

Untersuchungen zur rechnergestützten POD- Bestimmung für auf geführten Wellen basierende SHM-Verfahren

Kilian TSCHÖKE¹, Tobias GAUL¹, Lars SCHUBERT¹

¹ Fraunhofer IKTS, Dresden

Kontakt E-Mail: kilian.tschoeke@ikts.fraunhofer.de

Kurzfassung

Structural Health Monitoring (kurz SHM) wird in vielen Industriesektoren als Ergänzung zur klassischen zerstörungsfreien Prüfung angesehen, die den Wartungsaufwand im Betrieb einer technischen Anlage oder eines Fahrzeugs senken kann. Eine große Zahl an SHM-Systemen basiert auf der Messung von Ultraschallwellen mit permanent installierten, piezoelektrischen Wandlern. Der Mangel an geeigneten Möglichkeiten, um die Leistungsfähigkeit der Systeme nachzuweisen, ist jedoch weiterhin ein Problem für die breite Anwendung von SHM-Systemen. In der zerstörungsfreien Prüfung bezieht sich die Bewertung der Leistungsfähigkeit in der Regel auf die Ermittlung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (engl. Probability of Detection, kurz POD) eines Prüfverfahrens, die vorwiegend dem Berens-Modell folgt und hier normativ abgedeckt ist. Speziell für Verfahren im SHM-Bereich existieren jedoch kaum Ansätze zur Bewertung der Leistungsfähigkeit mithilfe von POD.

Eine rein experimentelle Ermittlung der POD im SHM-Bereich ist mit einem enormen Materialaufwand, und damit hohen Kosten, verbunden, da die Sensorik permanent auf einem Überwachungsobjekt installiert ist. Rechnergestützte Untersuchungen stellen eine Alternative dar. Hierfür ist zunächst die Modellierung der Ausbreitung elastodynamischer Wellen und deren Interaktion mit Schäden unabdingbar.

Der vorliegende Beitrag stellt anhand generischer Couponproben aus kohlefaserverstärktem Verbundwerkstoff die Modellierung der Wellenausbreitung und der Schadensinteraktion mittels des Diskretisierungsverfahrens EFIT vor. Ein Abgleich mit Laborversuchen wird präsentiert und validiert das Modellierungsverfahren. Anschließend wird unter Nutzung dieses Modells eine rechnergestützte POD-Bestimmung diskutiert.

UNTERSUCHUNGEN ZUR RECHNERGESTÜTZTEN POD-BESTIMMUNG FÜR AUF GEFÜHRTEN WELLEN BASIERENDE SHM-VERFAHREN

Kilian Tschöke, Tobias Gaul, Lars Schubert

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS

HERAUSFORDERUNG

Structural Health Monitoring (kurz SHM) wird in vielen Industriesektoren als Ergänzung zur klassischen zerstörungsfreien Prüfung angesehen, die den Wartungsaufwand im Betrieb einer technischen Anlage oder eines Fahrzeugs senken kann. Eine große Zahl an SHM-Systemen basiert auf der Messung von Ultraschallwellen mit permanent installierten, piezoelektrischen Wandlern. Der Mangel an geeigneten Möglichkeiten, um die Leistungsfähigkeit der Systeme nachzuweisen, ist jedoch weiterhin ein Problem für die breite Anwendung von SHM-Systemen. In der zerstörungsfreien Prüfung bezieht sich die Bewertung der Leistungsfähigkeit

in der Regel auf die Ermittlung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (engl. Probability of Detection, kurz POD) eines Prüfverfahrens, die vorwiegend dem Berens-Modell folgt und hier normativ abgedeckt ist. Speziell für Verfahren im SHM-Bereich existieren jedoch kaum Ansätze zur Bewertung der Leistungsfähigkeit mithilfe von POD.

Eine rein experimentelle Ermittlung der POD im SHM-Bereich ist mit einem enormen Materialaufwand, und damit hohen Kosten, verbunden, da die Sensoren permanent auf einem Überwachungsobjekt installiert

ist. Rechnergestützte Untersuchungen stellen eine Alternative dar. Hierfür ist zunächst die Modellierung der Ausbreitung elastodynamischer Wellen und deren Interaktion mit Schäden unabdingbar.

Projekt »CarbonSafe«
 Projektträger: VDI|VDE Innovation + Technik GmbH
 Förderkennzeichen: 1 16ES0333
 Laufzeit: 01.06.2015 - 31.05.2018

MODELLIERUNG UND VALIDIERUNG

Ziel des vom BMBF-geförderten Projekts »CarbonSafe« war die Entwicklung einer integrierten Strukturüberwachung für sicherheitsrelevante Automobilkomponenten aus kohlefaserverstärkten Kunststoffverbundwerkstoffen. Ein Teil der Arbeiten umfasste die Entwicklung und Validierung eines Simulationspakets, mit dessen Hilfe die Sensorsysteme optimiert und ausgelegt werden können. Die Softwareumgebung basiert auf der Elastodynamischen Finite-Integration-Technik (EFIT), die speziell für die Modellierung von Faserverbundbauteilen geeignet ist.

Anhand von Laservibrometrischen Messungen an generischen Probekörpern wurde das Modell validiert. Als Untersuchungsobjekt dienten Platt-

ten mit den Maßen 700 x 700 x 1 mm³ mit einem [0/90/90/0] Lagenaufbau. Auf diesen Platten wurden insgesamt 5 piezoelektrische Wandler aufgebracht (vgl. Bild 4).

Bild 1 zeigt eine Darstellung der Wellenfelder (Betrag der Auslenkung) zum Zeitpunkt 40 µs nach Anregung an W1 mit einem RC5-Impuls und einer Mittenfrequenz von 200 kHz. Gegenübergestellt sind die Wellenfelder einer entsprechenden Simulation und die Visualisierung der Labormessdaten. Zwischen Labormessung und Simulation konnte eine hohe Übereinstimmung des gesamten Wellenfeldes und der Ausbreitungsgeschwindigkeiten der möglichen Wellenmoden festgestellt werden.

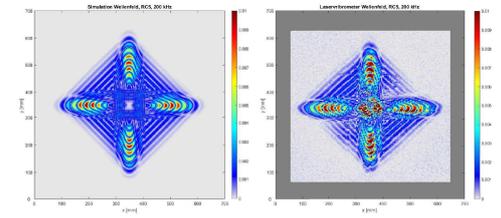


Bild 1: Vergleich der Wellenfelder des Betrags der Auslenkung zwischen Simulation (links) und 3D-Laservibrometer (rechts) nach 40 µs.

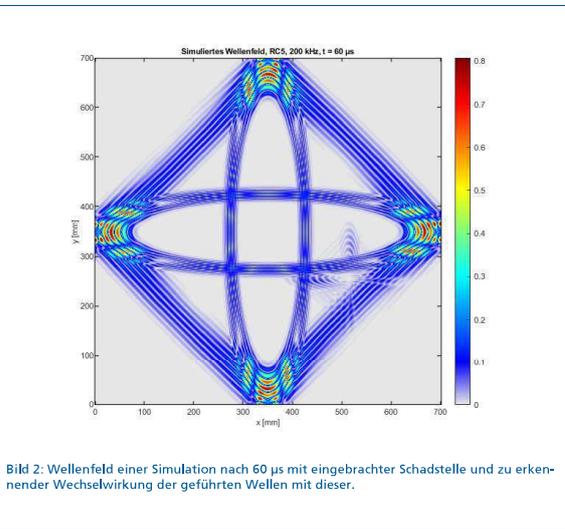


Bild 2: Wellenfeld einer Simulation nach 60 µs mit eingebrachter Schadstelle und zu erkennender Wechselwirkung der geführten Wellen mit dieser.

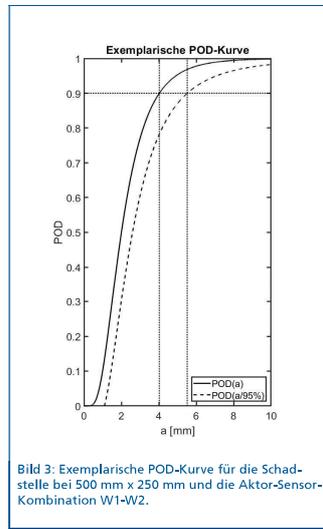


Bild 3: Exemplarische POD-Kurve für die Schadstelle bei 500 mm x 250 mm und die Aktor-Sensor-Kombination W1-W2.

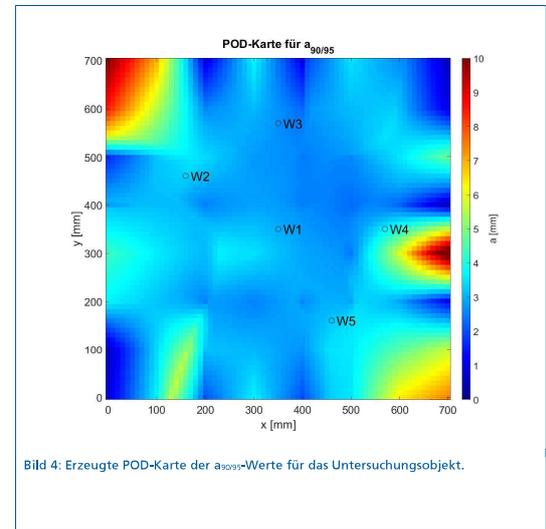


Bild 4: Erzeugte POD-Karte der $a_{90/95}$ -Werte für das Untersuchungsobjekt.

RECHNERGESTÜTZTE POD-BESTIMMUNG

Berechnungen der POD eines zerstörungsfreien Prüfsystems basieren oft auf dem sog. Berens-Ansatz. Er beruht auf umfangreichen Studien im Luftfahrtbereich und basiert auf zwei Grundannahmen. Diese sind zum einen ein linearer Zusammenhang zwischen dem untersuchten Schadensmerkmal und einem Schadensindex und zum anderen, dass ein einwirkender Störfaktor normalverteilt ist.

Die rechnergestützte Bewertung der Zuverlässigkeit des SHM-Messverfahrens baut auf der Berens-Methode auf. Als Schäden können verschiedene Typen in Frage kommen. Im gezeigten Beispiel wird eine Schadstelle als lokale Verringerung der Steifigkeit eingebracht, was eine Degradation des Materials modelliert. Insgesamt wurden 36 Fehlstellen betrachtet, was die Fertigung von 36 Probekörpern ersetzt.

Für die eigentliche POD-Berechnung wird ein Fehler jeweils nur an einer Position auf dem untersuchten Bauteil eingebracht und anschließend wiederholt die Größe des Fehlers verändert. Als Schadensindex a fungiert der Durchmesser der Schadstelle in Millimeter.

Pro Fehlerposition und -größe fungiert jeweils einer der Wandler mehrmals als Aktor und alle anderen als Sensoren, d. h., das Messprinzip basiert auf der Acousto-Ultrasonic-Methode. Die Abstrahlcharakteristik wird basierend auf den Ergebnissen der Laservibrometrischen Messungen an Probekörpern variiert. Durch diese Variation der Abstrahlcharakteristik wird Rauschen als Störfaktor eingebracht.

Bild 2 zeigt das Wellenfeld einer Simulation nach 60 µs. Als Aktor fungierte W1 mit einer RC5-Anregung mit 200 kHz Mittenfrequenz. Eine Schadstelle wurde bei 500 mm x 250 mm eingebracht. Deutlich zu erkennen ist das typische Wellenfeld innerhalb der Probekörper (vgl. Bild 1) sowie die Wechselwirkung der geführten Welle mit dieser Schadstelle.

Unter allen Aktor-Sensor-Kombinationen wird anschließend ein Schadensindex für alle zu dieser Fehlerposition durchgeführten Rechnungen ermittelt. Als Schadensindex \bar{a} dient der quadratische Mittelwert der Differenzsignale zwischen einer Baseline und dem jeweiligen Schadensfall.

Für die Berechnung einer POD-Kurve nach Berens ist weiterhin die Wahl einer Entscheidungsgrenze notwendig. Diese Entscheidungsgrenze wird aus wiederholten Simulationen der Baseline mit o. g. Rauschen bestimmt. Unter allen Baseline-Rechnungen wird \bar{a} berechnet und anschließend die Entscheidungsgrenze 6 dB über dem Maximum gewählt.

Eine exemplarisch ermittelte POD-Kurve für die Schadstelle bei 500 mm x 250 mm sowie die Aktor-Sensor-Kombination W1-W2 zeigt Bild 3. Für jede Schadensposition werden anschließend die a_{90} - bzw. $a_{90/95}$ -Werte für alle Aktor-Sensor-Kombinationen nach Berens bestimmt und der optimale ausgewählt. Für die genannte Schadstelle ergibt sich $a_{90} = 4,02$ mm sowie $a_{90/95} = 5,51$ mm.

Interpoliert man die für alle 36 Fehlstellen ermittelten $a_{90/95}$ -Werte, so erhält man eine POD-Karte (vgl. Bild 4). Eine solche POD-Karte gibt eine visuelle Darstellung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit des betrachteten SHM-Systems.