Integrierte Strukturüberwachung von Faserverbundwerkstoffen

Ringvorlesung – Sensorische Materialien



Vortragender

Dr.-Ing. Daniel Schmidt

vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

Arbeitsschwerpunkte:

- Systeme zur integrierten Strukturüberwachung
- Piezokeramische Aktuator-Sensor-Systeme
- Neuartige zerstörungsfreie Prüfverfahren auf Basis von Ultraschall
- Fertigung und mechanische Prüfung von Faserverbundwerkstoffen







Inhalt

- Wartung und Instandsetzung von Verkehrsflugzeugen
- System zur integrierten Strukturüberwachung auf Basis von Lambwellen
- Konzept eines Systems zur integrierten Strukturüberwachung am Beispiel einer Luftfahrt-Anwendung





Wartung und Instandhaltung von Verkehrsflugzeugen

- Wartung und Instanthaltung von Flugzeugen ist aufwendig und kostenintensiv
- Wartungskosten von Verkehrsflugzeugen betragen ca. 30% der Gesamtkosten
- Wartung und Instandhaltung erfolgt in regelmäßigen Intervallen im Rahmen von:
 - A-Checks (ca. alle 2 Monate)
 - B-Checks (ca. alle 3-4 Monate)
 - C-Checks (ca. alle 1-2 Jahre)
 - D-Checks (ca. alle 6-10 Jahre)



Inspektion und Reparatur innerhalb eines D-Checks



D-Check eines Airbus A340

Werkstoffe für Verkehrsflugzeuge

- Verkehrsflugzeuge werden größtenteils aus Aluminium hergestellt
- Um Gewicht und damit Treibstoff und CO₂ zu reduzieren, werden zunehmend Faserverbundwerkstoffe aus Glas- und Kohlefaser eingesetzt
- Faserverbundwerkstoffe ermögliche eine Gewichtsreduktion von ca. 30% gegenüber Aluminium





Bauteil aus Faserverbundwerkstoffen (Kohlefaser)

Typische Schäden bei Verkehrsflugzeugen

- Metalle und Faserverbundwerkstoffe zeigen unterschiedliche Typen von Schäden und müssen unterschiedlich inspiziert werden
- Schäden in Faserverbundwerkstoffen (Delaminationen) sind äußerlich kaum sichtbar und müssen z.B. mit Ultraschall detektiert werden
- Herkömmliche Prüfverfahren (z.B. Ultraschall) sind zeit- und kostenintensiv



Typische Schäden bei Verkehrsflugzeugen

- Schäden ereignen sich häufig am Flugzeugrumpf im Bereich der Türen
- Schäden werden meist am Boden beim Be- und Entladen verursacht
- Unvorhergesehene Schäden verursachen Ausfallzeiten des Flugzeugs und damit hohe Kosten für die Fluggesellschaft





Inspektion von Faserverbunden bei Luftfahrzeugen

- Schadenstolerantes Konstruktionsprinzip bei Luftfahrtstrukturen





Inspektion von Faserverbunden bei Luftfahrzeugen

Vorteile eines SHM-Systems:

- verlängerte Inspektionsintervalle f
 ühren zu h
 öherer Verf
 ügbarkeit von Luftfahrzeugen
- höhere zulässige Spannungen ermöglichen ein erweitertes
 Leichtbaupotential





zulässige Spannungen

Lambwellen für eine integrierte Strukturüberwachung

- Geführte Ultraschallwellen (Lambwellen) in plattenartigen Strukturen
- Lambwellen besitzen eine hohe Sensitivität gegenüber Schäden
- Min. zwei unterschiedliche Moden bei einer gegebenen Frequenz:
 - Symmetrische Moden ($S_0, S_1, S_2,...$)
 - Antisymmetrische Moden (A₀, A₁, A₂,...)





Gesamtsystem zur integrierten Strukturüberwachung

Struktur

- Wellenausbreitung
- Welleninteraktion mit Schäden und Strukturbauteilen

Aktuatoren & Sensoren

- Wellenanregung und -empfang
- Strukturkonforme Integration
- Netzwerkkommunikation
- Energieversorgung

Schadensdetektion & -lokalisation

- Signalaufbereitung
- Eindeutige Schadensindikatoren
- Algorithmen zur Schadensdetektion



SHM-Gesamtsystem

Wie muss ein SHM-System konzipiert sein, um Schäden zuverlässig unter verschiedenen Betriebs- und Umweltbedingungen detektieren und lokalisieren zu können?

- detailliertes Verständnis zur Ausbreitung und Interaktion von Lambwellen
- Gewährleistung der Beobachtbarkeit von unterschiedlichen Schadenszenarios bei einem gegebenen Aktuator-Sensor-Netzwerk
- Nutzung von eindeutigen Indikatoren zur Schadensdetektion
- Robustes, leichtes und kostengünstiges SHM-System
- spezifische Analyse und Systementwicklung im Hinblick auf das Anwendungsszenario



Ausbreitung und Interaktion von Lambwellen

- Untersuchung der Wellenausbreitung und -interaktion mit:
 - Laser-Scanning-Vibrometer
 - Nummerischen und analytische Methoden



Wellenausbreitung (Laser-Scanning-Vibrometer)

Schaden





Aktuator

Ausbreitung von Lambwellen in der Struktur

- Unterschiedliche, frequenzabhängige Phasengeschwindigkeit der Moden
- Richtungsabhängige Phasengeschwindigkeiten in anisotropen Strukturen





Ausbreitung von Lambwellen in der Struktur

- Wellenausbreitung wird zusätzlich beeinflusst durch:
 - materialabhängige Dämpfung
 - thermische und mechanische Spannungen
 - Feuchte, Materialalterung





Ausbreitung von Lambwellen in der Struktur

- Wellenausbreitung wird zusätzlich beeinflusst durch:
 - materialabhängige Dämpfung
 - thermische und mechanische Spannungen
 - Feuchte, Materialalterung



Interaktion von Lambwellen in der Struktur

- Lambwellen besitzen eine hohe Sensitivität gegenüber Schäden
- Interaktion von Lambwellen an Strukturinhomogenitäten, wie bspw. Schäden, Versteifungen, Bauteilrändern:
 - Reflexion, Transmission und Absorption
 - Modenkonversion
 - Streuung





Interaktion von Lambwellen in der Struktur

- Lambwellen besitzen eine hohe Sensitivität gegenüber Schäden
- Interaktion von Lambwellen an Strukturinhomogenitäten, wie bspw. Schäden, Versteifungen, Bauteilrändern:
 - Reflexion, Transmission und Absorption
 - Modenkonversion
 - Streuung





- Piezokeramische Wandler als Aktuatoren und Sensoren
 - großer Frequenzbereich (< MHz)
 - geringe elektrische Leistung (µW-Bereich)
- Einbettung von spröden Piezokeramiken in ein Polymer:
 - Aushärtung des Polymer wird zwischen 120-180°C
 - Druckvorspannung der Piezokeramik durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten
 - Druckvorspannung erlaub die Belastung mit Zugspannungen
 - erhöhte Zuverlässigkeit und Lebensdauer









- Robustes Aktuator-Sensor-Netzwerk mit Piezokompositen:
 - Piezokomposite und Kabel eingebettet in EPDM-Matrix
 - verschiedene Anschluss und Steckerlösungen
 - verschiedene Formen und Ausführungen der Piezokeramiken
 - Integration zusätzlicher Elektronik, wie bspw. Multiplexer, Vorverstärker oder Sender möglich



- Herstellung von Faserverbundstrukturen mit integrierten SHM-Netzwerk (Co-Curing/Co-Bonding)
- Integration der SHM-Netzwerke in den Fertigungsprozess von Faserverbundstrukturen in Form eines Halbzeugs
- Zeit- und kostengünstiger Prozess, da kein zusätzlicher Klebeprozess notwendig ist



- Entwicklung von modenselektiven Wandlern
 - Abschwächung bzw. Verstärkung von einzelnen Moden
 - Reduktion des komplexen, multimodalen Wellenfelds
- Nutzung von Wandlern mit interdigitalen Elektrodenstrukturen
- Abstimmung der Elektrodenstruktur auf die Wellenlänge (λ)





- Entwicklung von modenselektiven Wandlern
 - Abschwächung bzw. Verstärkung von einzelnen Moden
 - Reduktion des komplexen, multimodalen Wellenfelds
- Nutzung von Wandlern mit interdigitalen Elektrodenstrukturen
- Abstimmung der Elektrodenstruktur auf die Wellenlänge (λ)





Schadensdetektion und -lokalisation

- Schadensdetektion durch Vergleich zwischen Referenzsignal (schadensfreier Zustand) und aktuellem Signal
- Nutzung von verschiedenen Algorithmen zur Schadensquantifizierung
- Auswertung von u.a.
 - Amplitude
 - Energie
 - Frequenz
 - Laufzeit



Method Name	Mathematical Formula
Correlation coefficient	$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{N} S_{H,i} S_{D,i} - \sum_{i=1}^{N} S_{H,i} \sum_{i=1}^{N} S_{D,i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} S_{H,i}^{2} - (\sum_{i=1}^{N} S_{H,i})^{2}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N} S_{D,i}^{2} - (\sum_{i=1}^{N} S_{D,i})^{2}}}$
Signal Amplitude Peak Ratio	$DI = \frac{\max[S_H]}{\max[S_D]}$
Signal Amplitude Peak Squared Percentage Differences	$DI = 1 - \left(\frac{\max[S_{H}] - \max[S_{D}]}{\max[S_{H}]}\right)^{2}$
Signal Amplitude Hilbert Transform Maximum	$DI = 1 - \left \frac{\max[\mathbf{H}[S_H]] - \max[\mathbf{H}[S_D]]}{\max[\mathbf{H}[S_H]]} \right $
Signal Sum of Squared Differences	$DI = 1 - \frac{\sum (S_H - S_D)^2}{\sum S_H^2}$
Welch-based Power Spectral Density	$DI = 1 - \frac{\left \int_0^{2 \cdot f_{ex}} \mathbf{PW}[S_D] df - \int_0^{2 \cdot f_{ex}} \mathbf{PW}[S_H] df\right }{\int_0^{2 \cdot f_{ex}} \mathbf{PW}[S_H] df}$
Welch-based Transfer Function	$DI = 1 - \frac{\left \int_0^{2 \cdot f_{ex}} \mathbf{TF}[S_D] df - \int_0^{2 \cdot f_{ex}} \mathbf{TF}[S_H] df \right }{\int_0^{2 \cdot f_{ex}} \mathbf{TF}[S_H] df}$
Cross Correlation based TOF Percentage Difference	$DI = 1 - \frac{\left t_{maxCC}^{H} - t_{maxCC}^{D} \right }{t_{maxCC}^{H}}$ $t_{maxCC}^{H,D} = \underset{t}{\operatorname{argmax}} \left[CC_{H,D}(t) \right]$
Cross Correlation Maximum Percentage Difference	$DI = 1 - \frac{ \max[CC_H] - \max[CC_D] }{\max[CC_H]}$
Hilbert Transform based TOF Percentage Difference	$DI = 1 - \frac{\left t_{max\mathbf{H}}^{H} - t_{max\mathbf{H}}^{D} \right }{t_{max\mathbf{H}}^{H}}$ $t_{maxCC}^{H,D} = \underset{t}{\operatorname{argmax}} \left[\mathbf{H}[S_{H,D}(t)] \right]$
Discrete Wavelet Transform Approximation Coefficients based DI	$DI = 1 - \frac{\sum (\mathbf{DWT}[S_H] - \mathbf{DWT}[S_D])^2}{\sum \mathbf{DWT}[S_H]^2}$
Ratio of Covariance Matrix Eigenvalues	$\rho = 1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$

Schadensdetektion und -lokalisation

- Schadensquantifizierung wird für jeden Aktuator-Sensor-Pfad durchgeführt
- Elliptische Verteilungsfunktion ermittelt den Einflussbereich eines jeden Aktuator-Sensor-Pfads
- Superposition der Schadenswahrscheinlichkeiten für jeden Aktuator-Sensor-Pfad
- Schadenswahrscheinlichkeit → Farbskala
- Schadensort → lokales Maximum
- Schadensgröße → Schwellwert der Farbskala



Elliptische Verteilungsfunktion für ein einzelnes Aktuator-Sensor-Paar



Schadensdetektion in einer CFK-Platte





Konzept eines SHM-Systems -Türumgebungsstruktur



- Türumgebungsstruktur ist eine hochbelastete Struktur, die eine hohe Schadenshäufigkeit aufweist
- Fertigung und Test einer kompletten Türumgebungsstruktur mit integrierten Sensornetzwerk
- Integration von 584 Sensoren
- Abmaße: ca. 5,1 x 3,5 m







Konzept eines SHM-Systems -Türumgebungsstruktur



- Ablage der Haut mittels AFP-Verfahren (Automated Fiber Placement)
- Ablage der Sensornetzwerke per Hand mittels Laserprojektion
- Aushärtung der Struktur und Co-Bonding der SHM-Netzwerke im Autoklaven









- Alle 584 Sensoren sind voll funktionsfähig nach dem Fertigungsprozess



Konzept eines SHM-Systems -Türumgebungsstruktur



- Nutzung kommerziell verfügbarer Hardware zur Datenaufzeichnung
- Referenzmessungen (ohne Schaden) bei verschiedenen Temperaturen
- Einbringung von 112 Impact mit bis zu 130J mit einer Druckluftkanone
- Ultraschallprüfung der Impact-Zone, um Schadensgröße zu quantifizieren
- Aufzeichnen der SHM-Signale zur Schadensbewertung:
 - Niedriger Frequenzbereich (antisymmetrischer Mode): 50...100kHz
 - Hoher Frequenzbereich (symmetrischer Mode): 150...250kHz





Ultraschallprüfung der Impacts



Konzept eines SHM-Systems -Türumgebungsstruktur



- Algorithmen finden Delaminationen und Ablösungen im Durchmesser von 25,4mm
- Algorithmen produzieren einen maximalen Lokalisierungsfehler von 31mm







Daniel Schmidt Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig Tel.: +49 531 295-2356 E-Mail: daniel.schmidt@dlr.de



...vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

