

# Fehlerfrüherkennung von CFK-Strukturen mittels integrierter MFC-Sensoren

Ines Brabandt<sup>1</sup>, Florian Riesberg<sup>1</sup>, Norbert Rümmler<sup>1</sup>, Jan Thiele<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AMITRONICS Angewandte Mikromechatronik GmbH, 82229 Seefeld, E-Mail: info@amitronics.de

## Einleitung

Der Markt für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe wächst stetig, da in vielen Bereichen, wie dem Transportwesen, dem Maschinenbau und zunehmend auch in der Automobilindustrie die Werkstoff- und Gewichtsanforderungen steigen und der Einsatz von Leichtbaukonzepten forciert wird. Neue Materialien bedeuten auch immer neue Risiken in Bezug auf Auslegung, Verarbeitung, Qualitätskontrolle und Wartung. Aus diesem Grund sollten Bauteilüberwachungen in Umgebungen, in denen herkömmliche Kontrollverfahren nicht anwendbar sind, durch Überwachungssysteme ersetzt werden. Am Beispiel eines Flugzeugpropellers erfolgte im Rahmen des Förderprojektes „PropCMS“ (VDI/VDE-IT) die Entwicklung und Realisierung eines Prototyps zur Offline-Zustandsüberwachung, welcher in der Lage ist:

- einfache visuelle Analysen des Zustandes der Propellerblattstruktur zu gewährleisten um,
- Strukturschäden in Rotorblättern zu erkennen und ggf. zu lokalisieren.

Die Vorteile eines solchen Fehlerdiagnose-Systems mit integrierter Sensorik liegen in:

- der Erhöhung der Flugsicherheit,
- der Verlängerung von Wartungsintervallen (Übergang von der turnusmäßigen zur zustandsabhängigen Wartung/Instandhaltung) und
- der Einsparung von Material und Ausfallkosten.

Zu einem späteren Zeitpunkt soll dieses System auf andere Strukturen wie Windkraftanlagen, Fahrradrahmen etc. erweitert werden.

## Funktionsweise

Das entwickelte Überwachungssystem basiert auf der Grundlage von Macro-Fiber-Composites (MFC) mit Sensor- und Aktor-Funktionalität [1], die oberflächlich auf die Propellerholmstruktur geklebt oder in die Struktur einlaminiert werden. Nach Anregung der Struktur mittels eines MFCs und durch die Erfassung der MFC-Antwortsignale und deren Frequenzanalysen sind Frequenzgangänderungen und Phasenverschiebungen aber auch Änderungen in der Signallaufzeit frühzeitig erkennbar. Numerische Sollkurvenabgleiche geben Auskunft über den aktuellen Zustand der überwachten Struktur. Somit können Schädigungen, wie Rissbildungen, Bruchvorgänge und Delaminationen bereits in einem frühen Entstehungsstadium erkannt und ein Versagen der Struktur verhindert werden.

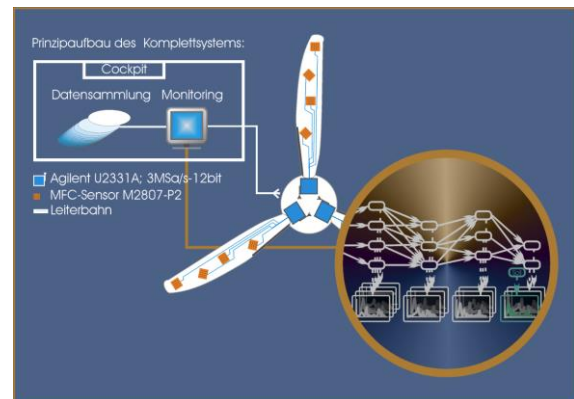


Abbildung 1: Schematischer Prinzipaufbau des Condition-Monitoring-Systems „PropCMS“

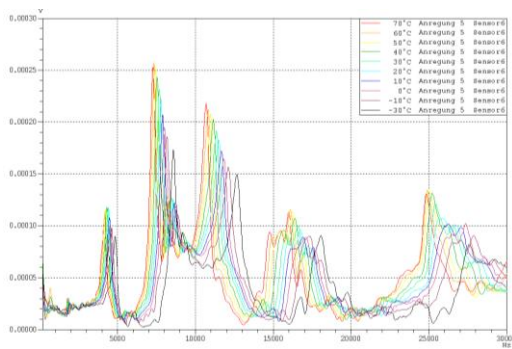
## Schadensermittlung

Der Zustand der Struktur wird durch einen numerischen Vergleich zwischen den ursprünglichen Daten und den Daten nach einer Schadeinwirkung bestimmt. Die ursprünglichen Daten charakterisieren die unbeschädigte Struktur und werden erstmals unmittelbar nach der Herstellung der Propellerblätter (Fingerabdruck) gemessen und dienen als Referenz. Eine Beeinträchtigung der Struktur kann mittels Signal-Laufzeit-Unterschieden im Zeitbereich sowie Frequenz- und / oder Phasenverschiebungen im Frequenzbereich nachgewiesen werden.

Am Beispiel des Propellerblattes wurde die Struktur mit einer Stoßbelastung stark beansprucht. Im Falle eines lokalen strukturellen Schadens, reduziert sich die Steifigkeit des Verbundbauteils und einhergehend kommt es zum Absinken der Resonanzfrequenzen. Als Ergebnis dieser Belastung konnten im Inneren der Struktur mittels optischer Analysemethoden Delaminationen ermittelt werden.

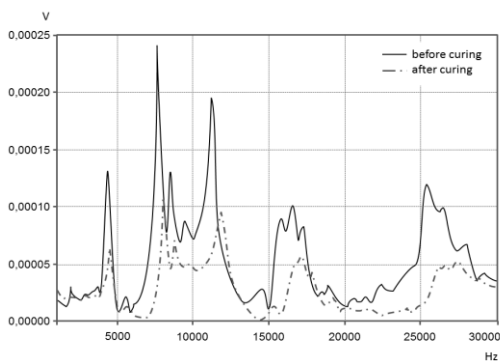
## Temperatureinfluss

Neben lokalen Strukturschäden beeinflussen auch Temperaturänderungen die Materialeigenschaften von Verbundwerkstoffen. Unterhalb der Glasübergangstemperatur  $T_g$  hat die Temperaturänderung einen direkten Einfluss auf die Materialsteifigkeit. In der Abbildung 2 ist der Erwärmungsprozess einer CFK-Platte dargestellt, die von  $-30\text{ °C}$  langsam auf  $+70\text{ °C}$  erhitzt wurde, wobei eine Zustandsmessung aller  $10\text{ °C}$  erfolgte. Als Ergebnis der Temperaturänderung konnten zum einen quasi lineare Resonanzverschiebungen zu niedrigeren Frequenzen hin und zum anderen lineare Amplitudenerhöhungen verzeichnet werden. Nach Abkühlung der Platte kam es zu einem erneuten Anstieg der Resonanzfrequenzen.



**Abbildung 2:** Resonanzvergleich bei unterschiedlichen Temperaturen

Wenn CFK-Strukturen Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur  $T_g$  ausgesetzt werden, beginnen diese auszuhärten, wobei eine dauerhafte Resonanzhöhung verbleibt. Abbildung 3 zeigt einen Vergleich von zwei Verbundwerkstoffen bei Raumtemperatur ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ ). Die durchgezogene Kurve wurde vor dem Härten gemessen, die gestrichelte nach der Härtung. Aufgrund der Aushärtung sind die Resonanzfrequenzen erhöht und die Amplituden deutlich gesunken.

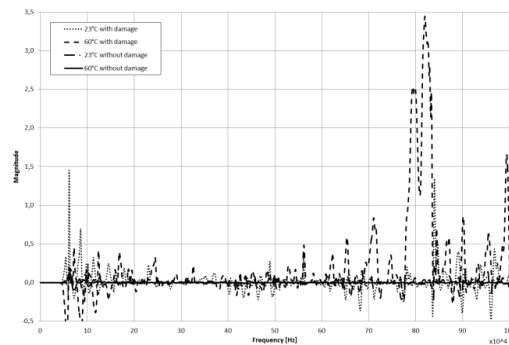


**Abbildung 3:** Einfluss der Materialhärtung auf das Frequenzspektrum

Dieses Materialverhalten hat einen starken Einfluss auf die Messergebnisse. Um eine zuverlässige Fehlerdetektion gewährleisten zu können, muss der Temperatureinfluss aus den Messdaten eliminiert werden.

### Algorithmus zur Schadenserkenkung

In einem Vorverarbeitungsschritt werden störende Frequenzbereiche herausgefiltert um das Signal-/Rauschverhältnis zu optimieren. Um den Zustand der Struktur zu bestimmen, werden die Spektren der verschiedenen Aktuator-Sensor-Kombinationen gemittelt. Das erhaltene gemittelte Spektrum wird dann mit den ursprünglichen Daten (Fingerabdruck) korreliert. Dieser Vergleich sorgt für eine genauere und zuverlässigere Schadenserkenkung, als der Vergleich der einzelnen Frequenzgänge (wie im Abschnitt Schadensermittlung beschrieben). Fingerabdrücke für verschiedene Temperaturen ermöglichen eine temperaturunabhängige Schadenserkenkung. In der Abbildung 4 ist eine Fehlerdetektion bei verschiedenen Temperaturen ( $23\text{ }^\circ\text{C}$  und  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ) unter Verwendung des beschriebenen Algorithmus grafisch dargestellt. Die gestrichelten Kurven stellen Messungen der beschädigten Struktur dar und die fortlaufende Linie beschreibt den Originalzustand.



**Abbildung 4:** Vergleich zwischen mehreren Messergebnissen bei verschiedenen Temperaturzuständen mit (gestrichelt) und ohne (durchgezogen) Strukturschaden [Quelle: HAW Landshut]

In den höheren Frequenzbereichen sind die Unterschiede zwischen gestörter und intakter Struktur von besonderer Bedeutung. Leider ist dieser Ansatz für die Fehlerdetektion in der Praxis nicht realisierbar, da es den Original-Fingerabdruck für jede Struktur bei unterschiedlichen Temperaturen erfordert. Die Untersuchungen zu einem temperaturunabhängigen Algorithmus haben bisher noch zu keinem positiven Ergebnis geführt.

### Ergebnis

Das Forschungsprojekt „PropCMS“ zeigt, dass eine frühzeitige Fehlerdiagnose über die integrierte MFC-Sensorik im Prinzip möglich ist. Das entwickelte System ist in der Lage mit spezifischer Aktor-/Sensorfunktionalität den Schadenseintrag in einer Verbundstruktur zu erkennen und bei entsprechender Sensorpositionierung zu lokalisieren. Zur Fehlerdiagnose bei unterschiedlichen Temperaturzuständen sind die ursprünglichen Strukturdaten (Referenzwerte) zu jedem entsprechenden Temperaturzustand notwendig. Da diese Vorgehensweise praxisuntauglich ist, besteht das Ziel in einem späteren Forschungsprojekt einen temperaturunabhängigen Algorithmus zu entwickeln.

### Zusatz

Das Forschungsprojekt wurde von der Europäischen Union im Rahmen des EFRE-Regionalfonds („Europäischer Fond für regionale Entwicklung, Fördernr. BAY 137/002) gefördert.



Europäische Union  
„Investition in Ihre Zukunft“  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

### Literatur

- [1] Smart Material, Homepage, URL: <http://www.smart-material.com>
- [2] Rümmler, N.; Schlott, F.; Schnitzer, R.: Condition Monitoring System für Flugzeugpropeller – PropCMS, 2. Landshuter Symposium Mikrosystemtechnik, Landshut 24. und 25. Februar 2010, Tagungsband S. 353-362,