

Detektion von Schäden mittels Ultraschall für Flugzeugbauteile aus Faserverbundstoffen

Franz Graf¹, Susanne Rexeis², Johannes Himmelbauer³

¹ JOANNEM RESEARCH, 8010 Graz, Österreich, Email: franz.graf@jaonneum.at

² JOANNEM RESEARCH, 8010 Graz, Österreich, Email: susanne.rexeis@jaonneum.at

³ Software Competence Center Hagenberg, 4232 Hagenberg, Österreich, E-Mail: johannes.himmelbauer@scch.at

Einleitung

Flugzeugkomponenten aus Faserverbundwerkstoffen erfreuen sich aufgrund ihrer höheren Steifigkeit und ihres geringeren Gewichts im Vergleich zu metallischen Strukturen zunehmender Beliebtheit in der Aviation. Bei äußeren Einwirkungen auf die Struktur können Ablösungen von Schichten der Faserverbundwerkstoffe, sogenannte Delaminationen entstehen, die die Eigenschaften des Materials mindern. Zur Sicherstellung der strukturellen Integrität der Komponenten im laufenden Betrieb bieten sich kontinuierliche zerstörungsfreie Prüfverfahren an. Diese Arbeit beschreibt den im Projekt ASHMOSD-II entwickelten Demonstrator für die Online-Schadensdetektion in Faserverbundplatten und die verwendeten Algorithmen zur Detektion und Sichtbarmachung der Defekte. Die Evaluierungsergebnisse des Demonstrators werden präsentiert und eine Gegenüberstellung zu früheren Ergebnissen mit metallischen Strukturen angestellt.

Prinzip der Schadensdetektion

Die Online-Schadensdetektion erfolgt mittels Ultraschallstrahlen und ist in Abbildung 1 veranschaulicht. Ein Array bestehend aus acht piezoelektrischen Aktuatoren wird verwendet, um Burst-Signale zeitversetzt zu aktivieren. Mit acht faseroptischen Sensoren werden die Systemantworten aufgezeichnet. Reflexionen an einer Delamination können durch algorithmische Aufbereitung der Messsignale in Ortsbildern visualisiert werden. Da die Messungen durch Phänomene wie Modenkonversion, Modenselektion, Temperatureinflüsse, Anisotropie und Dispersion beeinflusst werden, wird eine messtechnische oder algorithmische Kompensation dieser Störeinflüsse vorgenommen, die in den folgenden Kapiteln näher beschrieben wird.

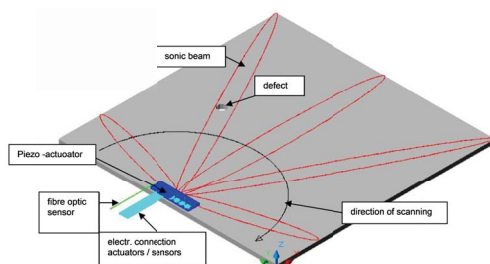


Abbildung 1: Schema des Messvorgangs.

Demonstrator

Die im Rahmen des Projekts entwickelte, transportable Hardwarelösung umfasst eine Aktuations-, Detektions- und Steuerungseinheit, sowie eine Anwendungssoftware zur Steuerung des Systems und Auswertung der Messsignale. Das System wurde mit unterschiedlichen Faserverbundplatten evaluiert. Die Auswahl der Anregungsfrequenzen zielte darauf ab, für eine der beiden in den Messungen auftretenden Moden der Lamb-Wellen (A0 und S0) eine besonders dominante Ausprägung zu erzielen und damit den Einfluss der nicht dominanten Mode möglichst gering zu halten.

Methodik

Die Anregung der Platte erfolgt mit einem Wavelet im Round-Robin Verfahren mit den $N = 8$ Aktuatoren a_n . Die Systemantwort ξ_m wird mit den $M = 8$ Sensoren s_m gemessen. Um die Defekte im Ortsbild sichtbar zu machen wird mittels Delay-&-Sum Beamforming [1] die Strahlformungsenergie $p(x, y)$ für das Zeitfenster t_w an jedem Bildpunkt (x, y) auf der Oberfläche der Platte wie folgt bestimmt:

$$p(x, y) = \int_{t=-t_w/2}^{t_w/2} \xi_b(x, y, t) \quad (1)$$

Das strahlgeformte Signal ξ_b ergibt sich aus der Summe der verzögerten und gefensterter Sensordaten aller Sensor-/Aktuatorpaare:

$$\xi_b = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \xi_m(t_d(x, y) + t) \cdot \eta(t) \quad (2)$$

Als Fensterfunktion $\eta(t)$ wird ein Hanning-Fenster auf ξ_m angewendet. Die Signallaufzeit $t_d(x, y)$ setzt sich aus den Laufzeiten vom Aktuator zur Abtastposition $t_{a_n}(x, y)$, von der Abtastposition zum Sensor t_{s_m} und einem messtechnisch bedingten Offset zusammen.

$$t_d(x, y) = t_0 + t_{a_n}(x, y) + t_{s_m}(x, y) \quad (3)$$

mit $t_{a_n}(x, y)$:

$$t_{a_n}(x, y) = \frac{\sqrt{(x_{a_n} - x)^2 + (y_{a_n} - y)^2}}{c_{ga_n}} \quad (4)$$

Die Berechnung von t_{s_m} erfolgt analog zur Berechnung von t_{a_n} . Einen wichtigen Einfluss auf t_d haben somit auch die angenommenen Gruppengeschwindigkeiten der Welle

c_{gan} bzw. c_{gsm} im Medium. Neben dem Delay-&-Sum Beamforming wurde im Rahmen des Projekts auch MVDR-Beamforming [2] für die Ermittlung der Strahlformungsenergie evaluiert. Es stellte sich jedoch heraus, dass der Einsatz dieses Beamforming-Algorithmus im Allgemeinen nicht die erhofften Verbesserungen bei der Detektion erzielen konnte.

Unterdrückung von Störeinflüssen

Bereits zu Beginn des Projekts wurde erkannt, dass die Wandreflexionen deutlich stärker ausgeprägt sind als die Reflexionen an Delaminationen. Für die Visualisierung wird deshalb das Residuum des Messsignals zu einer Baseline-Messung an der unbeschädigten Platte ausgewertet. Um die Einflüsse durch Dispersion und Anisotropie zu kompensieren wurden die frequenz- und richtungsabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den Platten bestimmt und in die Berechnung der Laufzeiten einbezogen. Der temperaturabhängige Frequenzdrift, eine wesentliche Störkomponente bei der Berechnung des Residuums wurde mittels Single-Sideband Pitchshifting [3] kompensiert.

$$x_{w_c} = x \cos(w_c T_s) + \hat{x} \sin(w_c T_s) \quad (5)$$

Die Frequenz der Impact-Messung x wird um w_c verschoben, sodass die mittlere Abweichung zur Baseline-Messung minimal wird. \hat{x} ist die Hilbert-Transformation von x .

Evaluierung

Das entwickelte System wurde für zwei Sensoranordnungen evaluiert. In der Phased-Array Konfigurationen sind die Sensoren in einem Array direkt vor den Aktuatoren angeordnet, in der Sparse-Array Konfiguration sind die Sensoren an den Rändern der Platte verteilt. Für den Demonstrator wurde eine Platte mit Honeycomb-Struktur mit beiden Konfigurationen ausgestattet. Die Anregung erfolgte mit einem 50kHz Morlet-Wavelet. Delaminationen wurden an verschiedenen Positionen auf der Platte durch Platzierung eines Gewichts simuliert. Die Evaluierung ergab, dass bei Verwendung der Phased-Array Konfiguration die Schadensdetektion in den Ortsbildern nur sehr schwach ausgeprägt war. In dieser Konfiguration scheinen verschiedene Störquellen nach wie vor einen erheblichen Einfluss auf die Detektionsleistung zu haben. Im Gegensatz dazu konnten mit der Sparse-Array Konfiguration vielversprechende Ergebnisse erzielt werden. Eine Überlagerung der Ortsbilder der Einzelsensoren lieferte eine zusätzliche Verbesserung der Resultate. In Abbildung 2 ist ein Beispiel für ein solches Ortsbild zu sehen. Die Detektion um das platzierte Gewicht ist rot gekennzeichnet. Das Residuen-Ortsbild ist um das Gewicht am stärksten ausgeprägt. Was jedoch auffällt ist der große Radius der Detektion im Ortsbild, der die exakte Lokalisation und vor allem die Abschätzung der Schadensgröße beeinträchtigt.

Bereits in früheren Phasen des Projekts wurden Messungen an Aluminiumplatten durchgeführt [4]. Interessanterweise wurden hier mit der Phased-Array Konfiguration

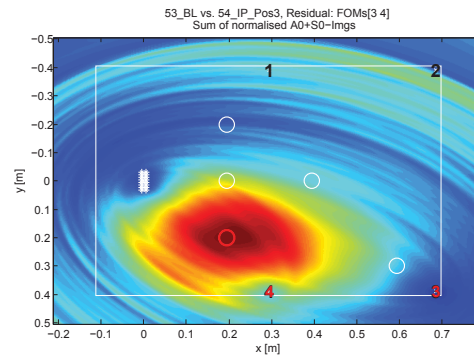


Abbildung 2: Beispiel für Detektion an der Honeycomb Demonstrator Platte. Der rote Kreis markiert die Stelle an der das Gewicht platziert wurde. Es wurden die Sensorsignale von FOM 3 und 4 ausgewertet.

die besseren Ergebnisse erzielt. Die Schadenslokalisierung war in Aluminium deutlich präziser möglich.

Zusammenfassung

Die im Rahmen des Projektes ASHMOSD-II entwickelte Hardwarelösung konnte erfolgreich mit einer Sparse-Array Sensor-Konfiguration evaluiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass angewandten Algorithmen die Auswirkungen von Störeinflüssen wie Reflexionen, Temperaturdrift, Anisotropie und Dispersion kompensieren und vielversprechende Detektionsergebnisse erzielen. Im Vergleich zur Detektion in Aluminium ist die Detektionsleistung jedoch noch weniger präzise. Mit dem Demonstrator wurde jedoch eine gute Ausgangsbasis geschaffen, um die bestehenden Algorithmen weiterzuentwickeln und die Detektionsleistung weiter zu erhöhen. Ziel ist es mittelfristig, die speziell für die europäische Flugzeugindustrie entwickelte Technologie zur Marktreife zu führen und auch in anderen Bereichen einzusetzen. So ist es auch erstrebenswert die Methoden zukünftig im Automobil- und Schienenbereich zu nutzen.

Das Projekt ASHMOSD-II wurde im Rahmen des Programms TAKE OFF durch die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG und das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie gefördert.

Literatur

- [1] Benesty, J. et. al.: Microphone Array Signal Processing. Springer, Heidelberg, 2008
- [2] Engholm M.: Ultrasonic Arrays for Sensing and Beamforming of Lamb Waves. Acta Universitatis Upsalensis, 2010
- [3] Estephan H., Scott S., Wanninger D.: Real-Time Speech Pitch Shifting on an FPGA. Villanova University, 2006
- [4] Scheerer, M. et. al.: Development and testing of an ultrasonic phased array system based on piezo actuators and fiber optic sensors. 8th Int. Workshop on Structural Health Monitoring (2011), 967 – 974