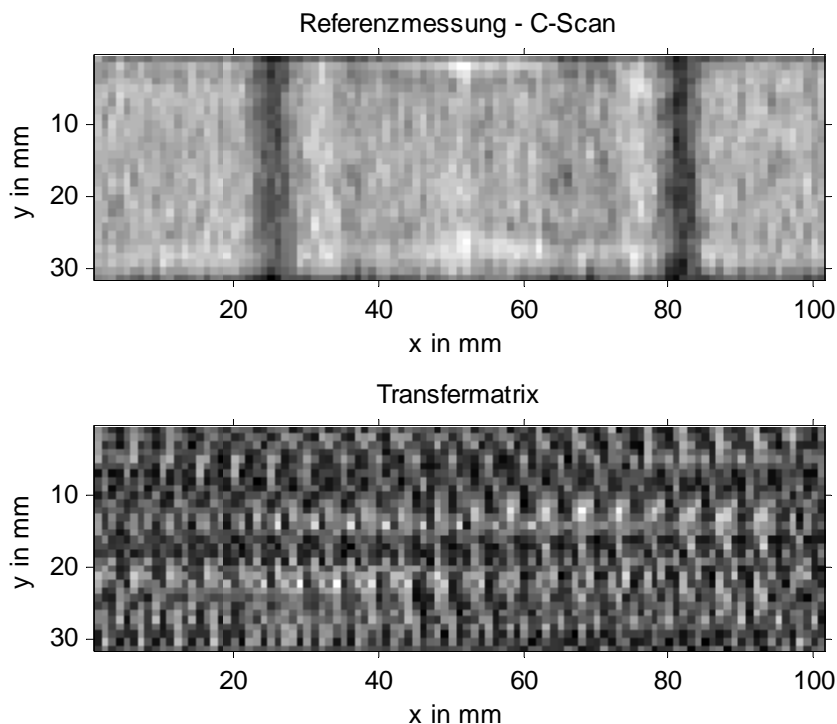


Abbildung 4: Oben: C-Scan der Referenzmessung. Unten: Über Rückfaltung bestimmte Transferfunktion T

Die Messung erfolgt ebenfalls an einer Probe mit 10 mm Dicke, jedoch weist diese Probe eine Nut von 8 mm Breite auf. Da nun die Transferfunktion aus der Referenzmessung bekannt ist, kann in Kombination mit dem C-Scan der Messung die gesuchte Defektmatrix bestimmt werden. Aufgrund der Verschmierung lassen sich die

exakte Position und die Breite des Defektes nicht direkt aus dem C-Scan bestimmen. Ein Vergleich mit der aus der bekannten Position und Breite der Nut definierten Defektmatrix für diese Messung zeigt jedoch, dass die über die Rückfaltung berechnete Defektmatrix die reale Breite und die reale Position des Defektes sehr gut widerspiegelt (vgl. Abbildung 5). Zur Erhöhung des Bildkontrasts wurden jeweils die zeilenweise gebildeten Mittelwerte subtrahiert

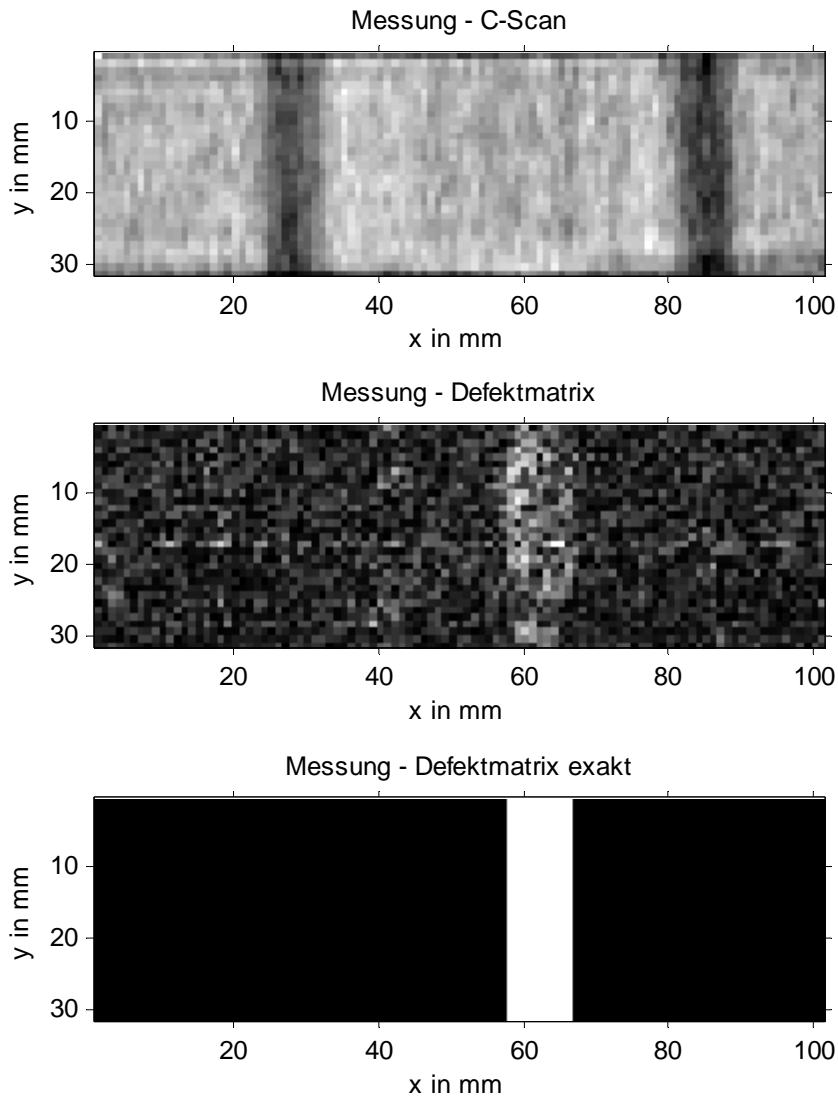


Abbildung 5: Oben: C-Scan der Messung (dicke Probe). Mitte: Berechnete Defektmatrix. Unten: definierte Defektmatrix.

4.2 Dünne Proben

Für die Referenzmessung wird eine der „dünnen“ Proben mit 4 mm Dicke und einer Nut von 4 mm Breite verwendet. Die Restwanddicke an der Nut beträgt 2 mm. Auch hier wird mit Hilfe der bekannten Defektmatrix für diese Referenzmessung die Transferfunktion bestimmt. Im zweiten Schritt wird eine Messung an einer Probe mit ebenfalls 4 mm Dicke durchgeführt. Die Breite der Nut beträgt hier 6 mm. In Abbildung 6 ist zum einen der C-Scan der Messung dargestellt (oben) und das Ergebnis der Rückfaltung (Mitte) im Vergleich zur exakten, d. h. definierten Defektmatrix (unten). Der Vergleich zeigt, dass auch hier die Position des Defektes sehr gut reproduziert werden konnte, die Breite des berechneten Defektes jedoch nicht präzise der Breite des realen Defektes entspricht.

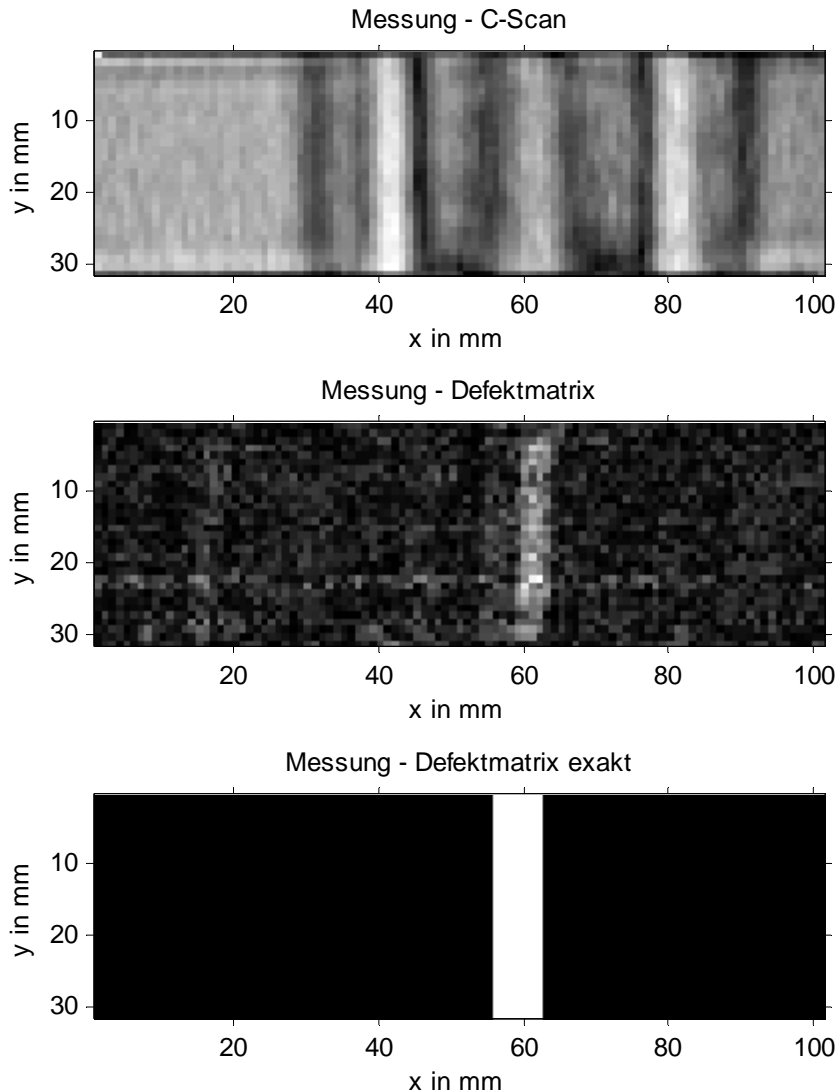


Abbildung 6: C-Scan der Messung (dünne Probe). Mitte: Berechnete Defektmatrix. Unten: definierte Defektmatrix

5 Zusammenfassung

Um bei der einseitigen Prüfung mit luftgekoppeltem Ultraschall eine Auflösung zu erzielen, die näher an der einer Puls-Echo-Messung mit kontaktgekoppeltem Ultraschall liegt, wurde ein Algorithmus entwickelt. Dieser basiert auf der Annahme, dass die Messung der mathematischen Faltung des Defekts im Bauteil mit einer Transferfunktion, die das Messsystem beschreibt, entspricht. Erste Versuche an Modellproben zeigten, dass die Transferfunktion experimentell ermittelt werden kann, um dann unter vergleichbaren Messbedingungen erfolgreich auf weitere Proben angewendet zu werden. Dabei war es möglich, sowohl die Position als auch die Größe des Defekts deutlich zu rekonstruieren, was nur mit den ursprünglich erfassten C-Scans nicht möglich gewesen wäre.

Es sei abschließend bemerkt, dass die berechneten Defektmatrizen durchaus signifikante Rauschpegel besitzen. Zukünftige Arbeiten werden zeigen, in wie weit Rauschen durch geeignete Algorithmen reduziert werden kann, ohne Einbußen in den Ortsinformationen hinnehmen zu müssen. Des Weiteren wird es von Interesse sein, in wie weit dieser Ansatz auf 2D- und 3D- Defektstrukturen erweitert werden kann. Da der Wunsch nach kontaktfreier Prüfung bei einseitigem Zugang vermehrt zu vernehmen ist und

um die fertige Impuls-Echo Methode Hardwareseitig noch gerungen wird, scheint die Untersuchung zur verbesserten Bildgebung anhand adaptierter Algorithmen derzeit als sinnvolle Alternative.

6 Referenzen

- [1] HILLGER, WOLFGANG ; OSTER, R ; SCHULLER, J ; STÖBEL, R ; LANG, S ; BOSSE, J. ; THALER, B. ; ILSE, D. ; BÜHLING, L.: Automated Air-Coupled Ultrasonic Technique for the Inspection of the EC145 Tail Boom. In: *4th International Symposium on NDT in Aerospace*, 2012
- [2] DASCHEWSKI, M ; BOEHM, R ; PRAGER, J ; KREUTZBRUCK, M ; HARRER, A: Physics of thermo-acoustic sound generation Advertisement : Physics of thermo-acoustic sound generation. In: *Journal of Applied Physics* vol. 114 (2013), Nr. 114903, pp. 1–13
- [3] BOVTUN, V. ; DÖRING, J. ; BARTUSCH, J. ; BECK, U. ; ERHARD, A. ; YAKYMENKO, Y.: Ferroelectret non-contact ultrasonic transducers. In: *Applied Physics A: Materials Science and Processing* vol. 88 (2007), Nr. 4, pp. 737–743
- [4] DÖRING, JOACHIM ; BARTUSCH, JÜRGEN ; GAAL, MATE ; KREUTZBRUCK, MARC ; ERHARD, ANTON ; BOVTUN, VIKTOR: Ferroelektret-Prüfköpfe für die zerstörungsfreie Prüfung mit Luftultraschall. In: *Materials Testing* vol. 55, Carl Hanser Verlag (2013), Nr. 2, pp. 96–102
- [5] LUUKKALA, M. ; HEIKKILA, P. ; SURAKKA, J.: Plate wave resonance—a contactless test method. In: *Ultrasonics* vol. 9, Elsevier (1971), Nr. 4, pp. 201–208
- [6] CASTAINGS, M. ; CAWLEY, P.: The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* vol. 100 (1996), Nr. 5, pp. 3070–3077
- [7] CASTAINGS, M ; HOSTEN, B: Ultrasonic guided waves for health monitoring of high-pressure composite tanks. In: *NDT & E International* vol. 41 (2008), Nr. 8, pp. 648–655
- [8] SOLODOV, I. YU. ; STOESSEL, R. ; BUSSE, G.: MATERIAL CHARACTERIZATION AND NDE USING FOCUSED SLANTED TRANSMISSION MODE OF AIR-COUPLED ULTRASOUND. In: *Research in Nondestructive Evaluation* vol. 15 (2004), Nr. 2, pp. 65–85
- [9] RHEINFURTH, M. ; SCHMIDT, F. ; DÖRING, DANIEL ; SOLODOV, I. ; BUSSE, G. ; HORST, P.: Air-coupled guided waves combined with thermography for monitoring fatigue in biaxially loaded composite tubes. In: *Composites Science and Technology* vol. 71, Elsevier Ltd (2011), Nr. 5, pp. 600–608
- [10] WENDEMUTH, A.: *Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung* : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005 — ISBN ISBN 3-540-21885-8
- [11] GLEITER, ANDREAS: *Mess- und Auswertemethoden für die dynamische Thermografie*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2011
- [12] PAPULA, L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 2* : Vieweg+Teubner, 1983 — ISBN 978-3-8348-0564-5