

# Komplementäre Methoden der Strukturüberwachung und Möglichkeiten zu ihrer Vernetzung

Holger Hanselka<sup>1</sup>, Dirk Mayer<sup>2</sup>

Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit, Darmstadt,

<sup>1</sup>holger.hanselka@lbf.fraunhofer.de

<sup>2</sup>dirk.mayer@lbf.fraunhofer.de

## Einleitung

Die Überwachung von technischen Strukturen auf Ermüdung und Schäden ist Voraussetzung für eine zustandsbasierte Wartung von sicherheitskritischen Systemen wie Flugzeugen, oder von schlecht zugänglichen Strukturen wie Off-Shore-Windenergieanlagen oder großen Brückenbauwerken. Zusätzlich werden so die Ausnutzung von konstruktiven Reserven und somit neue Leichtbaukonzepte ermöglicht [1]. Im Bereich der Strukturüberwachung (engl. Structural Health Monitoring, SHM) werden verschiedene Methoden entwickelt, die jeweils Aussagen über den Strukturzustand auf Basis der Auswertung von Sensorsignalen ermöglichen sollen, und die auf unterschiedlichen Sensorsystemen, Messverfahren und Auswertalgorithmen beruhen. Im Folgenden sollen drei Verfahren vorgestellt und diskutiert werden, inwiefern durch die Kombination der einzelnen Methoden zu einem übergreifenden SHM-System ein genaueres Urteil über den Zustand der Struktur ermöglicht und die Zuverlässigkeit des Systems erhöht werden kann. Dies ist entscheidend für die Anwendbarkeit des SHM-Systems, da bei einer fehlerhaften Diagnose entweder unnötige und mitunter kostenintensive Maßnahmen ergriffen werden, oder Schäden unentdeckt bleiben, die zu Totalausfällen führen können.

## Analyse der Betriebslasten

Eine Auslegung nach den Regeln der Betriebsfestigkeit ist Voraussetzung für effizienten Leichtbau. Grundlage hierfür ist die Kenntnis über das Nutzungsprofil in Form von Lastkollektiven an besonders beanspruchten Stellen [2]. Eine Überwachung ist daher vor allem bei wechselnden Nutzungsprofilen mit sich ändernden Belastungskollektiven sinnvoll, beispielsweise bei Schiffen, deren Einsatzgebiet öfter wechselt [3]. Hierzu werden kritische Stellen der Struktur mit Dehnungssensoren versehen. Während des Betriebs werden aus den Signalen Schwingspiele extrahiert und in einer Rainflowmatrix gespeichert. Grundsätzliche Annahme ist dabei, dass jedes einzelne Schwingspiel einer Amplitude  $S$  zu einer Schädigung  $\Delta D$  des Bauteils führt. Diese wird als Bruchteil der Anzahl  $N$  an Schwingspielen angegeben, die das Bauteil in einem Wöhlerversuch erträgt:

$$\Delta D_i = 1/N_i(S_i) \quad (1)$$

Aus der Anzahl der im Betrieb auftretenden Schwingspiele verschiedener Amplituden kann dann eine Schadenssumme

$$D = \sum \Delta D_i \quad (2)$$

berechnet werden. Erreicht  $D$  den Wert eins, ist ein Versagen des Bauteils zu erwarten. Diese Abschätzung des Ermüdungszustands durch zyklische Belastung eignet sich daher nicht zur Analyse von Schäden, welche durch unvorhergesehene Ereignisse hervorgerufen werden.

## Analyse des strukturdynamischen Verhaltens

Die dynamischen Eigenschaften einer Struktur hängen maßgeblich von der Verteilung von Steifigkeiten und Massen ab. Da durch Schäden eine lokale Verringerung der Steifigkeit erwartet wird, liegt es nahe, durch eine Analyse des Schwingungsverhaltens der Struktur auf diese zurückzuschließen. Zur Detektion werden diverse Methoden vorgeschlagen [4], unter anderem Verschiebungen von Resonanzfrequenzen (Abbildung 1) oder Krümmungen von Eigenformen. Diese Verfahren besitzen den Vorteil, eine relativ große Struktur mit Hilfe weniger Sensoren, die ihre globalen Schwingungen erfassen, überwachen zu können.

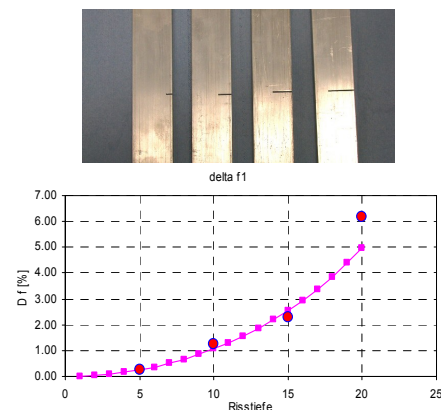
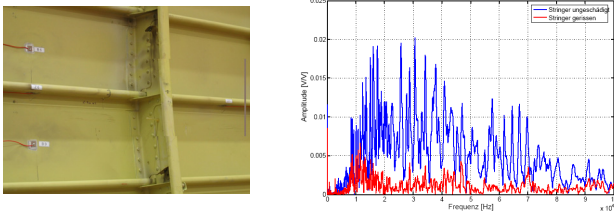


Abbildung 1: Änderung der ersten Biegeresonanz eines einseitig eingespannten Balkens in Abhängigkeit eines Schadens, ■ Numerische Berechnung, ● Messung [5]

## Analyse von Ultraschallwellen

Andere Methoden zur Detektion von Schäden bedienen sich Ultraschallwellen, die sich in der Struktur ausbreiten [6]. Diese Verfahren lehnen sich an die zerstörungsfreie Prüfung an. Ausgenutzt wird, dass die Wellenausbreitung mit Schäden wechselwirkt, z.B. durch Reflexion an Rissen. Zur Anregung der Wellen dienen meist applizierte piezokeramische Elemente. In komplexer geformten Bauteilen sind geführte Wellen nicht einfach anzuregen, was eine einfache Laufzeitmessung verhindert. Daher kommen in solchen Fällen auch breitbandige Anregungen zum Einsatz (Abbildung 2). Die Auswertung der Signale erfolgt dann über Vergleich des Übertragungsverhaltens im ungeschädigten und geschädigten Zustand (Abbildung 2)



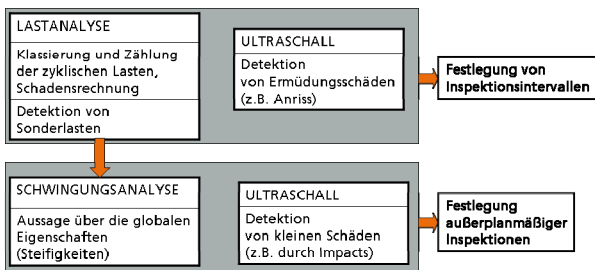
**Abbildung 2:** Schadensdetektion am Stringer eines Flugzeugrumpfs (links) durch Vergleich des Übertragungsverhaltens im geschädigten und ungeschädigten Zustand des Bauteils (rechts)

und die Berechnung statistischer Schadensmaße daraus [6]. Da Ultraschallwellen insbesondere in Faserverbundbauteilen relativ stark gedämpft werden, eignet sich dieses Verfahren vor allem für die lokale Überwachung besonders belasteter oder gefährdeter Stellen. Aufgrund der kurzen Wellenlängen werden jedoch auch kleine Schäden detektiert.

### Vorteile einer Kombination der Verfahren

Die drei Verfahren besitzen unterschiedliche Ansätze der Schadensdetektion und sind letztlich für unterschiedliche Arten von Schäden geeignet. Das Zusammenwirken in einem Gesamtsystem (Abbildung 3) kann auf verschiedene Weise vorteilhaft sein:

Die Ermittlung der Schadenssumme durch Zählung und Auswertung von Schwingspielen ist eine mit Unsicherheiten behaftete Größe. Eine gleichzeitige Suche nach ersten Schäden an den betreffenden Stellen durch Ultraschallverfahren kann hier zu größerer Sicherheit verhelfen. Beide Analysen zusammen könnten dann als Eingangsgröße für eine zustandsbasierte Wartung dienen.



**Abbildung 3:** Konzept für ein Zusammenwirken der einzelnen Überwachungsmethoden

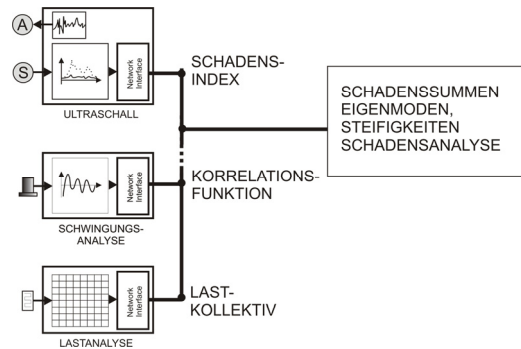
Diese Überwachung der zyklischen Strukturermüdung kann durch eine Detektion von Schäden, die durch Sonderereignisse hervorgerufen werden, sinnvoll ergänzt werden. Wird z.B. eine ungewöhnlich große mechanische Last detektiert, die sofort zu einem Schaden führt, kann durch die Schwingungsanalyse auf größere und Ultraschallverfahren auf kleinere Schäden geschlossen werden, und eine außerplanmäßige Inspektion vorgesehen werden.

Durch die Implementierung durch ein Netzwerk intelligenter Sensoren lassen sich diese Methoden in ein Gesamtsystem integrieren (Abbildung 4). Um dabei die aufwändige Übertragung von Zeitsignalen der Schwingungen zu vermeiden, sollten die Knoten des Netzes bereits eine Signalanalyse vornehmen. Herausforderung dabei ist, die notwendigen Berechnungen im Netzwerk zu verteilen und auf den kompakten aber mit wenig Rechenleistung ausgestatteten Sensorknoten zu implementieren. Ansätze

hierzu sind zum Beispiel die Verwendung von Zufallsdekrementen zur Schätzung der Korrelation von Schwingungssignalen [7] oder die bereits erwähnten statistischen Schadensmaße für die Analyse der Ultraschallsignale.

### Zusammenfassung und Ausblick

Verschiedene Methoden der Strukturüberwachung sind für unterschiedliche Teilaufgaben geeignet. Sie lassen sich allerdings sinnvoll in ein Gesamtsystem integrieren, um so genauere Aussagen über den Strukturzustand zu generieren.



**Abbildung 4:** Sensornetzwerk zur Realisierung eines Gesamtsystems zur Strukturüberwachung

### Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des LOEWE-Zentrums AdRIA, für dessen Förderung durch das Land Hessen sich die Autoren bedanken möchten.

### Literatur

- [1] Farrar, C. R.; Worden, K.: An introduction to structural health monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 365 (2007), 303–315
- [2] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit, 3. Auflage, Springer, 2006
- [3] Slaughter, S.; et al. State of the Art in Hull Response Monitoring Systems, Report SSC 401, Ship Structure Committee, Washington D.C., 1997
- [4] Farrar, C. R.; Doebling, S. W.: An Overview of Modal-Based Damage Identification Methods, DAMAS 97, 1997
- [5] Mayer, D., Herold, S., Atzrodt, H.: Structural Health Monitoring of Smart Structures Using Pattern Recognition and Adaptive Digital Filters, Proc. 2<sup>nd</sup> European Workshop on SHM, München, 2004
- [6] Käsgen, J., Mayer, D.: Vibration Based Damage Diagnosis of an Aircraft Structure Using Piezoelectric Transducers, Applied Mechanics and Materials, vol. 7-8 (2007) S. 295-300
- [7] Friedmann, A., Mayer, D., Kauba, M.: An approach for decentralized mode estimation based on the Random Decrement method, Shock and Vibration, vol. 17, Jan. 2010, S. 579-588