

## Strukturüberwachung an luftfahrtkonformen CFK-Platten

Mihail Lilov, Michael Kauba, Dirk Mayer, Tobias Melz

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, 62489 Darmstadt,

E-Mail: [mihail.lilov@lbf.fraunhofer.de](mailto:mihail.lilov@lbf.fraunhofer.de)

### Einleitung

Im Flugverkehrssektor steht ein sicherer und zuverlässiger Betrieb an erster und wichtigster Stelle. Bei einer ständig wachsenden Weltwirtschaft, immer strenger werdenden Umweltregeln und dem Streben nach Gewichtsreduktion sind Flugzeugstrukturen so zu realisieren, dass sie möglichst leicht ausfallen und ihre Aufgaben sicher erfüllen. Angesichts dieser steigenden Anforderungen werden Leichtbaumaterialien wie Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) eingesetzt. Der Vorteil von CFK ist eine hohe Steifigkeit der Struktur bei gleichzeitig niedrigem Gewicht. Nachteilig stellt sich hierbei die schwere bis unmögliche Erkennung von kleinen unsichtbaren Delaminationen des Faserverbunds dar. Da diese mit der Zeit wachsen können und oftmals das Versagen der betreffenden CFK-Struktur verursachen, stellen sie für den Betrieb eines Flugzeugs ein verstecktes und nicht zu unterschätzendes Risiko dar. Um solche Schäden zu überwachen und zu vermeiden, werden in dieser Arbeit zwei Verfahren zur Strukturüberwachung, die Methode der breitbandigen Ultraschallerregung (BU) und die Methode der elektromechanischen Impedanz (EMI), unter Laborbedingungen in einem Compression-After-Impact (CAI) Test untersucht. Anhand der gewonnenen Messergebnisse wird die Anwendbarkeit der Überwachungsmethoden untersucht und verifiziert. In Folgearbeiten werden die gewonnenen Erkenntnisse weitergeführt und in einer kompakten und kostengünstigen Hardware umgesetzt.

### Breitbandige Ultraschallerregung

Eine sehr verbreitete und einfache Strukturüberwachungsmethode ist die BU. Diese Methode charakterisiert sich durch einfache Umsetzung und Handhabung [1]. Hierbei werden mechanische Schwingungen als Anregung in die zu überwachende Struktur mittels eines Aktors eingeleitet und mithilfe eines Sensors die Strukturantworten aufgenommen. Als Anregungssignal kann, wie der Name des Verfahrens ausdrückt, zum Beispiel ein stochastisches Rauschen, welches eine Bandbreite bis in MHz-Bereich besitzen kann, verwendet werden [1]. Sowohl als Aktor als auch als Sensor werden piezoelektrische Energiewandler verwendet.

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau der BU-Methode. An der Struktur sind zwei Piezowandler angebracht, wobei das linke Modul als Aktor und das rechte Modul als Sensor agiert. Ausgewertet wird die Strecke zwischen den beiden Elementen durch Bildung der Übertragungsfunktion. Diese gibt Aufschluss, wie sich das gesendete Signal zu dem empfangenen Signal durch Filterung mit der Strecke verändert.

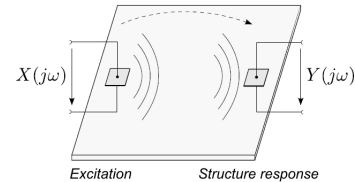


Abbildung 1: Funktionsprinzip der BU-Methode

Die zu untersuchende Übertragungsfunktion lässt sich ausdrücken als das Verhältnis von Ausgangsspektrum des empfangenen Signals zum Eingangsspektrum des eingeleiteten Signals:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad [-] \quad (1)$$

### Elektromechanische Impedanz

Die EMI ist eine Strukturüberwachungsmethode, die ähnlich wie die BU-Methode funktioniert. Auch hier werden mechanische Schwingungen mit beliebiger Form in die Struktur eingeleitet. Abweichend von der BU-Methode wird hier nur ein piezoelektrischer Energiewandler benötigt, der an der zu überwachenden Struktur appliziert ist, siehe Abbildung 2.

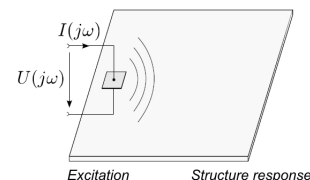


Abbildung 2: Funktionsprinzip der EMI-Methode

Untersucht wird hier die elektrische Impedanz des Piezowandlers, die sich aus dem Verhältnis der komplexen Größen Eingangsspannung zu Eingangsstrom bildet, siehe Gleichung (2). Bestimmt wird die Impedanz durch die Kapazität des Piezowandlers sowie den mechanischen Struktureigenschaften [2]. Hierbei spiegeln sich Strukturänderungen direkt in der Amplitude beziehungsweise in dem Phasenwinkel der komplexen Impedanz.

$$Z(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{I(j\omega)} \quad [\Omega] \quad (2)$$

## Versuchsaufbau

Die Strukturüberwachungsversuche mit den beiden Überwachungsmethoden wurden begleitend zu einem genormten CAI Test an luftfahrtkonformen CFK-Platten durchgeführt. Ziel dieses Tests ist, die Restdruckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung zu bestimmen, da diese Größe im Flugzeugbau ein Maß für die Schadenstoleranz des geschädigten Bauteils darstellt [3].

Bei den beiden Strukturüberwachungsmethoden wurden kompakte eingehauste Piezowandler mit den Abmessungen 13mmx16mmx0,6mm eingesetzt. Die zu untersuchenden Platten wurden mit zwei mittig angeordneten piezoelektrischen Energiewandlern instrumentiert. Als Messgerät wurde ein FFT-Analyzer eingesetzt, der über eine GPIB-Schnittstelle die Messdaten an einem Messrechner übermittelt, siehe Abbildung 3. Als Anregungssignal wurde ein Gleitsinus mit einer Amplitude von 5V und einem Frequenzbereich von 0Hz bis 100kHz verwendet.

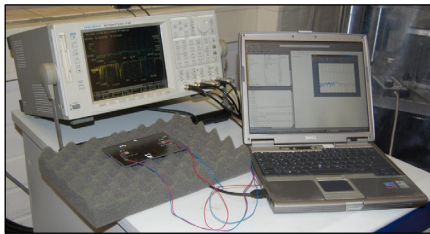


Abbildung 3: SHM-Versuchsaufbau

Zur Erfassung des Eingangsstroms der Wandler wurde für die EMI-Messung ein Shunt-Widerstand von 10Ω verwendet. Insgesamt wurden 30 CFK-Platten mit den Abmaßen 320mmx200mm mit einer Dicke von 1,7mm (10Stk.) und 2,5mm (20Stk.) in zwei Versuchsschritten untersucht. Zuerst wurden die nicht beschädigten Platten vermessen und im Anschluss des Schlagschadens erneut vermessen, mit jeweils zehnfacher Durchführung. Die Messungen während der Kompression der Struktur bei dem CAI-Test wurden hierbei kontinuierlich durchgeführt.

## Versuchsergebnisse

Bestimmt durch die Art der durchgeführten Versuche wurde zur Auswertung der Messergebnisse als Schadensindex der Korrelationskoeffizient gebildet. Er zeigt den linearen Zusammenhang zweier Signale und wird wie folgt berechnet:

$$Cor(H_D, H_U) = \frac{Cov(H_D, H_U)}{\sqrt{Var(H_D)} \cdot \sqrt{Var(H_U)}} \quad [-] \quad (3)$$

Bei dieser Arbeit wurde die erste Messung in Kombination mit der jeweils folgenden Messung betrachtet. Zusätzlich wurde bei der Ergebnissauswertung eine Unterteilung des gesamten Frequenzbereichs in 16 Bänder durchgeführt um so die empfindlichsten Frequenzbereiche festzustellen.

Abbildung 4 zeigt die Versuchsergebnisse für den ersten Versuchsteil, die Untersuchungen vor und nach dem Schlagschaden, für das Frequenzband von 50kHz bis 63kHz. Hierbei sind beispielhaft die Versuchsergebnisse bei Schlagschäden von 10J, 20J und 40J dargestellt.

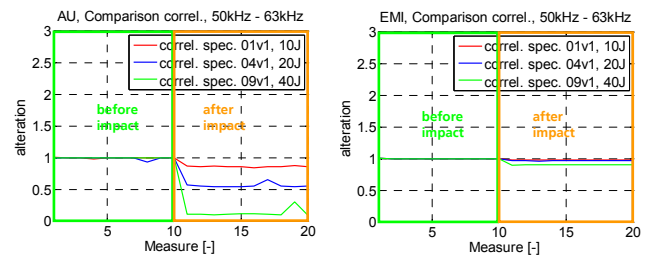


Abbildung 4: Versuchsergebnisse Impact-Test

Deutlich wird hier, dass zwischen der Energie des Schlagschadens und dem Korrelationskoeffizient ein deutlicher Zusammenhang besteht. Ebenfalls zeigt sich, dass die Schadenserkenkung durch die BU-empfindlicher als durch die EMI-Methode ist.

Auch bei den Untersuchungen während der Kompression des CAI-Tests kann anhand der Versuchsergebnisse auf ein Schadenswachstum geschlossen werden. Je länger die Kompression dauert, desto mehr sinkt der Schadensindex. Auch hier zeigt die BU-Methode eine höhere Empfindlichkeit.

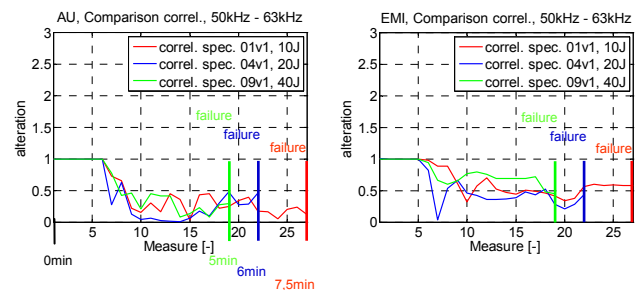


Abbildung 5: Versuchsergebnisse Kompressionstest

## Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der durchgeführten Versuche wurde gezeigt, dass sich die BU- und die EMI-Methode gut als Verfahren zur Schadenserkenkung eignen. Eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Schadensenergie und dem aus den Messdaten gebildeten Schadensindex, dem Korrelationskoeffizient, wurde festgestellt. In dieser Arbeit wurden alle Strukturüberwachungsmessungen mithilfe von Laborgeräten durchgeführt. Eine Umsetzung der Strukturüberwachungsmethoden in eine mobile, kompakte und kostengünstige Hardware wird in Anschlussarbeiten verfolgt.

## Literatur

- [1] W.J. Staszewski, C. Boller and G.R. Tomlinson: Health Monitoring of Aerospace Structures (2004), Smart Sensor Technologies and Signal Processing, Jon Wiley & Sons, Ltd.
- [2] J. Pohl, S. Herold, G. Mook and F. Michel: Damage detection in smart CFRP composites using impedance spectroscopy (2001), Institute of Publishing, Smart Materials and Structures 10, 834–842
- [3] G. Riegert, Th. Keilig, R. Aoki, K. Drechsler und G. Busse: Schädigungscharakterisierung an NCF-Laminaten mittels Lock-In Thermographie und Bestimmung der CAI-Restfestigkeiten (2005), 19. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, 5/V2