

Ultraschallbildgebung komplexer Bauteile mittels Einbeziehung multipler Einschallwinkel in die Synthetische-Apertur-Fokussierungstechnik

Thomas Scharrer¹, Stefan J. Rupitsch¹, Alexander Sutor¹, Reinhard Lerch¹

¹ Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen, Deutschland

Email: tho.scharrer@fau.de

Einleitung

Die zerstörungsfreie Prüfung großer metallischer Werkstücke mittels Röntgen-Computer-Tomographie (CT) ist auf Grund starker Absorption der Röntgenstrahlung nur begrenzt möglich. Bedingt durch fehlende Projektionsdaten schwer durchstrahlbarer Richtungen ist eine artefaktfreie Rekonstruktion der Bauteilgeometrie somit nicht erreichbar. Fusioniert man die Röntgendaten jedoch mit komplementären Informationen, welche mittels anderer Prüfmodalitäten akquiriert werden, kann eine signifikante Reduktion der Artefakte erzielt werden.

Ziel dieses Beitrags ist die Vorstellung eines Verfahrens, das es erlaubt, solche komplementären Daten der inneren Bauteilgeometrie in Ultraschalltauchtechnik zu gewinnen. Hierzu werden, basierend auf der Methode der virtuellen Quellelemente [1], Puls-Echo-Daten entlang der *a priori* bekannten komplexen Kontur des Bauteils aufgezeichnet. Dies ermöglicht es, Brechungseffekte an der Werkstückoberfläche, welche durch signifikante Diskrepanzen in den akustischen Materialeigenschaften von Koppelmedium und Bauteil auftreten, effizient zu unterdrücken. Mit Hilfe einer anschließenden Verarbeitung der Daten mittels Synthetischer-Apertur-Fokussierungstechnik (SAFT) ist die innere Struktur des Werkstücks abbildbar. Um auch innenliegende Kanten, welche für die Prüfung eine ungünstige Winkelposition einnehmen, reproduzieren zu können, wird der Datensatz pro virtuellem Quellelement zudem um multiple Einschallwinkel erweitert. Auftretende Mehrfachreflexionen zwischen Kontur und Strukturen innerhalb des Bauteils werden zur eindeutigen Identifizierung von Strukturkanten mit Hilfe eines „Predictive-Deconvolution“-Ansatzes [2] unterdrückt. Zudem werden Echosignale der Bauteil-Kontur mit einem „Subspace-Analysis-and-Projection“-Verfahren [3] ausgelöscht, da sie durch die bereits *a priori* bekannte Oberflächengeometrie keine neuen Informationen enthalten und potentielle Strukturen nahe der Oberfläche maskieren können. In den rekonstruierten Bildern zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Abbildbarkeit von Strukturkanten auch in für Ultraschall schwieriger Orientierung im Vergleich zu Messungen, welche ausschließlich Daten mit senkrechtem Schalleinfall bezüglich der Bauteiloberfläche einbeziehen.

Datenaufnahme und Bildrekonstruktion

Das Prinzip des vorgestellten Verfahrens wird an einem metallischen sichelförmigen Prüfstück mit verschie-

denartigen inneren Strukturen verdeutlicht (siehe Abb. 1). Hierbei ist es unabdingbar, dass die unregelmäßig geformte Kontur des Werkstücks *a priori* bekannt ist, was beispielsweise mit einem optischen 3D-Scan erreicht wird. Entlang dieser sogenannten virtuellen Apertur P_{VA} werden in äquidistanten Abständen d virtuelle Quellelemente festgelegt. Anschließend werden, der Methode der virtuellen Quellelemente folgend, pro Element Puls-Echo-Daten in Tauchtechnik aufgezeichnet, wobei sich der Schallwandler im fokalen Abstand d_0 zum Quellelement befindet. Um eine verbesserte Erfassung von Strukturkanten auch in ungünstiger Orientierung zu gewährleisten, wird die Schallausbreitungsrichtung innerhalb des Werkstücks in diskreten Winkelschritten $\alpha_{S,i}$ variiert (siehe Abb. 2). Die entsprechenden Einschallwinkel $\alpha_{C,i}$, unter welchen der Schallwandler hierzu bezüglich der Oberfläche positioniert werden muss, ergeben sich laut Snelliusschem Brechungsgesetz zu

$$\alpha_{C,i} = \sin^{-1} \left(\frac{c_W}{c_S} \cdot \sin \alpha_{S,i} \right). \quad (1)$$

Die Schallgeschwindigkeiten des Koppelmediums c_W bzw. des Prüfstücks c_S betragen 1490 m/s und 5500 m/s. Bei bekanntem -6dB-Aperturöffnungswinkel des Schallwandlers Φ_S kann somit der Aperturwinkel Φ_C des Schallfelds innerhalb des Bauteils zu

$$\Phi_S = 2 \sin^{-1} \left[\frac{c_S}{c_W} \cdot \sin \left(\frac{\Phi_C}{2} \right) \right] \quad (2)$$

bestimmt werden. Anschließend können mit Hilfe einer zeitkorrigierten kohärenten Superposition aller aufgezeichneten Echo-Signale, welche im betrachteten Punkt ein Schallfeld erzeugen, die Strukturkanten des Bauteils rekonstruiert werden (SAFT-Verfahren).

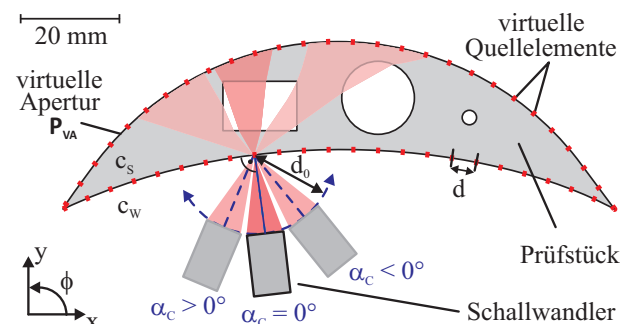


Abbildung 1: Messprinzip: Der Schallwandler wird im fokalen Abstand d_0 in diskreten Winkelschritten $\alpha_{C,i}$ um jedes virtuelle Quellelement, welche entlang der virtuellen Apertur P_{VA} äquidistant im Abstand d verteilt sind, rotiert.

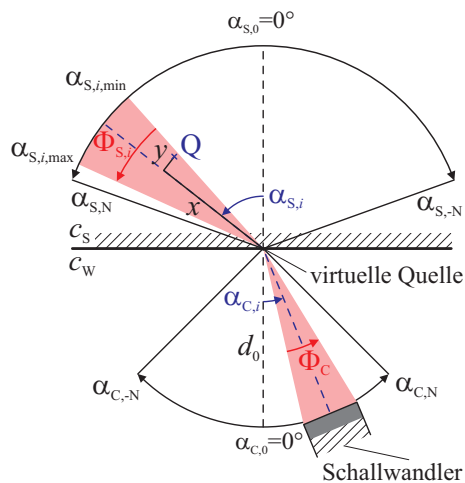


Abbildung 2: Methode der multiplen Einschallwinkel

Datenfilterung

Um eine sichere Identifizierung der rekonstruierten Strukturkanten zu gewährleisten, ist eine Filterung der Daten im Vorfeld des SAFT-Prozesses notwendig. Hierzu wurde zum einen ein adaptiertes „Subspace Analysis and Projection“-Verfahren angewendet, welches es erlaubt, die Echo-Signale der bereits *a priori* bekannten Oberfläche des Bauteils in den Empfangssignalen zu reduzieren. Eine potentielle Maskierung oberflächennaher Strukturen kann somit ausgeschlossen werden. Die Methode, welche auf einer Hauptkomponentenanalyse basiert, erlaubt es, unerwünschte Signalanteile der Messdaten zu reduzieren, indem diese auf einen Unterraum projiziert werden, der orthogonal zu den Basen solcher nicht erwünschter Signalkomponenten ist [3].

Des Weiteren wurde ein „Predictive Deconvolution“-Filter verwendet, um Mehrfachreflexionen, welche innerhalb des Bauteils entstehen, zu unterdrücken. Das Verfahren beruht auf einem Finite-Impulse-Response (FIR)-Filter (Filter mit endlicher Impulsantwort) [2]. Da jedoch die Schichtdicken der Mehrfachreflexionen verursachenden Gebiete nicht bekannt sind und somit nur eine Abschätzung der benötigten Filterparameter möglich ist, ist lediglich ein sicheres Abbilden der Echo-Signale der ersten inneren Struktur möglich. Dies führt dazu, dass Signalanteile späterer Kanten ebenso wie Mehrfachreflexionen abgeschwächt werden.

Ergebnisse

Um das Verfahren zu validieren, wurde das gezeigte Prüfstück mit einem 10 MHz Schallwandler der fokalen Länge $d_0=76$ mm vermessen und anschließend die inneren Strukturkanten wie beschrieben rekonstruiert (siehe Abb. 3). Es zeigte sich, dass die Verwendung multipler Einschallwinkel eine signifikante Verbesserung der Abbildbarkeit der Kanten erlaubt. So konnte im Vergleich zu ausschließlich senkrechter Einschallung ein deutlich größerer Winkelbereich hinsichtlich der Orientierung der Strukturen im Bauteilinneren detektiert werden.

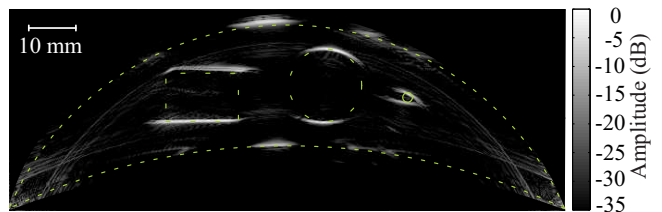


Abbildung 3: Demodulierte und gefilterte SAFT-Daten unter Einbeziehung von 2650 virtuellen Quellelementen (Elementabstand $d=100$ μm). Je Quellelement wurden fünf Einschallwinkel verwendet: $\alpha_C = \{-4^\circ, -2^\circ, 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ\}$.

Zusammenfassung

Zur verbesserten Abbildbarkeit innerer Strukturkanten großer metallischer Werkstücke wurde ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt, multiple Einschallwinkel in die Bildrekonstruktion einzubeziehen. Im Gegensatz zu ausschließlich rechtwinkliger Einschallung werden hierbei pro virtuellem Quellelement unter mehreren diskreten Winkeln Echo-Daten aufgezeichnet. Dies resultiert in unterschiedlichen spezifischen Ausbreitungsrichtungen der akustischen Welle innerhalb des Bauteils. Folglich können auch Strukturen in schwer detektierbarer Orientierung, das heißt in nicht oberflächenparalleler Orientierung, abgebildet werden. Kombiniert mit einem „Predictive Deconvolution“-Ansatz, einem „Subspace Analysis and Projection“-Filter und einer adäquaten Demodulation der Daten ist es möglich, die Abbildbarkeit innerer Strukturen eines Werkstücks signifikant zu verbessern.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen eines K2 Projektes in der LCM GmbH durchgeführt. Die K2 Projekte werden aus Mitteln des österreichischen COMET-K2 Programms finanziert. Die COMET K2 Projekte im LCM werden unterstützt von der Österreichischen Bundesregierung, dem Land Oberösterreich, der Johannes Kepler Universität und allen wissenschaftlichen Partnern, die Teil des K2-COMET Konsortiums innerhalb der LCM GmbH sind.

Literatur

- [1] Passmann, C. and Ermert, H. (1996). A 100-MHz Ultrasound Imaging System for Dermatologic and Ophthalmologic Diagnostics. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 43, 545-522.
- [2] Kishoni, D. (1987). Removal of Dominant Reverberations from Ultrasonic Time-Records of Layered Material by Digital Predictive Deconvolution. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 3, 1075-1078.
- [3] Demirli, R. and Amin, M. G. and Shen, X. and Zhang, Y. D. (2012). Ultrasonic Flaw Detection and Imaging through Reverberant Layers via Subspace Analysis and Projection. *Advances in Acoustics and Vibration*, 1-10.