

Interaktionen von Ultraschall-Longitudinal- und von Lamb-Wellen an Fehlstellen in CFK-Bauteilen

Wolfgang HILLGER, Artur SZEWIECZEK, DLR –FA, Braunschweig

Kurzfassung. Bauteile aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) zeichnen sich durch hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit aus und werden deshalb zunehmend in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Der Boeing 787 und der Airbus A 350 werden nahezu vollständig aus CFK gefertigt. Da sich bei einer sorgfältigen Optimierung der Prüfparameter alle relevanten Fehlstellen feststellen lassen, hat sich die (bildgebende) Ultraschallprüftechnik als zerstörungsfreies Prüfverfahren sowohl nach der Fertigung als auch im späteren Betrieb (in-service) bewährt.

Die Ultraschallprüfung mit Longitudinalwellen arbeitet nahezu punktförmig, deshalb ist bei einer flächigen Prüfung ein (zeitaufwendiges) Scannen des Bauteils erforderlich. Im Rahmen von SHM (Structural Health Monitoring) untersuchen zahlreiche Autoren, ob mit fest installierten Piezoelementen eine großflächige Prüfung mit Lamb-Wellen möglich ist. Diese Prüfung könnte dann unabhängig von Inspektionen zu jeder Zeit per Knopfdruck vorgenommen werden. Allerdings sind die Interaktionen dieser Lamb-Wellen mit Fehlstellen weit aus komplexer als die Interaktionen der Longitudinalwellen „klassischer“ Ultraschallprüftechnik.

Im Institut FA im DLR Braunschweig wird die berührungslose bildgebende Ultraschallprüftechnik nicht nur zur Prüfung von CFK-Bauteilen eingesetzt, sondern auch zur Visualisierung der Lamb-Wellenausbreitung und der Interaktion mit Fehlstellen. Da beide Verfahren mit einem System durchgeführt werden können, ist ein unmittelbarer Vergleich der Interaktionen mit beiden Wellenmoden möglich. An CFK-Proben und an komplexen CFK-Bauteilen werden die Ergebnisse präsentiert und diskutiert.

1. Einführung

Struktural Health Monitoring (Zustandsüberwachung) mit Geführten Wellen verspricht ein einfaches Verfahren zur Prüfung von Bauteilen zu werden [1]. Im Gegensatz zu den bisherigen Zerstörungsfreien Prüfverfahren, wo die Sensoren und Prüfsysteme zu dem zu untersuchenden Bauteil gebracht werden, sind diese bei der Zustandsüberwachung fest mit dem Bauteil verbunden. Als Sensoren werden häufig piezoelektrische Wandler benutzt, die mit kleiner Ansteuerleistung eine großflächige Wellenausbreitung erlauben [2]. Mit einem Netz von Piezos lassen sich so Geführte Wellen senden und empfangen. Diese Wellen breiten sich großflächig aus und reagieren mit Fehlstellen [3]. Allerdings sind diese Wellen dispersiv, d. h. die Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind frequenzabhängig. Ferner treten bei einer Frequenz mindestens zwei Moden auf, ein symmetrischer und ein asymmetrischer. Die Interaktionen mit Fehlstellen beschränken sich nicht nur in Reflexionen, sondern es können auch Modenumwandlungen z. B. von S_0 auf A_0 auftreten. Die Empfangssignale sind deshalb sehr komplex und lassen sich nicht so einfach interpretieren wie die der „klassischen“ Ultraschallprüftechniken. Im Rahmen dieses

Berichts werden die beiden Verfahren in Bezug auf Impact- Detektion verglichen und die Wellenausbreitung untersucht.

2. Untersuchungen an CFK-Testkörpern

2.1 Testkörper

Die untersuchten CFK-Testkörper mit einem quasi-isotropen Aufbau haben eine Dicke von 2 mm und Abmessungen von 360 mm x 100 mm. Sie wurden aus einer Platte ausgeschnitten. An den Enden waren GFK-Platten zur Einspannung für nachträglich durchgeführte dynamische Belastungen in Prüfmaschinen angebracht. Die Testkörper wurden mit unterschiedlichen Impact-Energien (0; 5; 10; 15 und 20 Joule) beaufschlagt.

Nach dem Einbringen der Impacts und nach den Ultraschallprüfungen wurden diagonal an jedem Testkörper zwei piezoelektrische Elemente appliziert und die Klebung mit Hilfe einer Impedanzmessung der PZTs überprüft [4, 5].

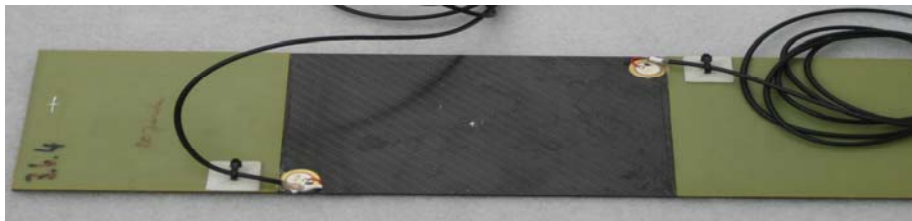


Abbildung 1. CFK-Testkörper mit applizierten piezoelektrischen Elementen

2.2 Impact Detektion mit Bildgebender Ultraschallprüftechnik

Die bildgebende Ultraschallprüftechnik ist ein bewährtes Verfahren zur Anzeige von Impact-Schäden in CFK-Bauteilen [6]. Die akustische Ankopplung des Prüfkopfes erfolgt meist über Wasser. Abb. 2A stellt ein A-Bild mit dem Eintritts- und dem Rückwandecho dar. Außerdem sind die Zeitblenden jeweils für das Eintritts-, Zwischen- und das Rückwandecho dargestellt. Es wurde ein breitbandiger und fokussierter 5 MHz Prüfkopf verwendet. Die Untersuchungen fanden in Tauchtechnik statt. Abb. 2 B stellt das C- Bild (Rückwandecho) des Testkörpers mit 20 Joule Impact dar. Die Farbpalette wurde so gewählt, dass die „natürliche“ Inhomogenität des Testkörpers in Grauwerten und die Fehlstellengebiete in Farben dargestellt werden. Die horizontale Echodynamik zeigt einen maximalen Amplitudenabfall von 28 dB.

Abb. 3D stellt die aus den C-Bildern gemessene Fehlerfläche in Abhängigkeit der Impact-Energie dar. Es gibt einen Bereich von 10 bis 20 Joule, wo die Zunahme nahezu proportional erfolgt. Bei höherer Belastung erfolgt eine so starke Schädigung, so dass ein Durchschlag erfolgt.

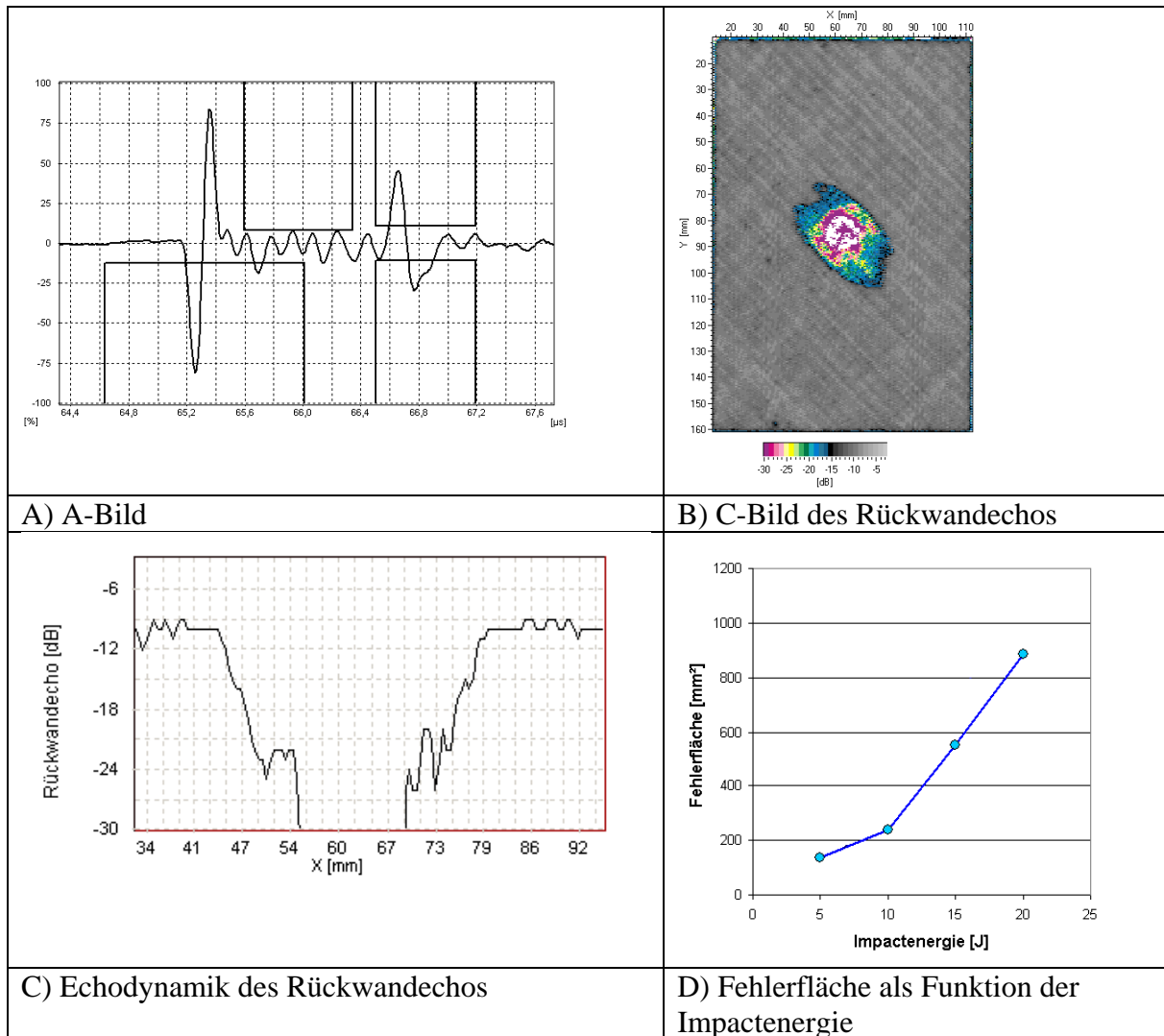


Abbildung 2. Ultraschallprüfung von CFK-Testkörpern

2.3 Impact Detektion mit Lamb-Wellen

Zur Prüfung mit Geführten Wellen wurde eine Burst-Anregung mit zwei Impulsen und einer Mittenfrequenz von 41.3 kHz eingesetzt. Die Oberwellen wurden mit Hard- und Software-Filtern unterdrückt, so dass nur ein 20,5 kHz breites Frequenzband ausgewertet wird.

Die A-Bilder zeigen vier unterschiedliche Amplitudenbereiche, der erste beginnt bei 50 μ s, der zweite bei 206, der dritte bei 380 und der vierte bei 530 μ s. Das Signal im ersten Bereich ändert sich bei den Impacten nicht, deshalb wurden nur die drei anderen mit Zeitblenden ausgewertet. Abbildung 4 zeigt die gemessenen Amplituden in den unterschiedlichen Blenden in Abhängigkeit der Impact-Energie. Blende 2 und 3 sind mit dem Schwellwert von Blende 1 („interface“-) getriggert. Die Amplitude in Blende 1 ist nahezu konstant und deshalb unabhängig von der Impact – Energie. Dieses Signal kann als Referenz herangezogen werden. Das Signal in der zweiten Blende ändert sich deutlich in Abhängigkeit der Impact-Energie. Die Amplitude sinkt von 55% (0J) auf 25% (20J). Die Amplitude in Blende 3 ändert sich dagegen von 51% auf 9%.

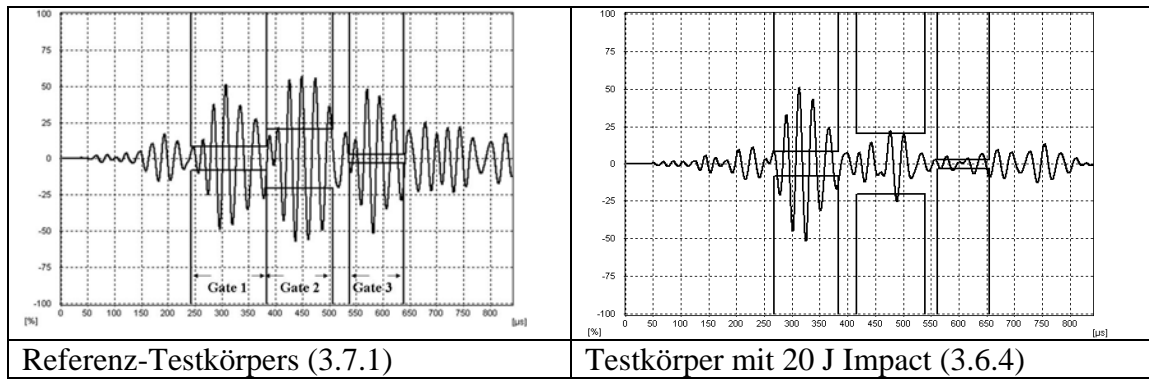


Abbildung 3. A- Bilder bei der Prüfung mit geführten Wellen

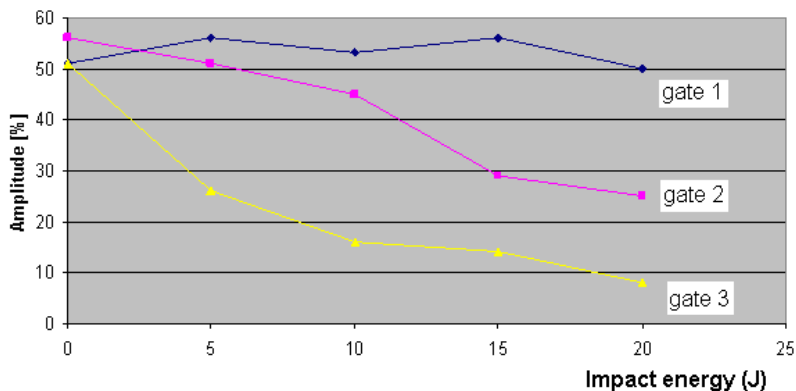


Abbildung 4. Amplituden in drei unterschiedlichen Blenden in Abhängigkeit der Impact-Energie

Der Grund hierfür sind Interferenzen zwischen der sich direkt ausbreitenden Welle und den Randreflexionen sowie den komplexen Interaktionen an den Fehlstellen.

3. Aufnahme und Auswertung der Wellenfelder

Um Informationen über die Ausbreitung Geführter Wellen in Bauteilen zu erhalten, verwenden viele Autoren ein Scanning-Laservibrometer [7]. Im DLR in Braunschweig werden die Möglichkeiten der bildgebenden Ultraschallprüftechnik auch für Geführte Wellen genutzt, indem das Wellenfeld mit einem über Luft angekoppelten Sensor aufgenommen und als 3D-Datensatz gespeichert wird [8, 9]. Dafür wird ein am Bauteil applizierter Piezo an jedem Punkt des Rasterfeldes mit einem Burst-Signal angeregt. Der Volumendatensatz enthält alle Informationen über die unterschiedlichen Wellenmoden, deren Ausbreitung und über Interaktionen mit Fehlstellen und Reflexionen an Bauteilrändern. Beispielhaft zeigt Abb. 5 einen Schnappschuss aus einem Ausbreitungsvideo, in dem sich unten links der Aktuator befindet und in der Mitte die Delamination. Die Welle wird durch den Schaden verzögert und geschwächt. Das rechte Bild zeigt das C-Bild der Wellenausbreitung, aus dem die Schwächung der Welle durch den Impact hervorgeht. Um Reflexionen an den Rändern zu unterdrücken, wurden die Ränder des Testkörpers mit Plasteline® akustisch gedämpft.

Zurzeit wird eine Auswertesoftware entwickelt, mit der unterschiedliche Moden aus B- Bildern automatisch detektiert werden können.

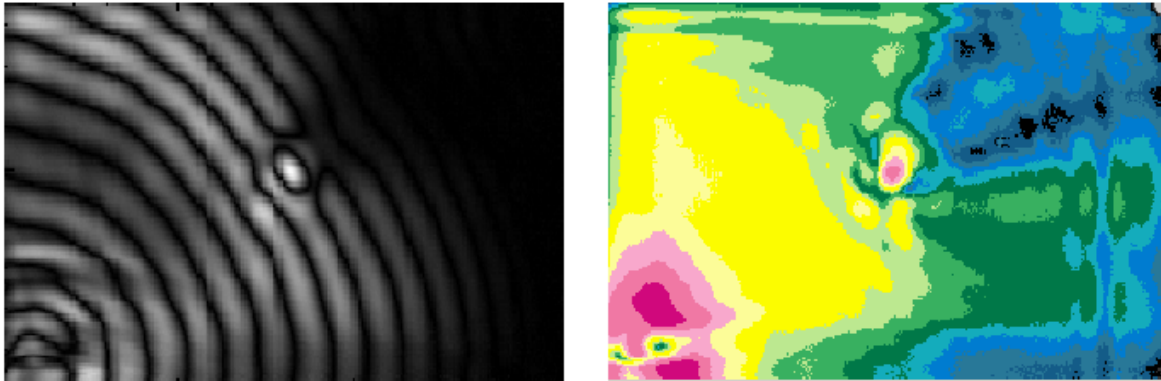


Abbildung 5. Lamb-Wellenausbreitung in den CFK-Testkörpern, links: Schnappschuss aus Ausbreitungs-Video, rechts: Lamb-Wellen-C-Bild

4. Zusammenfassung

Die Ultraschallprüftechnik ist ein zuverlässiges Verfahren zur Detektion von Impact-Schäden in CFK-Bauteilen. Dabei ist die Impact-Energie für den Effekt der Amplitudenabnahme des Rückwandechos ab einer Energie von etwa 5 Joule unabhängig. Das liegt daran, dass Delaminationen flächige Trennungen senkrecht zum Schalldurchgang darstellen, die durch einen Luftspalt nahezu ideale Reflektoren darstellen und Rückwandechoabsenkungen von über 20dB verursachen. Bei einer Prüffrequenz von 5 MHz beträgt die Longitudinal-Wellenlänge etwa 0,6 mm, so dass Fehlergrößen ab 1 mm Größenordnungen sicher detektiert werden können. Nur die Größe der detektierten Fläche ist abhängig von der Impact-Energie.

Bei der Prüfung mit Geführten Wellen erhält man durch das Auftreten mehrerer Moden und von Reflexionen am Rand der Testkörper sehr komplexe Empfangssignale. Es zeigte sich, dass eine Amplitudenauswertung in unterschiedlichen Blenden dennoch in der Lage ist, diese Art von Schäden durch einen Amplitudenabfall zu detektieren, der im Bereich von 5 bis 20 Joule nahezu proportional zur Impactenergie ist.

Während die US-Prüftechnik bei einem Impact Amplitudenunterschiede >20 dB liefert, betragen die Unterschiede bei Lamb-Wellen unter günstigsten Bedingungen (Abstand Sender-Empfänger 18 cm) weniger als 15 dB bei einem 20J-Impact.

Um Informationen über die Wellenausbreitung in den CFK-Testkörpern zu erhalten, wurde ein 3D-Datensatz aufgenommen. Dafür wurde ein applizierter piezoelektrischer Wandler als Sender benutzt und an jedem Rasterpunkt des Scan-Bereichs mit einem Burst-Signal angeregt. Als Empfänger diente ein kapazitiver Sensor, der über Luft angekoppelt war. Der 3D-Datensatz enthält alle Informationen über die Wellenmoden und deren Ausbreitung. Besonders eindrucksvoll sind hieraus berechnete Videos, die die Ausbreitung der Wellen und deren Interaktionen anzeigen. Zurzeit wird die Software mit Signalauswertemethoden erweitert, so dass auch automatische Modenerkennungen möglich sind. Ferner werden Tools erarbeitet, mit dem sich ein SHM-System optimieren lässt.

5. Referenzen

- [1] [Zhongqing Su, Lin Ye, Ye Lu, Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review, Laboratory of Smart Materials and Structures (LSMS), Centre for Advanced Materials Technology (CAMT), 774 Z. Su et al. / Journal of Sound and Vibration 295 (2006) 753–780
- [2] R.A. Badcock, E.A. Birt, The use of 0–3 piezocomposite embedded Lamb wave sensors for detection of damage in advanced fibre composites, *Smart Materials and Structures* 9 (2000) 291–297.
- [3] E.K. Dimitriadis, C.R. Fuller, C.A. Rogers, Piezoelectric actuators for distributed vibration excitation of thin plates, *Journal of Vibration and Acoustics* 113 (1991) 100–107.
- [4] M. Bach, C.-P. Fritzen, B. Eckstein, H. Speckmann: Self diagnostic capability of piezoelectric transducers using the electromechanical impedance, *Structural Health Monitoring 2007, Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring*, pp.1931-1938, ISBN No. 978-1-932078-71-8
- [5] S. Park, G. Park, C.-B. Yun, C. R. Farrar: Sensor self-diagnostic using a modified impedance model for active sensing-based Structural Health Monitoring, *Structural Health Monitoring 2007, Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring*, pp. 1923-1930, ISBN No. 978-1-932078-71-8
- [6] W. Hillger: Ultrasonic Testing of Composites - From laboratory Research to In-field Inspections, 15th World Conference on Non-destructive Testing, Roma (Italy) 15-21 October 2000, Conference Proc. on CD WCNDT Rom 2000
- [7] B. Köhler, M. Kehlenbach, R. Bilgram, Optical Measurement and Visualisation of Transient Ultrasonic Wave Fields, *Acoustical Imaging, Vol. 27*, Edited by W. Arnold and S. Hirsekorn, Kluwer Academic/Plenum Publishers, Dordrecht & New York, 2004, pp.315-322
- [8] W. Hillger, U. Pfeiffer. 2006. Structural Health Monitoring Using Lamb Waves, 9th European Conference on Non-Destructive Testing, Berlin, published on CD.
- [9] W. Hillger: Visualisation and Animation of the Lamb Wave Propagation in Composites, *Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring 2007*, Stanford University, Stanford, CA, September 11- 13, 2007, Vol.1, pp. 145-152.