

Schadensindizes als Parameter zur optimierten Identifikation von Sensorpositionen für die Prüfung mit geführten Wellen am Beispiel einer genieteten Reparatur

Sascha Dirk POWER¹, Ramanan SRIDARAN VENKAT¹, Christian BOLLER¹
¹ Universität des Saarlandes - LZfPQ, Saarbrücken

Kontakt E-Mail: c.boller@mx.uni-saarland.de

Kurzfassung. Geführte akustische Wellen sind die Basis einer weit verbreiteten Methode zur Detektion von Schäden in flächigen Bauteilen, insbesondere im Zusammenhang mit dem Structural Health Monitoring (SHM). Für den Fall einer schadenstolerant ausgelegten Struktur, (z.B. im Bereich der Luftfahrt üblich), sind Ort und tolerierbare Schadensgröße bekannt, nicht jedoch, wann diese Schadensgröße erreicht wird. Dieser Zeitpunkt kann aber mit einem SHM-System automatisiert ermittelt werden, wenn die erforderliche Information zielgerichtet erfasst wird. Um dies zu tun, bietet es sich an, das Verhalten der geführten Wellen, für einen bestimmten Zeitraum einerseits für den ungeschädigten und andererseits für den tolerierbar geschädigten Zustand zu betrachten. Bildet man die Differenz dieser beiden Bilder, so ist die erhaltene Information allein durch den Schaden selbst verursacht. Integriert man diese Differenzsignale für jeden Punkt des betrachteten Bauteils über der gemessenen Zeit auf, so erhält man eine ‚Topografie‘ aller Orte, an denen Schadensinformation zur Detektion des tolerierbaren Schadens ‚eingesammelt‘ werden kann. Da man Sensoren zur Detektion dieser Information üblicherweise nur an diskreten Orten platzieren kann, können diese Orte anhand der Topografie ermittelt werden. Ein probates Mittel zur Ermittlung dieser Topografien - und damit auch optimaler Sensororte - ist die numerische Simulation. Neben der Verwendung des Differenzsignals als Schadensindex gibt es noch weitere Schadensindizes, z.B. auf der Basis verschiedener Formen von Fehlerquadraten oder Korrelationskoeffizienten. In dem Beitrag wird am Beispiel einer genieteten Reparatur gezeigt, wie die zuvor genannten Topografien unterschiedlicher Schadensindizes numerisch erstellt und daraus mögliche Sensormuster abgeleitet werden können, die dann auf der Basis experimenteller Ergebnisse validiert und abschließend diskutiert werden.

1. Motivation

Zustandsüberwachung, im Englischen auch als ‚Structural Health Monitoring‘ (SHM) bezeichnet, ist eine Form, wie u.a. zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) in Bauteile und Strukturen so eingebracht werden kann, dass ZfP zum integralen Bestandteil dieser Bauteile und Strukturen wird und damit eine Zustandsbestimmung automatisiert erfolgen kann. Sinn macht eine solche Vorgehensweise dann, wenn das Bauteil bzw. die Struktur schadenstolerant ausgelegt ist. In diesem Fall sind Ort und Größe des Schadens bekannt. Die alleinige Unbekannte ist in



diesem Fall der Zeitpunkt, zu dem der stochastisch auftretende, tolerierbare Schaden auftritt. Diesen Schaden zu bestimmen, geht allein über Inspektion. Eine solche Inspektion kann aufwändig werden, weshalb eine Automatisierung des Inspektionsprozesses mit Hilfe von SHM von Interesse sein kann.

In der Luftfahrt ist die schadenstolerante Bauweise seit Jahrzehnten etabliert und ist eine der entscheidenden Säulen des Leichtbaus. Zwischenzeitlich hat aber auch das Bauingenieurwesen die Bedeutung der schadenstoleranten Auslegung von Bauteilen und Strukturen erkannt, dies allerdings weniger unter dem Blickwinkel des Leichtbaus, sondern mehr aus dem Blickwinkel der Lebensdauererlängerung alternder Infrastruktur.

In der Luftfahrt, wo die schadenstolerante Auslegung etabliert ist, sind auch die hochkomplexen Wartungs- und Inspektionsprozesse aufgrund von Auslegung und Erfahrung hochgradig optimiert. In einer ausgiebigen Studie [1] wurde gezeigt, dass bei Betrachtung eines für einen Airbus A320 ursprünglich ausgelegten Wartungs- und Inspektionskonzepts sich mit der Einführung von SHM keine nennenswerten Einsparpotenziale erzielen lassen, wenn nicht in der Wartungs- und Inspektionsphilosophie ein regelrechter Paradigmenwechsel vorgenommen wird, was eher unwahrscheinlich ist. Dieses Ergebnis ändert sich jedoch entscheidend, wenn Schäden durch Unfall oder Alterung in einem Flugzeug auftreten, die in dem ursprünglichen Wartungs- und Inspektionskonzept – und damit auch in der Auslegung – nicht berücksichtigt werden konnten. In diesem Fall kann das ursprüngliche Wartungs- und Inspektionskonzept erheblich gestört und im Nachgang kaum modifiziert werden, womit SHM plötzlich einen deutlichen Mehrwert erzielen kann.

In dem hier betrachteten Beispiel wird eine an einer flächigen, metallischen Rumpfstruktur durch einen Doppler aufgenietete Reparatur betrachtet und wie ein darin auftretender tolerierbarer Schaden bestmöglich mit SHM detektiert werden kann. Innerhalb des breiten Feldes mit Bezug auf SHM, das u.a. in [2] dargestellt wird, wird für die Inspektion die Technik der geführten akustischen Wellen gewählt. Diese Technik eignet sich besonders bei prismatischen (hier flächigen) Strukturen und erfreut sich im Bereich des SHM einer großen Beliebtheit. Dies ist auch dadurch bedingt, dass sich praktisch piezoelektrische Wandler relativ einfach auf Bauteilstrukturen aufbringen lassen und es dafür teilweise auch schon kommerzielle Lösungen gibt. Ein offener Punkt ist hier jedoch, wo welche piezoelektrischen Wandler zu platzieren sind, damit der tolerierbare Schaden möglichst zuverlässig erkannt wird. Hierzu wird in diesem Beitrag Stellung bezogen.

2. Betrachtetes Bauteil

Abb. 1 zeigt das nachstehend betrachtete Bauteil. Es handelt sich um ein 1 mm dickes 500 x 500 mm großes Aluminiumblech mit einem Loch, auf das ein zweites 1 mm dickes 91 x 91 mm großes Blech mit 32 Nieten entsprechend dem in Abb. 1 dargestellten Lochbild aufgenietet ist. Für eines der Nietlöcher wird ein Riss als Schaden angenommen. Der Aktuator zur Generierung der geführten Wellen wird unterhalb des Dopplers, wie in Abb. 1 dargestellt, angenommen. Die Orte für die Sensoren wurden erst einmal zufallsartig ausgewählt und sind ebenfalls in Abb. 1 dargestellt.

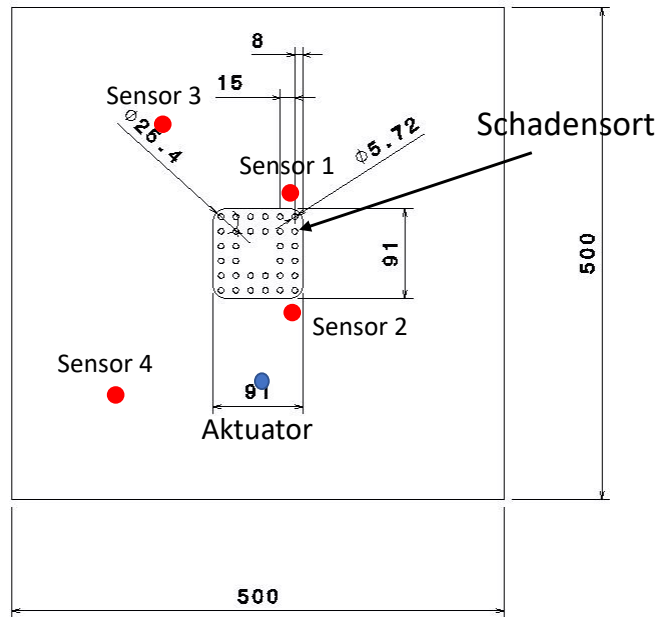


Abb. 1. Aluminiumblech mit aufgenietetem Doppler sowie den Orten der piezoelektrischen Wandler (1 Aktuator und 4 Sensoren)

3. Numerische Simulation

Die numerische Simulation erfolgte auf der Basis von COMSOL Multiphysics. Für die Aluminiumplatten betrug die Größe der finiten Elemente 2 mm und für die Niete und piezoelektrischen Wandler 0,01 mm. Abb. 2 zeigt exemplarisch das Ausbreitungsverhalten der geführten Wellen zu einem definierten Zeitpunkt für den ungeschädigten und den geschädigten Zustand. Die Ähnlichkeit der Bilder lässt daher schwer den Unterschied erkennen. Numerisch lässt sich dieser Unterschied jedoch einfach über die Differenz der Werte für die beiden Zustände ermitteln. Ein Beispiel für eine solche Momentaufnahme ist in Abb. 3 links dargestellt. Solche Differenzbilder können für jeden Zeitschritt generiert werden. Da diese Differenzbilder nichts anderes als die durch den Schaden verursachte Information darstellen, bietet es sich an, diese Information über einen definierten Zeitrahmen zu integrieren, wie dies in Abb. 3 rechts schematisch angedeutet ist. Diese Integration führt zu einer Topografie, wie sie in Abb. 4 links dargestellt ist. Die vertikale Achse zeigt damit das Zeitintervall, über das integriert wurde. Darin kann nun abgelesen werden, an welchem Ort des betrachteten Bauteils wieviel Schadensinformation abgegriffen werden kann. Die beiden rechten Bilder in Abb. 4 zeigen einen ‚tomografischen‘ Schnitt durch die Topografie für einen bestimmten Zeitpunkt, dargestellt in einem binären Muster für den Fall eines 15 mm und eines 30 mm langen angenommenen künstlichen Risses. Daraus ist zu erkennen, bei welchen Sensoren mehr und bei welchen weniger Schadensinformation zu erwarten ist. Mit Hilfe der numerischen Simulation lässt sich somit – hier für den Fall einer vorgegebenen Aktuatorposition – bestimmen, wo Sensoren zur Detektion eines tolerierbaren Schadens am besten zu platzieren sind.

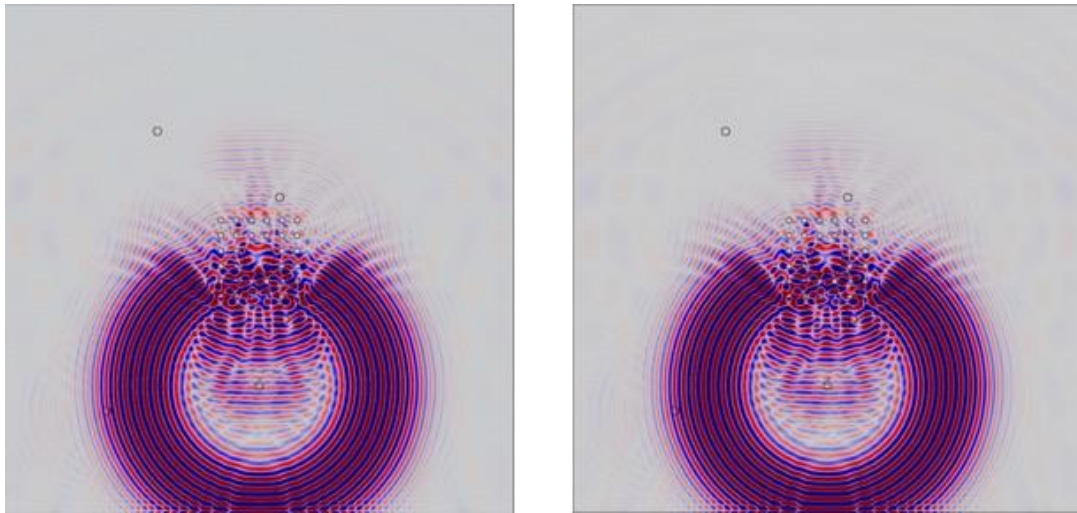


Abb. 2. Vergleich der Wellenausbreitung für den ungeschädigten (links) und den geschädigten (rechts) Zustand des betrachteten Probekörpers zu einem identischen Zeitpunkt.

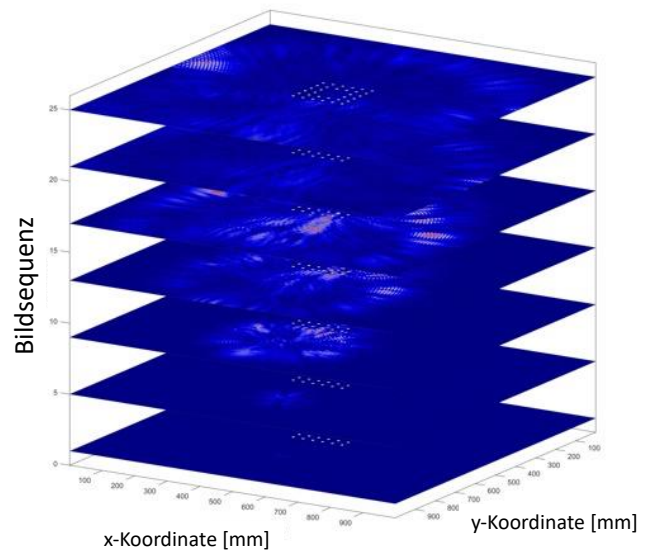
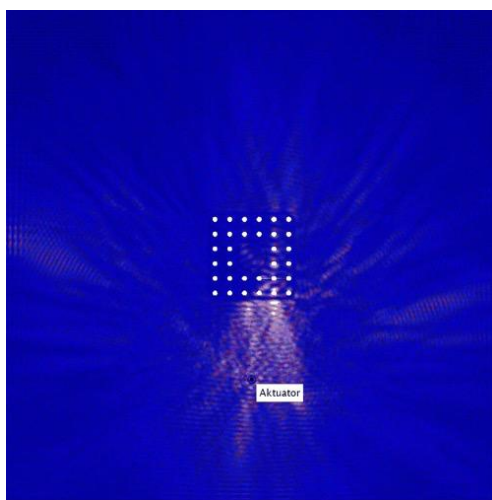


Abb. 3. Differenzbild des Wellenformation zwischen ungeschädigtem und geschädigtem Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt (links) und Differenzbilder zu verschiedenen Zeitpunkten (rechts)

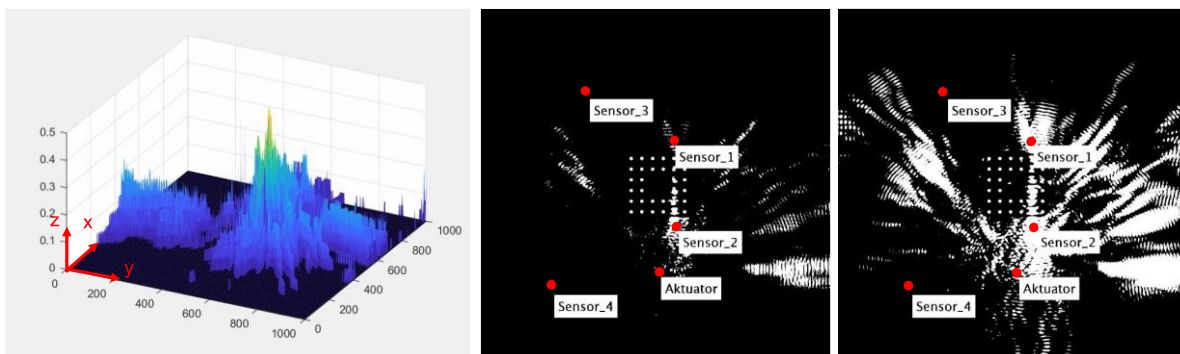


Abb. 4. Topografiebild der integrierten Differenzsignale (links), und Schnitt durch das Topografiebild für den Fall eines Schadens von 15 mm (mittig) und 30 mm (rechts)

4. Schadensindizes

Eine Möglichkeit zur Bestimmung des Schadensinformation besteht in der alleinigen Auftragung der Differenz der Wellenamplituden, wie zuvor beispielhaft dargestellt. Eine weiterführende Option besteht jedoch in der Betrachtung von sog. Schadensindizes, wie sie vielfach in der Literatur vorgeschlagen werden. Dabei gilt in allen Fällen, dass für jeden Punkt des betrachteten Bauteils das Zeitsignal des ungeschädigten Zustands $S_0(t)$ dem Zeitsignal des geschädigten Zustands $S_d(t)$ in einer bestimmten Form gegenübergestellt wird. Einige solcher Schadensindizes sollen hier untersucht werden und sind nachstehend kurz aufgeführt.

4.1 Differenzierte Signalenergie

Bei diesem Index wird das Signal zuerst auf die Quadratwurzel der Summe der Quadrate entsprechend der folgenden Funktionen bezogen:

$$\tilde{S}_0(t) = \frac{S_0(t)}{\sqrt{\int_{t_0}^{t_N} S_0^2(t) dt}} \quad (1a) \quad \tilde{S}_d(t) = \frac{S_d(t)}{\sqrt{\int_{t_0}^{t_N} S_d^2(t) dt}} \quad (1b)$$

Hierin sind die Integrationsgrenzen t_0 und t_N die Grenzen des Zeitintervalls, über das die Betrachtungen gemacht werden. Um dann den Schadensindex DI_{DSE} über die verschiedenen Zeitschritte n , die einer jeweiligen Zeit t_n zugeordnet werden, zu ermitteln, wird die nachstehende Beziehung herangezogen:

$$DI_{DSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N [\tilde{S}_d(t_n) - \tilde{S}_0(t_n)]^2}{\sum_{n=1}^N \tilde{S}_0^2(t_n)}} \quad (2)$$

4.2 Root Mean Square Deviation (RMSD)

Der quadratische Mittelwert der Differenzsignale berechnet sich für die einzelnen Zeitschritte n wie folgt:

$$DI_{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} [S_d(t_n) - S_0(t_n)]^2}{\sum_{n=0}^N S_0^2(t_n)}} \quad (3)$$

4.3 Korrelationskoeffizient

Ein sehr gängiger Index ist die Verwendung eines Korrelationsindex, der sich im vorliegenden Fall entsprechend folgender Beziehung berechnet:

$$DI_{CC} = 1 - \frac{\left[\int_{t_0}^{t_N} S_0(t) S_d(t) dt \right]^2}{\int_{t_0}^{t_N} S_0^2(t) \int_{t_0}^{t_N} S_d^2(t)} \quad (4)$$

5. Experimentelle Validierung

Die in Abb. 1 dargestellte genietete Reparatur wurde experimentell validiert. Dazu wurde die Probe mit piezoelektrischen Wandlern vom Typ 5A der Firma Ferroperm Piezoceramics bestückt, die einen Durchmesser von 8 mm und eine Dicke von 0,21 mm haben. Die Wandler wurden an den in Abb. 1 angezeigten Stellen einseitig auf die Reparatur angebracht und mit einem Kleber Uhu Schnellfest befestigt. Eingangssignal war ein in einem Hanning-Fenster eingegebenes Signal von 5 Zyklen bei einer Frequenz von 100 kHz. Die gemessenen Signale wurden mit einem digitalen Oszilloskop vom Typ PicoScope® 3000 Series erfasst, digitalisiert und über einen Hochvolt-Verstärker Ciprian© HVA-400 A verstärkt. Abb. 5 zeigt den entsprechenden Versuchsaufbau.



Abb. 5. Versuchsaufbau zur Validierung der geführten Wellen

Wie bereits in Abb. 4 aus den Ergebnissen der numerischen Simulation zu erkennen, ist bei den Sensoren 1 und 2 mehr Schadensinformation zu erwarten als bei den Sensoren 3 und 4. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Zeitsignale zwischen Simulation und Experiment für die beiden Schadensfälle des 15 und 30 mm langen Risses zu vergleichen, wie dies in Abb. 6 dargestellt ist. Aus den Zeitsignalen ist bereits zu erkennen, dass bei den Sensoren 1 und 2 bereits im frühen Stadium des Signals Differenzen hinsichtlich des Schadens zu erkennen sind, während dies nur in einem geringen Maß in einem späteren Stadium des Signals bei den Sensoren 3 und 4 zu beobachten ist. Generell scheint das numerische Modell die Phase der Signale gut zu beschreiben, so dass weitergehende Betrachtungen auf der Basis der numerischen Signale sinnvoll erscheinen.

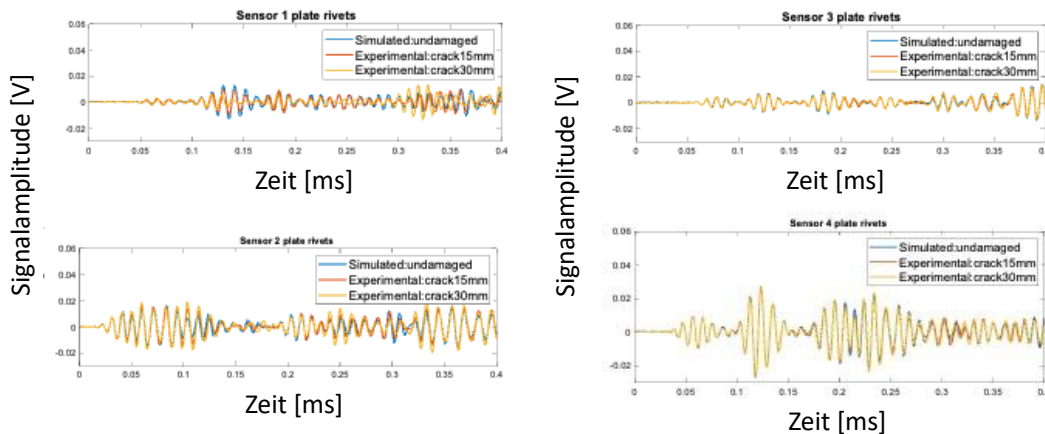


Abb. 6. Vergleich der Sensorsignale zwischen numerisch simuliertem Ergebnis für den ungeschädigten Zustand und experimentell gemessenen Ergebnissen für den mit einem künstlichen Riss von 15 bzw. 30 mm versehenen genieteten Platten für die Sensoren 1 und 2 (links) und Sensoren 3 und 4 (rechts).

5. Auswertung der Signale auf Basis der Schadensindizes

Die in Abb. 4 beispielhaft dargestellte Topografie kann prinzipiell für jede Art von Schadensindex durchgeführt werden. Dies ist für die drei zuvor genannten Schadensindizes geschehen, ergänzt um das Signal der reinen Amplitudenantwort. In Abb. 7 ist ein diesbezügliches, für die vier in Abb. 1 eingezeichneten Sensoren erhaltenes Ergebnis zusammengefasst. Dabei wurden die Ergebnisse eines jeweiligen Index auf ihren Maximalwert normiert. Dabei fällt auf, dass für alle Indizes, die meiste Schadensinformation am Ort des Sensors 2 erfasst wird. Für die übrigen Orte fällt das Ergebnis hingegen recht differenziert aus. Die Gründe für dieses unterschiedliche Verhalten bedürfen noch weitergehender Untersuchungen und lassen derzeit nur den Schluss zu, dass die Beurteilung von Schädigungsereignissen auf der Basis von Schadensindizes noch mit einiger Vorsicht zu behandeln ist.

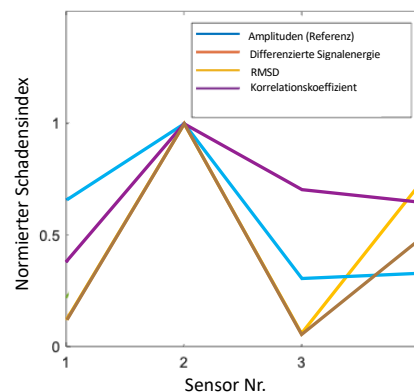


Abb. 7. Von Sensoren erfasste Schadensinformation unter Verwendung verschiedener Schadensindizes, normiert auf den Maximalwert für den Fall eines 30 mm langen Risses in der genieteten Reparatur,

6. Schlussfolgerungen

Das Bestimmen geeigneter Sensororte zur Detektion eines tolerierbaren Schadens in einer beliebig geformten, beliebig belasteten und somit komplexen Bauteilstruktur unter Verwendung geführter akustischer Wellen, ist eine herausfordernde Aufgabe. Um diese Aufgabe zu lösen ist es sinnvoll, sich der numerischen Simulation im Vorfeld zu bedienen. Hierzu muss die Wellenausbreitung einerseits für den Fall des ungeschädigten Bauteils und andererseits für den Fall des geschädigten Bauteils simuliert und die Differenz zwischen beiden Zuständen gebildet werden. Diese Differenzen gilt es dann aufzuintegrieren, um damit eine Topografie der Schadensinformation zu erhalten. Diese Topografie bildet dann die Grundlage für die Bestimmung der Sensororte. Dabei wählt man als Sensorort zuerst den Ort auf der Topologie, bei dem der Wert der akkumulierten Schadensinformation am höchsten ist. Kann man sich mehr als einen Sensorort leisten, so wird als nächster Sensorort der Ort des nächsthöheren Werts in der Topologie gewählt. Dieses Procedere kann so lange fortgesetzt werden, bis die maximale Zahl an zulässigen Sensoren erreicht ist. Damit wird prinzipiell die Zuverlässigkeit der Detektion des tolerierbaren Schadens kontinuierlich verbessert.

Mit dem hier vorgestellten Prinzip wird eine Verfahrensweise vorgestellt, mit der auf der Basis geführter akustischer Wellen arbeitende SHM-Systeme für quasi beliebig geartete und beanspruchte Bauteile konfiguriert werden kann. Dabei wird die Bedeutung der numerischen Simulation für einen solchen Prozess klar unterstrichen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang aber auch die experimentelle Validierung. In einem ersten Ansatz wird hier gezeigt,

dass man wohl auf einem vielversprechenden Weg ist. Allerdings fehlen noch Angaben zur Zuverlässigkeit der gemachten Schadensaussage, insbesondere wenn man die zuvor beschriebene Strategie zur Auswahl der Sensororte anwendet. Auch bleibt die Frage offen, ob die vielfach in der Literatur beschriebenen Schadensindizes zu einer Verbesserung der Schadensdetektion führen. In diesem Fall muss dann auch der Logik dieser Schadensindizes nachgegangen werden, um eindeutig zu verstehen, wie sich Schädigung anhand der gemessenen Signale abbildet.

Abschließend sei noch angemerkt, dass auch die numerische Modellierung kritisch zu hinterfragen ist. In diesem Zusammenhang bietet sich ein modellbasierter Ansatz an, bei dem das Ergebnis eines numerischen Modells entsprechend experimentell erhaltenen Ergebnissen angepasst werden kann. Dieses Wechselspiel zwischen Numerik und Experiment - oder besser Numerik und SHM-System - bekommt damit eine zentrale Bedeutung. In der Realität könnte dies bedeuten, dass das SHM-System das Signal für einen ungeschädigten Zustand als Referenz registriert und bei jeder neuen Messung die Differenz zu dem Referenzsignal ermittelt und diese Differenzen dann einerseits akkumuliert, andererseits aber auch zur Signalinterpretation in das numerische Modell zurückgespiegelt wird.

Referenzen

- [1] Boller, C., 2013: *Business potential of structural health monitoring in aeronautics*, in: Jennions, Ian K. (Ed.): *Integrated vehicle health management: Business case theory and practice*. Warrendale/Pa.: SAE International, pp. 81-97
- [2] Boller, C., Chang, F.-K., Fujino, Y. (Ed.), 2009: *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, Vol.s1-5: John Wiley & Sons, - ISBN 978-0-470-05822-0