

Simulation von Sensorsystemen zur Inspektion von Bauteilstrukturen im Sinne eines Structural Health Monitoring

Ramanan SRIDARAN VENKAT¹, Vivek RATHOD², D. Roy MAHAPATRA²,
Christian BOLLER¹

¹ Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für ZfP & Qualitätssicherung (LZfPQ), Saarbrücken

² Indian Institute of Science (IISc) Aerospace Engineering Dept., Bangalore, Indien

Kurzfassung. Seit mehr als zwei Jahrzehnten wird an der Entwicklung von Systemen zur Zustandsbestimmung von Bauteilstrukturen, sog. Structural Health Monitoring (SHM) Systemen gearbeitet. Der wesentliche Reiz dieser Systeme besteht in der Automatisierung von Inspektionsprozessen, wobei die Systeme im Zusammenhang mit schadenstoleranten Bauteilstrukturen hilfreich sein können. In solchen Fällen müssen Schäden, üblicherweise Risse, einer definierten Größe zuverlässig erkannt werden können. Bei konventioneller Inspektion bzw. zerstörungsfreier Prüfung kann diese Zuverlässigkeit durch Prüfung in verschiedenen Konstellationen, d.h. Positionen des Prüfkopfes erfolgen. Bei SHM, wo die Sensorik üblicherweise fest installiert ist, besteht diese Flexibilität der Positionierung der Sensorik, so sie denn einmal platziert ist, nicht. Aus diesem Grund spielt die gezielte Positionierung der Sensorik bei SHM eine ganz besondere Rolle.

In dem Beitrag wird aufgezeigt, wie mit konventionellen und auch neueren Simulationswerkzeugen ein in einer Bauteilstruktur definierter Riss mit Hilfe geführter Wellen gezielt zuverlässig mit Hilfe eines SHM-Systems detektiert werden kann. Dabei wird gezeigt, wie ausgehend von einem CAD-Modell der betrachteten Bauteilstruktur ein FE-Modell in COMSOL generiert werden kann, das dann um spezielle spektrale FE-Elemente ergänzt wird, die die typischen zulässigen Fehler (Risse) beschreiben und somit eine beschleunigte Analyse und Bildsequenz der sich ausbreitenden geführten Wellen ermöglicht. Aus dem Vergleich bzw. der Differenz der Bildfolgen zwischen einem ungeschädigten und geschädigten Zustand lassen sich dann die Orte höchster Signalintensität identifizieren, aus denen schließlich das optimale Sensorsystem abgeleitet wird. Die für eine Mehrlochscheibe mit Riss erhaltenen Simulationsergebnisse werden vorgestellt und hinsichtlich der Ableitung eines entsprechend zu optimierenden Sensorsystems diskutiert. Weiterführende Arbeiten an einem versteiften Panel werden erläutert. In einem abschließenden Überblick wird dann noch auf eine Simulationsplattform verwiesen, die derzeit im Rahmen eines deutsch-indischen F&E-Projekts entwickelt wird.

Einführung

Structural Health Monitoring (SHM), auch mit dem Begriff Zustandsüberwachung im Deutschen bezeichnet, beinhaltet die Elemente einer vollständigen Beschreibung der Betriebsbedingungen eines Bauteils einschließlich der Festigkeit und des Schädigungszustandes [2]. Es beginnt mit der Messung von Betriebslastfolgen und wird gefolgt von einer auf der Betriebsfestigkeit basierenden Lebensdauervorhersage über die zumindest



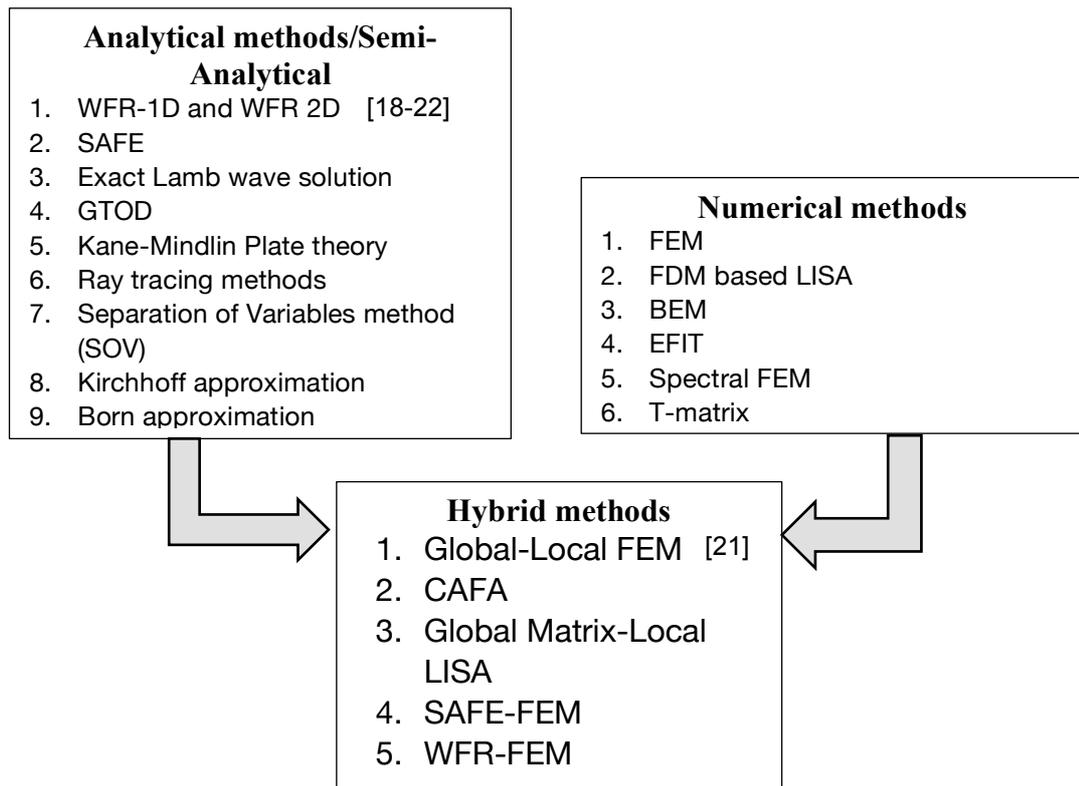
die Orte höchster Schadensakkumulation bestimmt werden können, auch dann, wenn Schadensakkumulationshypothesen wie die nach Palmgren-Miner als nicht zutreffend zu bezeichnen sind. Für diese Orte sind dann SHM-Systeme zu entwickeln, die sich hinsichtlich ihrer Schadensaussage als absolut zuverlässig erweisen müssen. Diese Zuverlässigkeit bezieht sich nicht allein nur auf die Betriebszuverlässigkeit des SHM-Systems sondern auch auf die Zuverlässigkeit der mit dem SHM-System gewonnenen Aussagen. Diese Zuverlässigkeit wird in der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) mit dem Begriff Probability of Detection (POD) beschrieben. In der klassischen ZfP kann eine hohe POD durch eine quasi beliebige Anzahl und Kombination an Messungen erfolgen, bis eine 100%-ige Abdeckung des Bauteils hinsichtlich der Prüfung erfüllt ist. Bei SHM gibt es aufgrund der Integration bzw. Adaption der Wandler in bzw. auf die Bauteilstruktur nur eine einzige Kombination an Wandlern, die den zulässigen Schaden mit quasi 100%-iger Zuverlässigkeit erkennen muss. Dieses Netzwerk an Wandlern ergibt zusammen mit den erforderlichen Verstärkern, Multiplexern, A/D-Wandlern und anderen elektronischen Elementen das sog. SHM-System, das außerdem eine geforderte Betriebszuverlässigkeit erfüllen muss. Die hierfür insgesamt erforderliche Lösung einer Optimierungsaufgabe kann allein über eine Simulation bzw. entsprechende Algorithmen gefunden werden. Einen Ansatz eine entsprechende Simulationsplattform aufzubauen ist nachstehend beschrieben.

Die Vorstellung des Modellierens und der Simulation kann auf verschiedenen Stufen eines Bauteilanalyseprozesses erfolgen. Es beginnt mit der Erfassung der Bauteilgeometrie und Abbildung in Form eines CAD-Modells und geht weiter über die Messung der Betriebslasten, der Ermittlung der entsprechenden Betriebslastenkollektive und der Abschätzung der sich daraus ergebenden Betriebslebensdauern. Das kann numerisch auf der Basis eines FE-Modells erfolgen, aus dem eine Schadensakkumulationsverteilung über das Bauteil ermittelt werden kann und damit die Orte bestimmt werden können, an denen unter den gegebenen Betriebslasten die entsprechenden Schädigungen auftreten werden. Dies sind dann die Orte, für die eine tolerierbare Schädigung zu ermitteln und das erforderliche SHM-System auf der Basis der Physik der ZfP durch Modellieren und Optimieren zu entwerfen ist. Verschiedene Werkzeuge eines solchen Simulations- und Optimierungsprozesses sind in [13,16] zu finden.

Simulationsverfahren

Im Bereich des SHM wird seit Jahren in vielfältiger Weise das Prinzip der geführten Wellen verfolgt, das den Fall der Lamb-Wellen mit einschließt. Als Folge ist eine Vielzahl an Berechnungsmodellen und Beispielen in der Literatur für isotrope und anisotrope Strukturen vorgestellt worden, so z.B. in [1, 4, 6, 7, 9, 10, 16, 17]. Die praktische Anwendbarkeit der meisten Beispiele ist allerdings beschränkt, weil dort vielfach nur einfach geformte Strukturen und/oder künstlich eingebrachte Schäden behandelt werden. Um geschädigte Bauteilstrukturen zu simulieren gibt es verschiedene numerische Werkzeuge wie die Finite-Elemente-Methode (FEM), die Finite-Differenzen-Methode (FDM), die Elastic Finite Integration Technique (EFIT) oder die spektrale FEM (SFEM) zur Modellierung von Lamb-Wellen. Mit Hilfe dieser Werkzeuge lassen sich prinzipiell SHM-Systeme optimieren. Xu et al. haben z.B. die Anwendbarkeit der FEM und FDM für die Strukturüberwachung von Plattenstrukturen nachgewiesen [4, 16]. Die erfolgreiche Anwendung von SFEM insbesondere auch für SHM wird von Gopalakrishnan et al. [13,14] und Ostachowicz et al. [17] gezeigt. Die 3D Modellierung von Volumenwellen mit EFIT wurde von Chinta et al. untersucht und validiert [11,12]. Was bei den klassischen FEM-basierten Verfahren auffällt und was wohl auch der Grund ist, dass sich die Beispiele auf einfache Bauteilstrukturen beschränken ist der hohe numeri-

sche und damit zeitliche Aufwand für die Simulation. Dies gilt insbesondere für die Betrachtung der höheren Frequenzen, die erforderlich sind, wenn kleinere Schäden betrachtet werden sollen. Um dieses Problem des Rechenaufwands zu umgehen bieten sich Hybridverfahren an. Solche Verfahren setzen sich aus analytischen Lösungen einerseits und numerischen Lösungen andererseits zusammen, wie es beispielhaft in Bild 1 gezeigt wird. So verwendet das Simulationswerkzeug CIVA der Fa. EXTENDE eine mit ATHENA 2D bezeichnete hybride Funktion, die z.B. ein halb analytisch formuliertes ray tracing mit einem FEM-Modell kombiniert. Weitere Anwendungsbeispiele von ATHENA-2D für komplexe Ultraschallfragestellungen sind in [3, 8] beschrieben.



FEM- Finite Element Method **FDM**- Finite Difference Method **EFIT**- Elastic Finite Integration Technique **BEM**- Boundary Element Method **GTOD**- Geometrical Theory of Diffraction **CAFA**-Combined Analytical Finite element Approach **WFR**-Waveform Revealer **LISA**- Local Interaction Simulation Approach

Bild 1 Beispiele betrachteter analytischer, numerischer und hybrider Verfahren

Untersuchte Probengeometrien

Im Rahmen des derzeit laufenden deutsch-indischen Projekts IN-DEUS wird eine Plattform zur Simulation von auf Ultraschall basierten SHM-Lösungen aufgebaut. Dabei werden zwei Bauteile mit unterschiedlich geometrischer Komplexität betrachtet. Das eine ist ein Aluminiumblech mit den Abmessungen 112 x 600 x 1.4 mm, das mit drei Lochbohrungen versehen und in Bild 2 dargestellt ist. Die Kennwerte des Werkstoffs betragen:

Dichte Kg/m ³	E Modul (GPa)	Poisson Zahl	Grade
2700	69	0.33	6063-T83

Das Eingangssignale von 300 kHz folgt der Funktion:

$$x(t) = P_0 \sin(\omega t) \left(\sin\left(\frac{\omega t}{10}\right) \right)^2, \quad t < \frac{10\pi}{\omega}$$

Zwischen den beiden rechten Bohrungen soll ein Ermüdungsriß entstehen können, den es mit geführten Wellen zu detektieren gilt. Dabei werden die geführten Wellen über aufgeklebte kreisrunde piezoelektrische Wandler eingebracht. Hier sind Anzahl und Ort der Wandler entscheidend. Diese sind nun aus der Optimierungsaufgabe heraus zu ermitteln.

Das andere Bauteil ist ein versteiftes Blech, wie es typischerweise in Flugzeugstrukturen verbaut wird und das in Bild 4 rechts dargestellt ist. Die Behandlung von Bauteilen mit noch höherer Komplexität ist zum Nachweis der Simulationsplattform im weiteren Verlauf des IN-DEUS-Projekts vorgesehen.

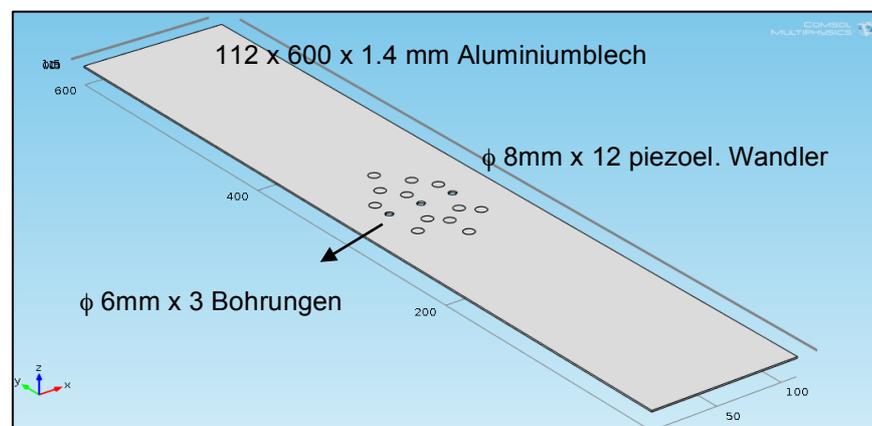


Bild 2 Aluminiumblech mit Wählern

FEM COMSOL Modell

Die Simulation geführter Wellen wurde mit dem Modul *Structural Mechanics* in COMSOL erreicht. Das FE-Netz für dieses Modell kann Bild 3 entnommen werden. Dabei sind die Punkte auf der linken Seite der Geometrie festgelegt. Zur Simulation der Wandler werden Randlasten benutzt. Die Minimale Elementlänge (L) ist 2.1mm, wobei im Fall der 2D-Simulation ein *Free Tetragonal Mesh* oder *Free Triangular Mesh* benutzt wird. Für die minimalen Zeitschritte wird das Courant Friedrichs Lewy (CFL) Kriterium als notwendige Stabilitätsbedingung zu den partiellen Differentialgleichungen herangezogen. Die minimalen Zeitschritte sind über die Elementlänge (L)/ C_p definiert, wobei L =Wellenlänge/12 und C_p die Phasengeschwindigkeit sind. Damit ergibt sich ein Minimalzeitschritt für das angesprochene Problem von 1×10^{-6} Sekunden und ein L ist 2.1 mm lang.

Analyse der Schädigungswahrscheinlichkeit

Im Rahmen der hier betrachteten Bauteilanalysen ist es wesentlich zu erfahren wo die Orte der höchsten Schadensakkumulation liegen. Bild 4 zeigt dies für die gelochte Scheibe als auch für ein versteiftes Panel, wobei dieses in einem angerissenen Zustand betrachtet wird. Im Fall der gelochten Scheibe sind die Orte höchster Schadensakkumulation die Löcher als Kerbe selbst während im Fall des angerissenen Panels die

Risspitzen die Orte des besonderen Interesses sind. Diese Orte gilt es also mit dem SHM-System zuverlässig zu erkennen.

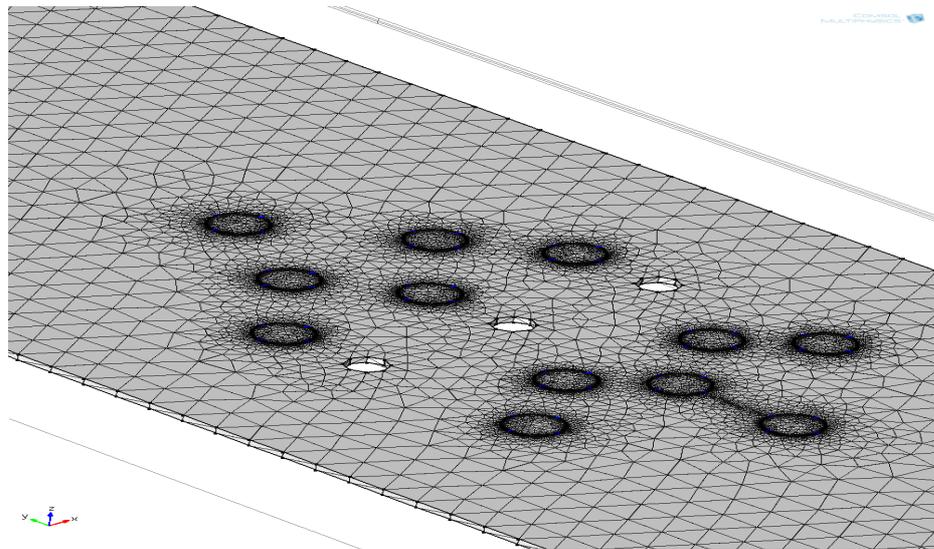


Bild 3 FE-Netz für Scheibe mit Bohrungen

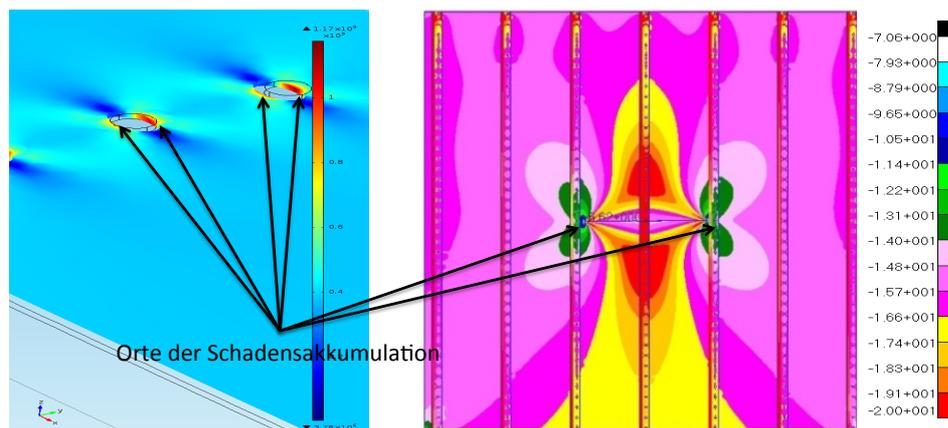


Bild 4 Verteilung der Schädigungswahrscheinlichkeit

Schadensdetektion

Geführte Wellen breiten sich in Bauteilstrukturen vielfach in einer Form aus, bei der die Interpretation des gemessenen Signals schwierig wird. Die Komplexität eines solchen Signals kann ignoriert werden, wenn dieses wiederholt unter gleichen Bedingungen erzeugt und einem Bauteilzustand (z.B. ungeschädigt) zugeordnet werden kann. Es bildet also sozusagen den Referenzzustand des ungeschädigten Zustands. Tritt nun ein Schaden im Bauteil auf so verändert sich auch die Ausbreitung der geführten Wellen denn es tritt ja ein veränderter Zustand auf. Diese Zustandsänderung kann über die Differenzbildung der beiden Zustände (ungeschädigt und geschädigt) erfasst werden. Bild 5 zeigt die Wellenausbreitung in der gelochten Scheibe, einerseits für die Scheibe ohne Riss (obere Bilderreihe) und für die Scheibe mit Riss (untere Bilderreihe) zu verschiedenen Zeitpunkten. Die geführten Wellen wurden von drei Wandlern unterhalb der Lochbohrungen phasengleich erzeugt. Bild 6 zeigt das Differenzbild zwischen dem ungeschädigten und geschädigten Zustand zu den drei betrachteten Zeitpunkten. Dieses darf als Indikator der Zustandsänderung interpretiert werden. Es zeigt also an, an welchen Orten und zu welcher Zeit für die gegebene Konfiguration an aktorischen

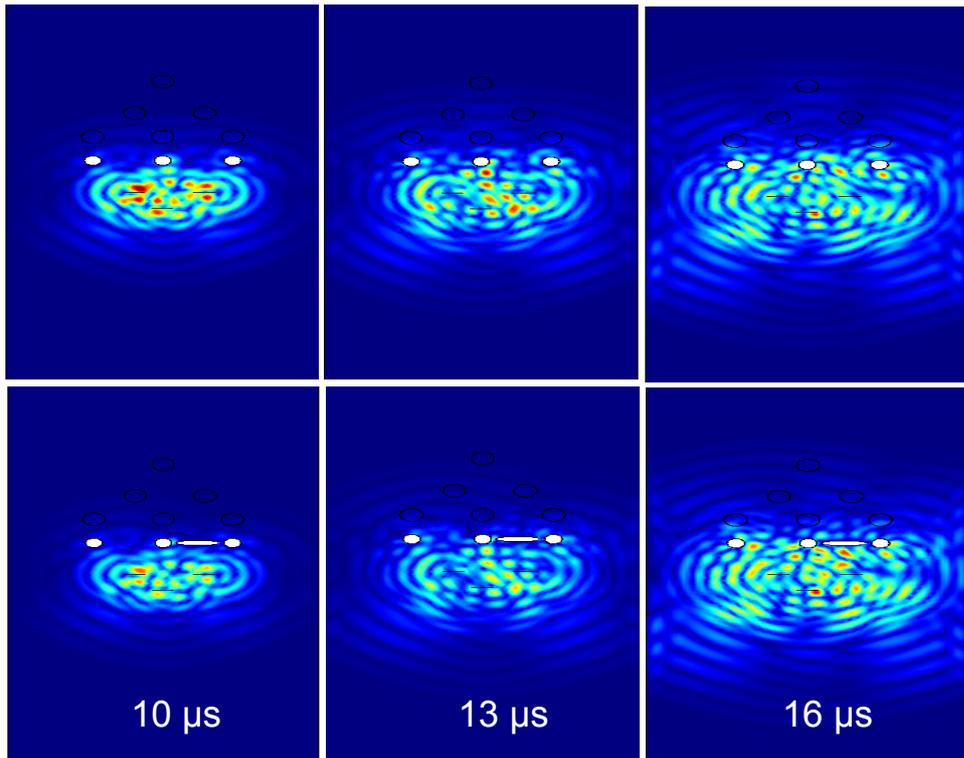


Bild 5 Simulation geführter Wellen ausgehend von drei Aktoren für 3-Lochscheibe ohne (obere Reihe) und mit Riss (untere Reihe) zu verschiedenen Zeitpunkten der Wellenausbreitung durchgeführt mit FEM COMSOL

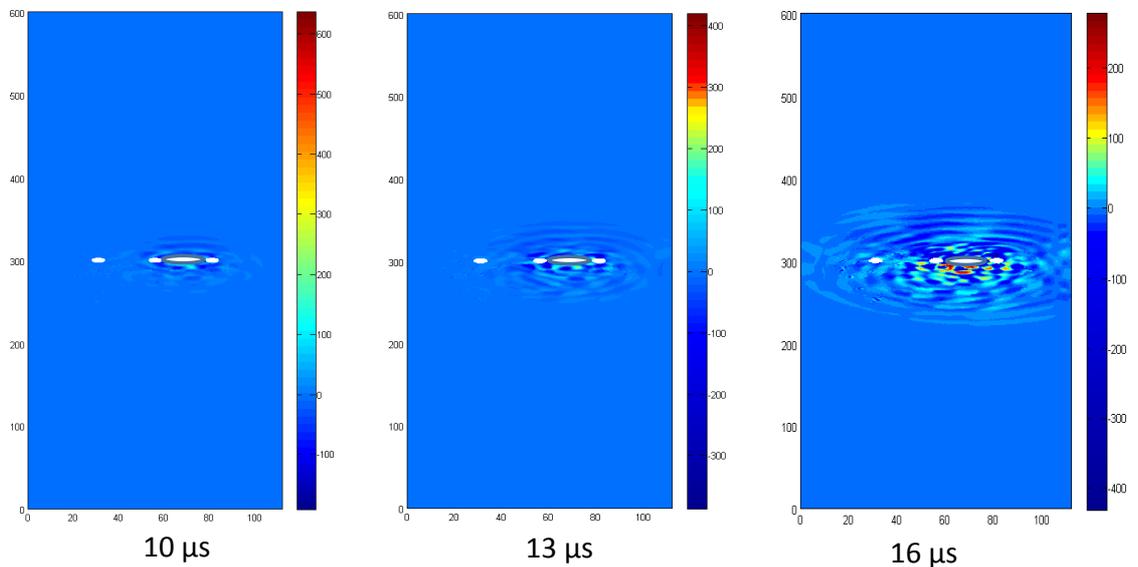


Bild 6 Differenzsignal bei Blech mit 3-Lochbohrung und drei Wandlern in Reihe unterhalb der Bohrung

Wandlern sensorische Wandler zu platzieren sind, die die durch die Zustandsänderung bedingte Signaländerung möglichst gut zu erfassen vermögen. Solche Analysen können nun dahingehend erweitert werden, dass z.B. die Form der Eingangssignale, die Anzahl und der Ort der aktorischen Wandler variiert wird. Damit lässt sich das Optimum der Signalausbeute für eine im Sinne einer Schadenstoleranz zu erfassenden zuverlässigen Zustandsänderung (z.B. einer zulässigen Risslänge) ermitteln und die Lage und ggf. auch Form der zu verwendenden Sensoren erfassen. Darüber hinaus können

die bei den Sensoren ankommenden Signale besser interpretiert und ggf. Zeitfenster für die Signalauswertung bestimmt werden, die es ermöglichen, einen Schädigungszustand noch zutreffender zu erfassen.

Simulationsplattform

Die Durchführung der zuvor gezeigten Simulationen ist mit einem hohen Zeitaufwand pro Simulation verbunden (Rechenzeit im Stundenbereich). Die konventionellen Möglichkeiten der Simulation eignen sich daher nur bedingt für die gewünschte Optimierungsaufgabe. Für eine schnellere Simulation und damit Analyse bedarf es daher hybrider Verfahren z.B. in der Form, dass das Ray Tracing eines bestimmten analysierten Bereichs des betrachteten Bauteils mit Lösungen spektraler finiter Elemente gekoppelt werden [5,15]. Diese spektralen finiten Elemente haben inerte Eigenschaften hinsichtlich z.B. Anisotropie und Fehlerkonfigurationen, die den Simulationsprozess so weit beschleunigen, dass quasi komplette Bildsequenzen und damit Animationsfilme von Schädigungsprozessen in kurzer Zeit erstellt werden können. Damit kann an den Orten hoher Schadensakkumulation selbst bei Bauteilen komplexer Geometrie eine Auflösung des FE-Netzes kleiner als die Wellenlänge erreicht werden. Das Ray Tracing kann von einer benachbarten globalen Form in das Netz übertragen werden. Auch ist die Modellierung von Reflektionen und Transmissionen an Grenzflächen und Streuern unter Verwendung analytischer Funktionen möglich und die Effekte der Energieausbreitung linearer viskoelastischer Dissipationen und frequenzabhängiger dispersive Effekte einer jeden Wellenmode wird ermöglicht. Dies wird in dem derzeit laufenden Projekt IN-DEUS erstellt und wird es ermöglichen eine entsprechende Simulationsplattform aufzubauen, so wie sie schematisch in Bild 7 dargestellt ist und eine komplette Simulation eines Bauteillebenszyklusprozesses ermöglicht.

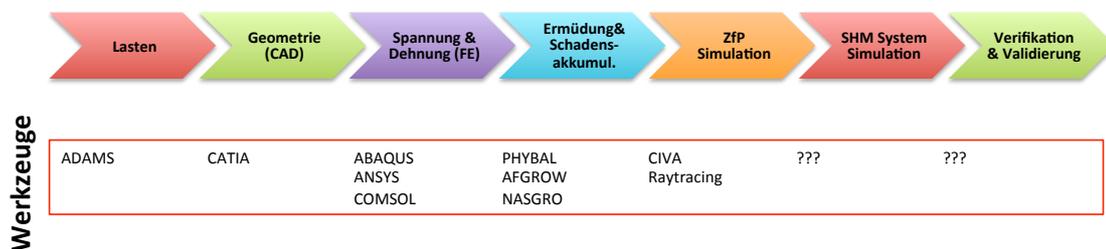


Bild 7 Prozesskette der aufzubauenden Simulationsplattform

Schlussfolgerungen

Die Simulation ist ein unerlässliches Werkzeug zur Entwicklung von SHM-Systemen. Nur so ist es möglich SHM-Systeme zu entwerfen, die ein vorgegebenes tolerierbares Schadenskriterium zuverlässig erkennen. Solche Simulationen müssen kurzfristig durchführbar sein und somit wenig Rechenzeit erfordern, was mit der hier dargestellten Simulationsplattform ermöglicht werden soll. Wesentliche Elemente sind die Bestimmung von Differenzsignalen zwischen ungeschädigtem und geschädigtem Zustand und die Einführung von hybriden Simulationsverfahren unter Verwendung spektraler finiter Elemente. Nur über einen solchen Weg wird es möglich sein, SHM-Systeme für beliebige Bauteile zuverlässig und damit vielversprechend zu konfigurieren, die dann entsprechend in Experimenten verifiziert und validiert werden können, bevor sie eines Tages mal in den Einsatz gehen können.

Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten sind Bestandteil des laufenden vom BMBF geförderten und über IGSTC organisierten deutsch-indischen Forschungsprojekts *Integration of Non-Destructive Evaluation based Ultrasonic Simulation IN-DEUS* (FKZ 01DQ12092A/C), wo für die finanzielle und ideelle Unterstützung gedankt sei.

Referenzen

- [1] B. Ghose, K. Balasubramaniam et al, "COMSOL based 2D FEM model for ultrasonic guided wave propagation in symmetrically delaminated unidirectional multilayered composite structures", *Proceedings of the national seminar and exhibition on Nondestructive evaluation* (2011).6
- [2] C. Boller (Editor), F. K Chang (Editor), F. Yozo (Editor), "Encyclopedia of Structural Health Monitoring" Wiley; 1 edition, 2009
- [3] Civa 11a Simulation software for NDT from EXTENDE , "http://www.extende.com.
- [4] H. Xu, C. Xu, X. Li, L. Wang, "Study on single mode Lamb wave interaction with defect of plate by finite element model", *Procedia Engineering*, Vol.15 , pp 5067-5072 (2011).
- [5] J.A. Ogilvy, "An iterative ray tracing model for ultrasonic nondestructive testing", *NDT& E International* Vol.25, Number 1, (1992).32
- [6] L. W. Schmerr, "Ultrasonic NDE systems, models and measurements", *Springer*, (2007) 38^y
- [7] L. W. Schmerr, Jr,"Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation: A modelling approach", Springer science & Business media Newyork, (1998) 40
- [8] M. Darmon, S. Chatillon, S. Mahaut, P. Calmon, L.J. Fradkin and V. Zernov, "Recent advances in semi-analytical scattering models for NDT simulation", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.269 (2011).48
- [9] M. Gresil, V. Giurgiutiu, "Time-domain hybrid global-local concept for guided wave propagation with piezoelectric wafer active sensor", *Journal of Intelligent Material systems and structures*, online <http://www.jim.sagepub.com> Vol. May Issue (2013).
- [10] N. Hu, H. Fukunaga, M. Kameyama, D. Roy Mahapatra, S. Gopalakrishnan, "Analysis of Wave Propagation in Beams With Transverse and Lateral Cracks Using a Weakly Formulated Spectral Method", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 74, pp 119-127(2007).50
- [11] P.K. Chinta, P. Mayer, K. Langenberg, "Three dimensional elastic wave modeling in austenitic steel welds using Elastodynamic Finite Integration Technique (EFIT)", *Proceedings in 18th World conference on Nondestructive testing* , Durban (2012).
- [12] R. Hannemann, "Modelling and imaging of Elastodynamic wave fields in Inhomogeneous anisotropic media- An object oriented approach (dissertation)" *University of Kassel*, Kassel Germany (2001).
- [13] S. Gopalakrishnan, "Book on Computational Techniques in SHM" *Springer Series* (2011).
- [14] S. Gopalakrishnan, A. Chakraborty, D.Mahapatra Roy, "Spectral Finite Element Method", *Wave Propagation, Diagnostics and Control in Anisotropic and Inhomogeneous Structures*", Springer, London, 2008. 64
- [15] S.R. Kolkoori, M.U. Rahman, P.K. Chinta, M. Kreutzbruck, M. Rethmeier, J. Prager, "Ultrasonic field profile evaluation in acoustically inhomogeneous anisotropic materials using 2D ray tracing model: Numerical and experimental comparison", *Ultrasonics*, vol.53 pp 396-411 (2013).67
- [16] T. Stepinski, T. Uhl and W. Staszewski, "Advanced structural damage detection: From theory to engineering applications", *John Wiley & Sons Ltd.*,(2013). 70
- [17] W. Ostachowicz, P. Kudela, M.Krawczuk, A. Zak, "Guided waves in structures for SHM: The Time-Domain Spectral Element Method", Wiley (2012).79
- [18] Y. Shen, V. Giurgiutiu, "Predictive modeling of Nonlinear wave propagation for structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors", *Journal of intelligent materials and smart structures*, Vol.25 (4) pp 506-520 (2013).
- [19] Y. Shen, V. Giurgiutiu, "WaveformRevealer- An Analytical framework and predictive tool for the simulation of multimodal guided wave propagation and interaction with damage", *Structural health monitoring- An International Journal*, Vol.13 (5), pp 491-511 (2014).
- [20] Y. Shen, V. Giurgiutiu, "WFR-2D: An Analytical model for PWAS generated 2D ultrasonic guided wave propagation", *Proceeding in SPIE conference* (2014).
- [21] Z. Chang, A. Mal, "A global-local method for wave propagation across a lap joint", *Numerical methods in structural mechanics J. W. Ju (Editor)*, Vol. AMD 204, pp 1-11(1995). 86
- [22] A. Srivatsava et al, "Quantitative structural health monitoring by ultrasonic guided waves ", *Journal of Engineering mechanics* Vol.136 (8) pp 937-944 (2010).