

Referenzfehler – POD – Normung, zur industriellen Reife von SHM-Systemen basierend auf geführten Wellen

Inka MUELLER¹, Thomas VOGT²

¹ Ruhr-Universität Bochum, Bochum

² Guided Ultrasonics Ltd, Brentford, Großbritannien

Kontakt E-Mail: inka.mueller@rub.de

Kurzfassung. Um die Akzeptanz von SHM Methoden basierend auf geführten Wellen in der Industrie zu stärken, ist ein wichtiger Aspekt die normative Verankerung, für die das Merkblatt SHM01 des Fachausschusses Zustandsüberwachung aus 2015 einen ersten Schritt darstellt. Darüber hinaus zeigt sich, dass für die Normung eine in der Vorgehensweise einheitliche Maßnahme zur Bestimmung der Performanz dieser SHM-Systeme notwendig ist. Die Vielzahl der möglichen zu untersuchenden Werkstoffe und Fehlerarten ist hierbei jedoch angemessen zu berücksichtigen. Es erscheint angemessen, Referenzfehler zu definieren und zu charakterisieren, die insbesondere eine hohe Relevanz in der Anwendung haben. Hierzu wird eine Übersicht dargestellt, die mögliche Referenzfehler für verschiedene Anwendungen im Bereich Metallbau und Faserverbundstrukturen aufzeigt. Auf Basis dieser wird mittelfristig ein Vorgehen zur Bestimmung der Performanz angestrebt. Im Beitrag wird aufgezeigt, dass auch diesbezüglich die Vielzahl der Level, die mithilfe eines solchen SHM-Systems erreichbar sind, angemessen zu berücksichtigen ist. Für Anwendungen wie Hot-Spot-Monitoring lassen sich Verfahren der Performanzbestimmung, die bereits in der klassischen zerstörungsfreien Prüfung etabliert sind, anwenden. Bereits für die Überwachung einer Fläche ist von notwendigen Adaptionen aufgrund möglicher deutlich ausgeprägter Ortsabhängigkeit auszugehen. Es wird für Monitoringaufgaben zudem der starke Struktur- und Ortsbezug sowie der Einfluss von sich ändernden Betriebs- und Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen sein. Schlussendlich ist auch eine Abkehr von traditionellen Schadensbildern vorstellbar, da für viele SHM Systeme nicht hauptsächlich die Schadensgröße in Form von Risslängen, Korrosionsflächen o.ä., sondern der Effekt auf die lasttragende Struktur von höchstem Interesse ist. Der Vortrag gibt hierzu einen Überblick und zeigt das geplante weitere Vorgehen auf.

Einführung

Die Verwendung geführter Wellen für SHM ist in den letzten Jahren intensiv wissenschaftlich untersucht worden. Eine Vielzahl von Systemen für spezifische Anwendungsfälle mit Datenerfassungssystemen, Datenauswertemethoden und Entscheidungskriterien bietet die Grundlage für eine erfolgreiche Transformation in die industrielle Anwendung. Bislang sind Anwendungsfälle und Anwendungsfelder jedoch begrenzt. Erfolgreich werden SHM-Methoden basierend auf geführten Wellen im Bereich des Pipeline-Monitorings eingesetzt, für viele Anwendungen geführter Wellen fehlt derzeit jedoch noch die Akzeptanz aufgrund fehlender Normung und fehlender Referenzanwendungen.



1. Stand der Technik

SHM Methoden basierend auf geführten Wellen nutzen die Interaktion geführter Wellen mit möglichen Schäden innerhalb von Strukturen, um Informationen über mögliche Schäden zu extrahieren. Wellen werden mit einem oder mehreren in der Regel permanent installierten Aktuatoren eingebracht und mit einem oder mehreren in der Regel permanent installierten Aufnehmern nach dem Durchlaufen der Struktur erfasst. Mithilfe geeigneter Datenanalyse werden Informationen über mögliche Schäden in verschiedenen Ausprägungen, von reiner Detektion über Lokalisation und Größen-, bzw. Typangabe bis hin zur Bestimmung der Restlebensdauer der Struktur ermöglicht.

Die Physik des Verfahrens ist seit geraumer Zeit bekannt. Im Vergleich zur klassischen Ultraschallprüfung, in der Longitudinal- und Transversalwellen genutzt werden, basiert das hier thematisierte SHM-Verfahren auf geführten Wellen, die beispielsweise in plattenförmigen Strukturen in asymmetrische Moden, symmetrische Moden – gemeinsam als Lambwellen bezeichnet – und SH-Wellenmoden unterteilt werden. Durch die Plattenoberflächen werden sie geführt und haben eine Reichweite von mehreren Metern auch in flächigen Strukturen. In der Regel werden nur die Grundwellenmoden angeregt, was durch eine entsprechende Wahl der Anregungsfrequenz gesteuert werden kann. Zur Beschreibung der Physik sei beispielsweise auf [1, 2, 3] verwiesen.

Ein SHM System besteht nach der Definition des Fachausschusses Zustandsüberwachung der DGZfP sowohl aus Überwachungsobjekt mit Messaufnehmern, Signalpassungseinheiten und Datenspeichern als auch aus dem Datenverarbeitungssystem und dem automatisierten Diagnosesystem, [4]. Für die industrielle Anwendung ist wichtig, diese Komponenten zu definieren und Nicht-Experten einen Überblick über die Grundsätze des Verfahrens zu ermöglichen. Für alle Komponenten gibt es Anforderungen für SHM mit geführten Wellen, die für eine normative Verankerung zu berücksichtigen sind und im Folgenden dargelegt werden. Für die normative Verankerung kann dabei in Teilen auf den Inhalten des Merkblatts „SHM 01 – Strukturprüfung mit geführten Wellen als Sonderform des Ultraschalls“, [5], aufgebaut werden.

1.1 Datenerfassung

Sowohl zur Anregung als auch zum Aufnehmen der geführten Wellen werden in der Regel piezoelektrische Wandler eingesetzt. Wie auch in der klassischen Ultraschalltechnik bekannt, unterscheidet man zwischen Methoden, die denselben Wandler temporär als Aktuator und Sensor nutzen (Pulse-Echo) und Verfahren, in denen Aktuator und Sensor durch zwei unterschiedliche und in der Regel ortsverschiedene Wandler abgebildet werden (Pitch-Catch).

Die permanente Verbindung zwischen Wandler und Struktur kann beispielsweise für Faserverbundstrukturen durch eine Applikation der Wandler vor einem Autoklavprozess erfolgen. Insbesondere für nachträglich applizierte Systeme muss auf eine zuverlässige Verbindung geachtet werden, beispielsweise mithilfe von Zweikomponentenklebstoffen wie Hysol EA9394, je nach Anwendung sind auch gängige DMS-Klebstoffe wie HBM Z70 nutzbar. Um eine gute Signalerfassung und Anregung zu ermöglichen, sollte die Klebschicht zwischen Wandler und Struktur möglichst dünn sein. Beispielsweise mithilfe des elektromechanischen Impedanzspektrums kann die Qualität der Anbindung auch im Vergleich aller Wandler des Sensornetzwerkes überprüft werden, [6].

Um die Daten zu erfassen, benötigt man zusätzlich einen Transientenrekorder, für die Anregung wird ein Waveformgenerator benötigt. Die Anforderungen an diese Geräte sind stark von der Anwendung abhängig, in der Regel ist aber eine Abtastrate von mehreren MHz notwendig und vielfach ist ein Vorverstärken des Signals zielführend.

Für die normative Verankerung des Verfahrens ist die Beschreibung der messtechnischen Ausstattung des Systems von großer Bedeutung. Hier kann auf den Inhalten des Merkblatts SHM01 aufgebaut werden.

1.2 Datenauswertemethoden

Die Anzahl an möglichen Datenauswertemethoden ist in den letzten Jahren nahezu explodiert. Es existieren sehr spezialisierte Auswertelgorithmen, die besonders für bestimmte Anwendungsfälle ausgelegt sind. Das oben genannte Merkblatt gibt fünf Kategorien an, in die diese Algorithmen unterteilt werden können:

- Signalanalysemethoden basierend auf statistischer Datenverarbeitung, z.B. [7],
- Signalanalysemethoden basierend auf physikalischen Merkmalen, z.B. [8, 9],
- Zeit-Frequenz-Analysen, z.B. [3],
- Time Reversal Methoden, z.B. [2],
- Modell-basierte Methoden, z.B. [10],
- Methoden basierend auf Mustererkennung mit künstlicher Intelligenz, z.B. [11, 3].

Sollten keine Vergleichsdaten des geschädigten Zustandes vorliegen, so ist erst mithilfe modell-basierter Methoden ein Rückschluss auf das Schadensausmaß möglich. Der Aufwand ist im Vergleich beispielsweise zu statistischer Datenverarbeitung deutlich höher.

In vielen Fällen ist Teil der Datenauswertung auch die Visualisierung zur Lokalisation. Hierzu lässt sich der Großteil der Verfahren in drei Gruppen einteilen:

- Nutzung von Übertragungspfaden, z.B. [12, 13],
- Triangulationsverfahren, z.B. [9],
- Nutzung synthetischer Apertur zur Fokussierung (SAFT), z.B. [14, 15].

Für die normative Verankerung des Verfahrens sollten die verschiedenen Möglichkeiten der Datenauswertung und die damit einhergehenden Limitierungen bezüglich des Levels, beispielsweise, dass mit bestimmten Methoden keine Abschätzung der Fehlergröße möglich ist, dargestellt werden. Auch hier kann auf den Inhalten des Merkblatts SHM01 aufgebaut werden.

1.3 POD und ROC im NDT-Bereich

Zur Bestimmung der Performanz hat sich im Bereich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit klassischen Methoden des Ultraschalls die Berechnung der Probability of Detection (POD) Kurve etabliert, [16]. Hierfür gilt die Voraussetzung, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Fehlergröße und Systemantwort angenommen werden kann bei unkorrelierten Systemantworten und einer Normalverteilung der Systemantworten um die Ausgleichsgerade und Homogenität der diese Normalverteilung beschreibenden Varianzen. **Abb. 1a)** zeigt das prinzipielle Vorgehen zur Bestimmung der POD-Kurve. Die POD für die Fehlergröße a ergibt sich aus dem Anteil der Verteilung der Prüfsystemantwort \hat{a} bei dieser Fehlergröße a , der oberhalb des Grenzwertes \hat{a}_{thr} liegt. Dieser wiederum bestimmt sich aus der Verteilung von \hat{a} für den Fall das kein Schaden vorliegt. Hieraus lässt sich ein charakteristischer Wert $a_{90|95}$ bestimmen, der angibt, welche Fehlergröße a mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% mit einer Konfidenz von 95% detektiert werden kann.

Insbesondere im letzten Jahrzehnt hat für die Bestimmung der POD im NDT-Bereich das Interesse, diese simulationsgestützt zu bestimmen, enorm zugenommen. Anbieter hierfür sind beispielsweise CIVA [17].

Für die Bewertung von Analysestrategien, wie es Datenauswertemethoden sind, hat sich die Berechnung der Receiver Operating Characteristic (ROC)-Kurve etabliert. Hier wird für verschiedene Grenzwerte bestimmt, die hoch die Rate korrekter Fehlerentdeckung

ist und über der zugehörigen Rate fälschlicher Weise als geschädigt bezeichneter ungeschädigter Fälle (PFA – probability of false alarm) aufgetragen, **Abb. 1b**).

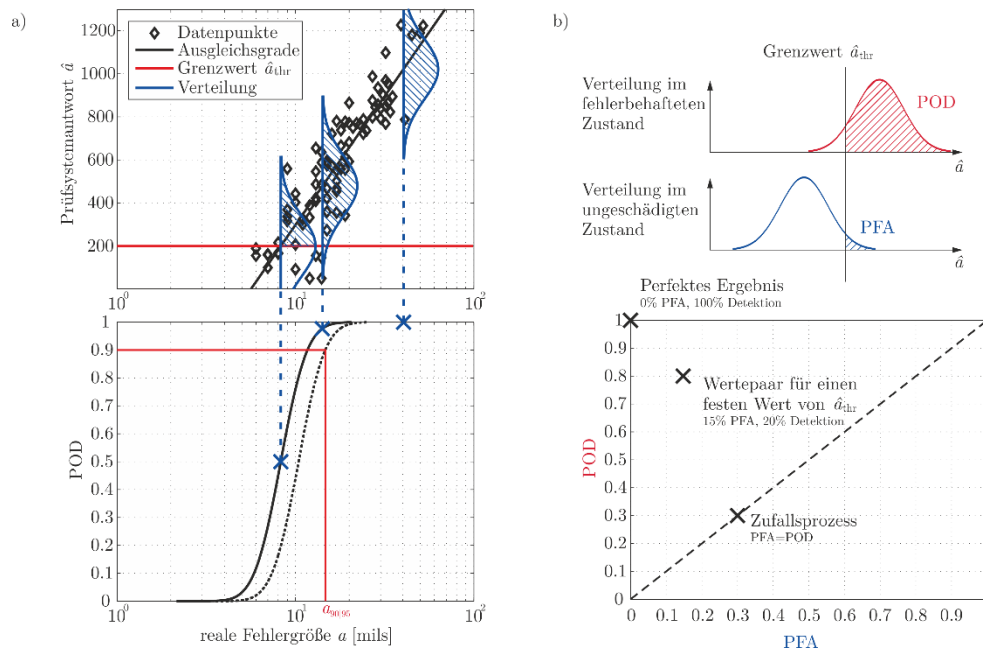


Abb. 1: a) Visualisierung der prinzipiellen Vorgehensweise zur Bestimmung der POD-Kurve und der Fehlergröße, die mit 90%iger Wahrscheinlichkeit bei einem Konfidenzintervall von 95% detektiert wird, Übersetzung aus [6], b) ROC Beispielkurve und Herkunft der Daten, z.B. frei nach [18]

Im Gegensatz zur POD-Kurve ist hier der Grenzwert variabel, während die Daten des geschädigten Zustands bestimmten Fehlergrößen zugeordnet sind. In vielen Fällen wird die ROC-Kurve für einen bestimmten erwarteten Schaden unter gegebenen Umständen bestimmt. Aus der ROC-Kurve kann aber nicht bestimmt werden, welche Fehlergröße mit einer definierten Wahrscheinlichkeit bei einem definierten Konfidenzintervall von dem zu untersuchenden SHM System gefunden wird. Dies diskutiert beispielsweise [18].

Für die normative Verankerung des Verfahrens sehen die Autoren hier großen Forschungsbedarf. Wenngleich die Vorgehensweise zur Bestimmung der POD im Bereich NDT bereits etabliert ist, so ist diese Vorgehensweise nur sehr bedingt für die hier diskutierten SHM-Anwendungen übertragbar. Zur Stärkung der industriellen Anwendung ist jedoch die Bestimmung der Performanz dieser SHM-Systeme unbedingt notwendig und erfordert strukturierte Vorgehensweisen hierzu.

1.4 Berücksichtigung von EOC

Da SHM-Systeme im Gegensatz zu vielen NDT-Verfahren nicht unter gut definierten konstanten Bedingungen angewendet werden, sondern für eine Vielzahl von unterschiedlichen Betriebs- und Umgebungsbedingungen (environmental and operational conditions – EOC) zu korrekten Monitoringergebnissen führen müssen, ist die Berücksichtigung dieser EOC für die Zuverlässigkeit der Systeme unerlässlich. Wellengeschwindigkeit, Dämpfungsgrade etc. variieren mit sich ändernden EOC und müssen als Einfluss betrachtet werden, da Signaländerungen aufgrund sich ändernder Umgebungsbedingungen häufig größer sind, als der Einfluss des Strukturschadens [19, 20, 18]. Auch dies muss im Rahmen einer normativen Verankerung geregelt werden, hat einen großen Einfluss auf die Bestimmung der Performanz und ist im Merkblatt lediglich angeschnitten.

Zur Berücksichtigung sich ändernder EOCs gibt es bereits einige Ansätze, die sich in zwei Gruppen unterteilen lassen. Möglich ist es einerseits, Baselinemessungen für ver-

schiedene EOC-Kombinationen zu nutzen und z.T. unter Messung der EOC für jede Strukturüberprüfung mit einer passenden Baseline zu vergleichen. Hier ist auch vorstellbar, dem System einen selbstlernenden Charakter zu geben, in dem die Anzahl der Baselines erweitert wird, sobald ein bereits bekannter „Gutzustand“ wieder erreicht wird. Alternativ ist es möglich, auf Basis der physikalischen Gesetzmäßigkeiten eine Anpassung der Baseline durch ein Strecken oder Stauchen zu erreichen. Dies ermöglicht eine Berücksichtigung sich ändernder EOCs ohne eine Vielzahl von Baselinemessungen. Die Kombination beider Grundsätze ist ebenfalls möglich und in der Anwendung zu finden.

Um die Erkennung von Schäden zu sichern, ist häufig eine Beschränkung der Änderungen von Umgebungsbedingungen notwendig, da bei großen Temperaturunterschieden trotz Temperaturkompensation der Einfluss der Temperatur größer sein kann, als der Einfluss des Schadens. Liu und Cawley schlagen hierzu vor, den Einfluss beispielsweise von Temperaturschwankungen zu testen und hieraus mithilfe der ROC-Kurve zu bestimmen, welche maximalen Temperaturschwankungen zulässig sind, um dennoch eine Fehlerentdeckungswahrscheinlichkeit von beispielsweise 90% bei einer PFA von 5% zu erreichen [18]. Bei der Arbeit mit multiplen Baseline-Messungen ist in ähnlicher Weise der Temperaturabstand zwischen den Baseline-Messungen anzupassen.

3. Existierende Normen

Für die normative Verankerung des Verfahrens ist es wesentlich, sich in bestehende Normengeflechte einzufügen. Die bislang gelungenen industriellen Anwendungen von SHM-Systemen basierend auf geführten Wellen nutzen eine Reihe von Normen, die das Verfahren noch nicht in Gänze abdecken, aber in Teilen anwendbar sind. Hierzu sind branchenspezifische und branchenübergreifende Normen und Merkblätter zu nennen.

Die Inspektion von Rohren mit geführten Wellen ist in Großbritannien in BS9690-1:2011 und -2:2011 genormt, ISO 18211:2016 greift dies für Oberflächenpipelines und Industrierohrleitungen auf, auch eine ASTM (ASTM E2775-11) existiert auf dem Gebiet der Rohrleitungen. Darüber hinaus ist es möglich, Verfahren individuell auf Basis PD CEN/TR 14748:2004 zu zertifizieren. Im Bereich der Luftfahrt beinhaltet die SAE International ARP6461 (Guidelines for implementation of structural health monitoring on fixed wing aircraft) auch SHM-Methoden basierend auf geführten Wellen, ist aber sehr allgemein gehalten, sollen doch auch viele weitere SHM-Methoden abgedeckt werden.

Branchenübergreifend wird durch DIN ISO 17359 die Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen genormt. Wenngleich der Fokus hier auf klassischen Condition Monitoring Systemen drehender Komponenten liegt und nicht in der Überwachung primär lasttragender Strukturen, so ist doch die bestehende Norm in vielerlei Hinsicht auch für die Anwendung von SHM-Methoden basierend auf geführten Wellen interessant. Mit dem bereits erwähnten Merkblatt SHM01 steht ein erstes branchenübergreifendes Dokument zur Verfügung, das insbesondere die Grundlagen des Verfahrens abbildet und auch für Nicht-Experten zugänglich macht, jedoch keine konkreten Hinweise zu Maßnahmen zur Bestimmung der Performanz gibt.

4. Notwendige Forschung und Normung für SHM basierend auf geführten Wellen

Aus dem Überblick über Bestehendes zeigt sich, dass für ein vermehrtes Nutzen von SHM-Methoden basierend auf geführten Wellen ein einheitliches Vorgehen zur Bestimmung der Performanz fehlt. Die in anderen Bereichen etablierten Vorgehensweisen sind dabei nur zum Teil übertragbar. Die Fehlerempfindlichkeit der SHM-Systeme variiert selbst bei no-

minell identischen Strukturen. Hierfür sehen die Autoren hauptsächlich die folgenden Gründe:

- Fehlerposition und Position der Wandler relativ zum Fehler,
- Vielzahl an Fehlerarten,
- Sensorbedingte Abweichungen,
- Einfluss von Umgebungs- und Betriebsbedingungen,
- Abweichungen zwischen nominell identischen Strukturen.

Hieraus und aus der Tatsache, dass die Wandler fest mit der Struktur verbunden sind, resultiert, dass für ein solches SHM System keine rein experimentelle oder ein simulationsbasierte Bestimmung der Performanz möglich ist. Es ist daher unabdingbar, dass eine Lösung nur durch eine Kombination von Simulationen und experimentellen Ergebnissen möglich ist. Im Weiteren werden hierzu einzelne Aspekte fokussiert.

4.1 Ortsabhängigkeit für flächige Überwachung

Der Einfluss der Fehlerposition und der Position der Wandler relativ zum Schaden soll anhand eines einfachen Laborbeispiels deutlich gemacht werden. Eine Aluminiumplatte, die mit 4 Wandlern ausgestattet ist, wird mit einem künstlichen Fehler geschädigt. Der Fehler wird nacheinander an drei verschiedenen Positionen A, B, C eingebracht, **Abb. 2a**). Dieser Fehler, simuliert durch Magnete, liegt in drei verschiedenen Ausprägungen, L1-L3, deren Schweregrad zunimmt, vor. Es gibt also 9 Konfigurationen. Im Pitch-Catch-Modus werden nun alle Wandlerkombinationen genutzt, um eine Detektion und Lokalisation mithilfe des SAFT-Algorithmus zu ermöglichen. Für die Auswertung wurde die frei verfügbare Toolbox SHMtools von LANL genutzt [21], eine beispielhafte Visualisierung ist in **Abb. 2b**) dargestellt. Sowohl der maximale Schadensindex als auch der Abstand zwischen dem Ort, an dem der maximale Schadensindex ermittelt wurde – also dem wahrscheinlichen Fehlerort – und dem realen Fehlerort, Δx , wurden für alle 9 Konfigurationen bestimmt.

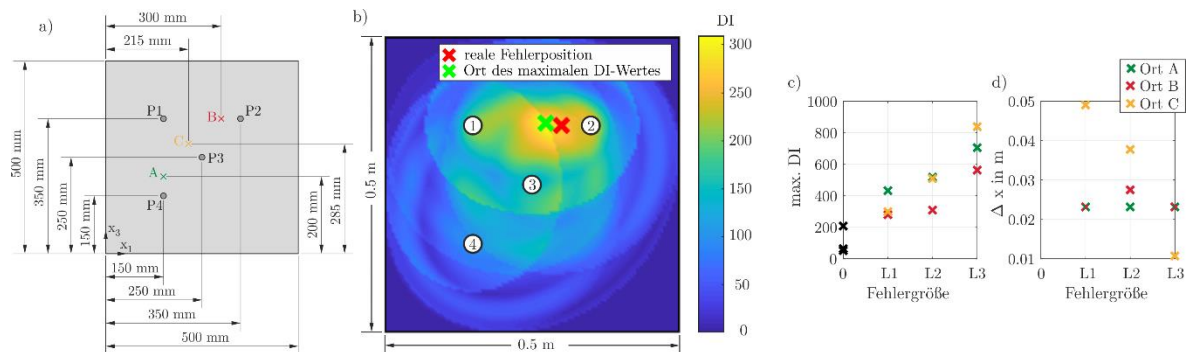


Abb. 2: a) Experimental Setup, b) beispielhafte Visualisierung des Auswertungsergebnisses eines Fehlers bei B, c) Anstieg des Schadensindikator DI mit zunehmender Fehlergröße, d) Reduktion von Δx mit zunehmender Fehlergröße

Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Schädigung der Schadensindikator DI steigt und der Abstand zwischen vermuteter Fehlerposition und realer Fehlerposition abnimmt, **Abb. 2c,d**). In den Ergebnissen ist aber auch deutlich zu sehen, dass der Ort des Fehlers einen Einfluss hat, der nicht zu vernachlässigen ist. Auch die zwei auf den ersten Blick symmetrischen Fehlerorte A und B führen nicht zu gleichen Ergebnissen, beispielsweise verursacht durch die unterschiedliche Orientierung des Umkontaktes der Wandler und der dadurch verursachten Unsymmetrie.

Ein zu entwickelndes Verfahren zur Performanzbestimmung muss diese Ortsabhängigkeit abbilden können. Ebenso sollte auch die Möglichkeit der multiplen Ausgabeparameter, hier nicht nur die Größe des Schadensindizes als Maß korrelierend mit der vorhandenen Fehlergröße, sondern auch die Genauigkeit der Lokalisation durch Δx , in

einem zu entwickelnden Verfahren abgebildet werden können. Die Vielzahl der Parameter ist dabei nicht rein durch experimentelle Untersuchungen abzudecken und erfordert die Kombination mit effizienten numerischen Untersuchungen.

4.2 Referenzfehler

Um die Unterschiede zwischen Werkstoffklassen und Fehlerarten zu berücksichtigen, ist es aus Sicht der Autoren notwendig, werkstoffspezifisch und fehlerartspezifisch Referenzfehler zu definieren und zu charakterisieren, um mithilfe dieser eine Performanzbestimmung zu ermöglichen. Im Unterausschuss geführte Wellen des Fachausschusses Zustandsüberwachung der DGZfP wurde eine umfassende Sammlung erstellt und es haben sich insbesondere die in **Tab. 1** dargestellten Szenarien als relevant herausgestellt, für die hier Vorschläge zur experimentellen irreversiblen und numerischen Realisierung angegeben sind.

Tab. 1: mögliche Referenzfehler für unterschiedliche Fehlerarten und Werkstoffe

Materialklasse	Realer Schaden	Referenzfehlerrealisierung	Simulationsrealisierung
Faserverbund	Delamination	Einlegen von Teflonfolien während der Herstellung	Lokale stressfreie Randbedingungen zwischen Schichten
Faserverbund	Matrixrisse	Flüssiger Stickstoff	Lokale Steifigkeitsreduzierung
Faserverbund	Impactschaden	Reproduzierbarer Impact	Kombination stressfreier Randbedingungen und zusätzlicher Dämpfung
Metalle	Korrosion	Ausfräsungen	Deformation der Zellen
Metalle	Risse	Schwingversuche mit definiertem Rissanfang	Trennen der Zellen und Contact Acoustic Nonlinearity
Metalle	Defekte Schweißverbindungen	Einbringen von Schlitzten mit einem Winkelschleifer	Trennen der Zellen und Contact Acoustic Nonlinearity

Für eine normative Verankerung ist aus Sicht der Autoren notwendig, für typische Fehlerarten und Werkstoffe einheitliche Referenzfehler zu definieren und diese zur Performanzbestimmung heranzuziehen. Erste Untersuchungen zu reversiblen Referenzfehlern für Faserverbund und Impactschäden gibt [22]. Für die effektive Kombination numerischer und experimenteller Ergebnisse ist die Untersuchung der Übertragbarkeit eine zentrale Voraussetzung.

4.3 Simulation

Gebräuchlich für die Simulation sind derzeit Finite Differenzen Verfahren (FDM), Finite Volumen Verfahren (FVM) und Finite Elemente Verfahren (FEM) und semi-analytische hybride Ansätze (semi-analytic hybrid approach SAHA, semi-analytic FE SAFE) in Frequenzbereich. Während FDM, SAFE und SAHA in der Regel bezüglich der Komplexität der zu untersuchenden Geometrie limitiert sind, sind FEM-Ansätze diesbezüglich stark, aber sehr rechenintensiv insbesondere aufgrund der hohen zeitlichen und räumlichen notwendigen Diskretisierung. Beispiele für die erfolgreiche Umsetzung für die Simulation von SHM-Systemantworten finden sich beispielsweise in [23, 10, 24, 25].

Für eine normative Verankerung sind valide und effiziente Simulationsmethoden eine Grundvoraussetzung. Nur durch die Kombination experimenteller und numerischer Ergebnisse ist aus Sicht der Autoren eine Bestimmung der Performanz für ein spezifisches SHM-System basierend auf geführten Wellen möglich. Aus Sicht der Autoren ist insbesondere bezüglich der Abbildung von Fehlern und der Untersuchung der Vereinbarkeit numerischer und experimenteller Ergebnisse weitere Forschung notwendig, um eine zuverlässige Methode zur Bestimmung der Performanz basierend aus der Kombination von Experiment und Simulation zu entwickeln und normativ zu verankern.

4.4 Einfluss der Struktur

Für die Auslegung eines SHM-Systems ist in der Regel die nominelle ideale Struktur bekannt, die Applikation erfolgt an einer Struktur, die sich in Details von diesen Idealen unterscheidet. Auch die Komponenten des SHM-Systems selbst weisen beispielsweise in der Anbindung von Wandler zur Struktur Abweichungen zum nominellen Zustand auf. Überdies werden viele SHM-Systeme für die Überwachung von Einzelanfertigungen genutzt. Diese Abweichungen stellen Einflüsse für die Ergebnisse des SHM-Systems dar, die berücksichtigt werden müssen. Eine Erfassung aller dieser Faktoren ist jedoch in vielen Fällen mit einem hohen Aufwand verbunden oder gar unmöglich, eine Berücksichtigung in Simulationen ist praktisch unmöglich. Die Berücksichtigung der Bedingungen vor Ort ist daher nur auf Basis von experimentellen Untersuchungen möglich, deckt jedoch nur den ungeschädigten Fall ab und muss daher beispielsweise mit Simulationsergebnissen des geschädigten Zustands kombiniert werden. Eine Analyse der Signifikanz einzelner Kenngrößen in allgemeiner Weise ist durch Parameterstudien auch mithilfe der Simulation denkbar, die Übertragbarkeit ist jedoch für den Einzelfall zu prüfen.

Für eine normative Verankerung ist es daher unbedingt notwendig, durch Messungen an der realen Struktur im ungeschädigten Zustand Rückschlüsse ziehen zu können auf Unterschiede zwischen idealer und realer, durch die verschiedenen Faktoren veränderter Struktur, und diese für die Bestimmung der Performanz berücksichtigen zu können.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Für die Anwendung von SHM-Methoden auf Basis geführter Wellen stellt die Normung notwendiger Verfahrensschritte und einer Vorgehensweise zur Bestimmung der Performanz eines solchen SHM Systems eine wichtige Aufgabe dar. Bestehende Normen und Merkblätter enthalten bereits hinreichend Informationen bezüglich des Messequipments und der Datenauswertung. An Beispieldaten, die mit etablierten Verfahren ausgewertet wurden, zeigt sich, dass eine starke Orts- und Strukturabhängigkeit gegeben ist. Auch der Einfluss von sich ändernden Umgebungs- und Betriebsbedingungen ist wesentlich. Alle diese Faktoren sind bei der Bestimmung der Performanz zu berücksichtigen, die aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren nur durch eine Kombination von experimentellen und numerischen Untersuchungen erfolgreich und umfassend durchgeführt werden kann.

In der Anwendung von SHM-Methoden basierend auf geführten Wellen hat sich als Ziel des Verfahrens die Detektion von definierten Fehlern und Schadensbildern wie von Rissen, Delaminationen oder Korrosionsschäden etabliert. Um für diese Verfahren den Schritt in die industrielle Anwendung zu vereinfachen, ist eine Vorgehensweise zur Bestimmung der Performanz zu definieren. Die folgenden Schritte werden hierzu angestrebt:

- Die Definition und wissenschaftliche Etablierung von Referenzfehlern für verschiedene Fehlerarten und Werkstoffklassen,
- die Erarbeitung einer Methode, die die statistische Berücksichtigung von Ortsabhängigkeit, Strukturabhängigkeit und EOC-Abhängigkeit ermöglicht,
- die Realisierung eines Abstraktionslevels, das eine Berücksichtigung der Vielzahl der Werkstoffe und Fehlerarten in einer Norm ermöglicht und
- die Erarbeitung von levelspezifischen Lösungen um den verschiedenen Anforderungen an SHM-Systeme gerecht zu werden.

Darüber hinaus ist insbesondere für SHM-Systeme, die die Bestimmung der verbleibenden Nutzungsdauer anstreben, denkbar, über die etablierten Ziele, wie die Detektion eines Risses hinaus, gleich Rückschlüsse auf die Resttragfähigkeit zu ermöglichen. Eine vollständige Abkehr von traditionellen Schadensbildern ist aus Sicht der Autoren derzeit

aber nicht in der Fläche zu erwarten, wengleich Rückschlüsse auf die Resttragfähigkeit und verbleibenden Nutzungsdauer in vielen Anwendungen im Fokus der Untersuchungen stehen.

Referenzen

- [1] H. Lamb, „On the Propagation of Temors over the Surface of an Elastic Solid,“ *Philosophical Transactions of the Royal Society A - Mathematical Physical And Engineering Sciences*, Bd. 203, pp. 1-42, 1904.
- [2] V. Giurgiutiu, *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*, 2 Hrsg, Elsevier Science, 2014.
- [3] Z. Su und L. Ye, *Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications*, Springer, 2009.
- [4] Fachausschuss Zustandsüberwachung der DGZfP, *Was ist Zustandsüberwachung und SHM?*, 2014.
- [5] Fachausschuss Zustandsüberwachung der DGZfP, *Merkblatt SHM 01 - Strukturprüfung mit geführten Wellen als Sonderform des Ultraschalls*, 2014.
- [6] I. Mueller, "Inspection of piezoelectric transducers used for structural health monitoring systems," Dissertation, 2016.
- [7] M. A. Torres-Arredondo, I. Bueche, D. A. Tibaduiza, J. Rodellar and C.-P. Fritzen, "Damage detection and classification in pipework using acousto-ultrasonics and non-linear data-driven modelling," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 3, pp. 297-306, 2013.
- [8] M. J. S. Lowe, D. N. Alleyne und P. Cawley, „Defect detection in pipes using guided waves,“ *Ultrasonics*, Bd. 36, pp. 147-154, 2 1998.
- [9] J. Moll, „Strukturdiagnose mit Ultraschallwellen durch Verwendung von Piezoelektrischen Sensoren und Aktoren,“ Dissertation, Universität Siegen, 2011.
- [10] W. Ostachowicz, P. Kudela, M. Krawczuk und A. Zak, *Guided Waves in Structures for SHM - The Time-Domain Spectral Element Method*, Wiley, 2012.
- [11] M. A. Torres-Arredondo, „Acoustic Emission Testing and Acousto-Ultrasonics for Structural Health Monitoring,“ Dissertation, Universität Siegen, 2013.
- [12] R. Loendersloot, I. Bueche, P. Michaelidos, M. Moix-Bonet und G. Lampeas, „Damage Identification in Composite Panel - Methodologies and Visualisation,“ in *Final Project Meeting and Conference, SARISTU*, 2015.
- [13] A. J. Croxford, P. D. Wilcox, B. W. Drinkwater und G. Konstantinidis, „Strategies for guided-wave structural health monitoring,“ *Proceedings of the Royal Society A - Mathematical Physical And Engineering Sciences*, Bd. 463, pp. 2961-2981, 2007.
- [14] L. Schubert, R. Schwerz, M. Leibowitz, U. Lieske und B. Frankenstein, „Guided Wave Based SHM Approach Using SAFT-Algorithm for Impact Detection in Composite Materials,“ in *8th International Workshop on Structural Health Monitoring*, 2011.
- [15] T. Gaul, L. Schubert, B. Weihnacht and B. Frankenstein, "Localization of Defects in Pipes Using Guided Waves and Synthetic Aperture Focussing Technique (SAFT)," in *EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Nantes, 2014.
- [16] Department of Defense, *Department of Defense Handbook Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment MIL-HDBK-1823*, 2009.
- [17] B. Chapuis, G. Di Crisci, J. Hamilton, F. Jenson und L. Pomié, „Pipeline Girth Welds Inspection Using Automated Ultrasonic Testing (AUT) with Zonal Discrimination - Simulation of POD Curves Using CIVA Software,“ in *5th European-American Workshop on Reliability of NDE*, 2013.
- [18] C. Liu, J. Dobson und P. Cawley, „Efficient generation of receiver operating characteristics for the evaluation of damage detection in practical structural health monitoring applications,“ *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, Bd. 473, p. 20160736, 3 2017.
- [19] P. Cawley, F. Cegla und A. Galvagni, „Guided Waves for NDT and Permanently Installed Monitoring,“ in *Proceedings of the 18th World Conference on Nondestructive Testing*, 2012.
- [20] M. A. Torres-Arredondo und C.-P. Fritzen, „Ultrasonic Guided Wave Dispersive Characteristics in Composite Structures Under Variable Temperature and Operational Conditions,“ in *6th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Dresden, 2012.
- [21] Los Alamos National Security, „SHMTools LA-CC-14-046,“ 2014,.
- [22] M. Bach, A. Pouilly, B. Eckstein und M. Moix-Bonet, „Reference Damages for Verification of Probability of Detection with Guided Waves,“ in *Structural Health Monitoring 2017*, 2017.
- [23] C. Willberg, „Development of a new isogeometric finite element and its application for Lamb wave based structural health monitoring,“ Dissertation, Universität Magdeburg, 2012.
- [24] K. Tschöke und H. Gravenkamp, „On the numerical convergence and performance of different spatial discretization techniques for transient elastodynamic wave propagation problems,“ *Wave Motion*, Bd. 82, pp. 62-85, 11 2018.
- [25] M. V. Golub und A. N. Shpak, „Semi-analytical hybrid approach for the simulation of layered waveguide with a partially debonded piezoelectric structure,“ *Applied Mathematical Modelling*, Bd. 65, pp. 234-255, 1 2019.