

Matrixarrays zur bildgebenden Ultraschallprüfung am Beispiel 6 mm dicker CFK – Platten

Rainer BOEHM, Daniel BRACKROCK, Hans-Joachim MONTAG, Gerhard BREKOW
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin,
www.bam.de

Kurzfassung. Die vorgestellte Ultraschallprüftechnik kombiniert die Echosignale aus mechanischem und elektronischem Scan mit einem Matrix Phased Array Prüfkopf zur Erzeugung von Volumenbilddaten. Gegenüber konventioneller Technik werden die Empfindlichkeit, die Auflösung und das Signal-Rausch-Verhältnis substantiell verbessert.

Die Vorteile der Prüftechnik kommen besonders bei stark schwächenden und oder anisotropen Materialien wie z.B. kohlefaserverstärkten Kunststoffen CFK zur Geltung. Dies wird an Beispielen gezeigt.

Einführung

Faserverbundwerkstoffe wie kohlefaserverstärkte Kunststoffe CFK sind vergleichsweise schwer mit Ultraschall zu prüfen, weil die starke Dämpfung, der inhomogene Aufbau und die akustische Anisotropie die Wellenausbreitung behindern bzw. komplizieren. Die Folge ist, dass die Ansprüche an die Prüfung oft stark reduziert werden müssen. Die vorgestellte Prüftechnik nutzt die Möglichkeiten der räumlichen Fokussierung und des zweidimensionalen Winkelscans von Matrix Phased Array Prüfköpfen MPA in Kombination mit Echosignalüberlagerungsalgorithmen für eine substantielle Verbesserung der Auflösung und des Signal-Rausch-Verhältnisses. Sowohl bei der Ansteuerung des MPA als auch bei der Auswertung wird die Anisotropie des Werkstoffs berücksichtigt.

Das MPA wird über die Oberfläche bewegt und an einer Anzahl von Messpunkten werden zweidimensionale Winkelscans durchgeführt. Das Ergebnis sind räumliche Echohöhenverteilungen, aus denen Schnittbilder oder auch Volumendarstellungen erzeugt werden können.

Anhand von Messungen an CFK-Platten mit Flachbodenbohrungen KSR 1 und 2 sollen die Empfindlichkeit und das Auflösungsvermögen der Prüftechnik demonstriert werden. Weiterhin werden Untersuchungen an Impaktschäden gezeigt, die typischerweise bei Faserverbundwerkstoffen bei starken punktförmigen Belastungen auftreten.

1. Besonderheiten des Werkstoffs

1.1 Aufbau von CFK - Platten

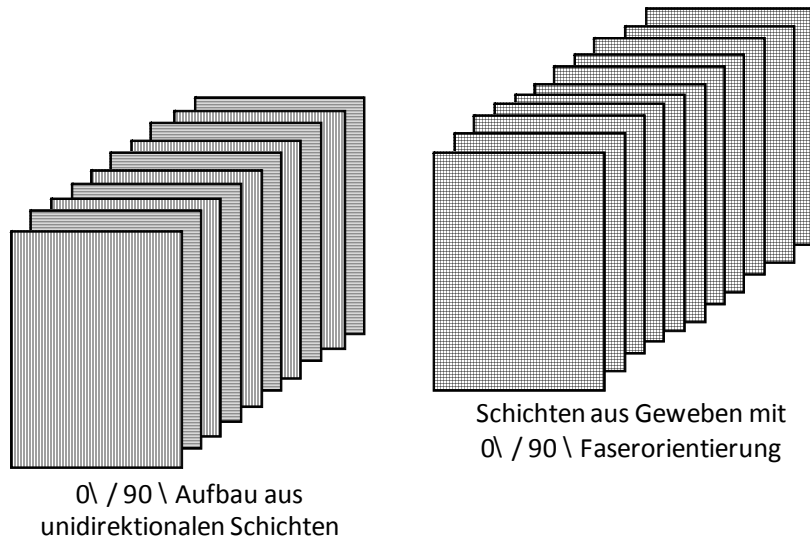


Bild 1: geschichteter Aufbau von CFK-Platten aus Prepregs

Die für die Untersuchungen verwendeten CFK-Platten sind aus Schichten harzimpregnierter unidirektionaler Gelege oder bidirektionaler Gewebe, sogenannter Prepregs, aufgebaut. In den fertigen Platten, die aus einer Anzahl von ca. 10 Schichten bestehen, liegen die Fasern absolut überwiegend in der Plattenebene und dort abwechselnd in Gelegen mit einer Orientierung von 0° und 90° zueinander oder auch in Geweben.

1.2 Die Ultraschallschwächung

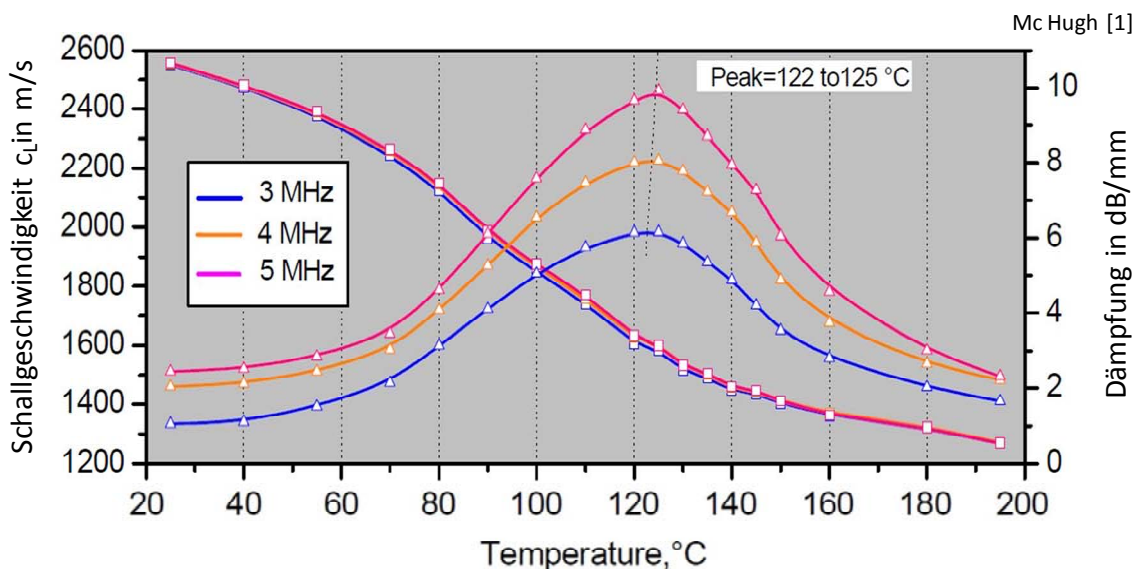
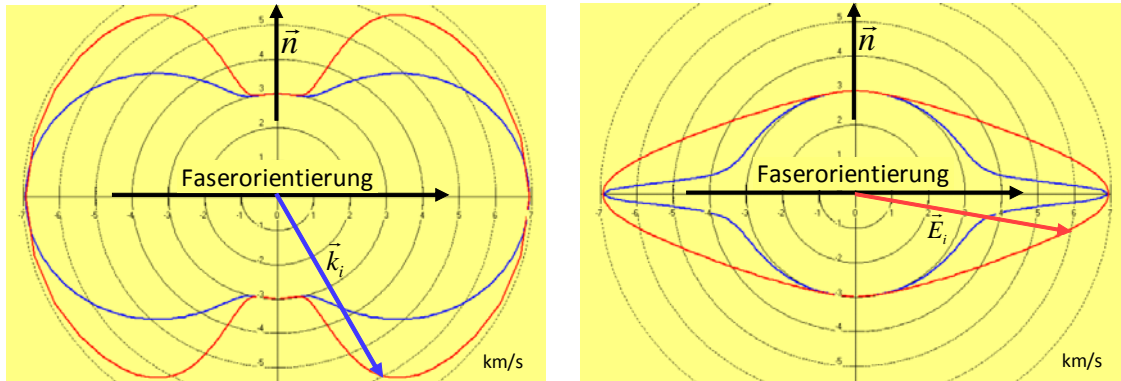


Bild 2: Ultraschalldämpfung in Epoxidharz, einem typischen Matrixmaterial

Bei üblichen Prüffrequenzen ist die Dämpfung im Matrixmaterial schon bei Zimmertemperatur in der Größenordnung von 1-2 dB/mm und damit um etwa zwei Größenordnungen größer als in Stahl. Im Verbundwerkstoff kommt es zusätzlich zur Schwächung der Echosignale durch Streuung durch den inhomogenen inneren Aufbau. Dies stellt sehr

hohe Anforderungen an die Empfindlichkeit der Prüftechnik und begrenzt die (bisher) prüfbareren Wandstärken auf wenige Zentimeter.

1.3 Die Anisotropie



$c_{ph}(\cdot), c_e(\text{Richtung des Wellenvektors})$

$c_{ph}(\cdot), c_e(\text{Richtung der Energieausbreitung})$

Bild 2: Polardiagramme der Phasen (blau)- und Energiegeschwindigkeit (rot)

Da die Dehnsteifigkeit bzw. der Elastizitätsmodul der Faser erheblich größer ist als der des Matrixmaterials, in das die Fasern eingebettet sind, ist der so aufgebaute Werkstoff mechanisch stark anisotrop, was konstruktiv gewollt ist, aber daher ist er selbstverständlich auch akustisch stark anisotrop, was die Ultraschallprüfung u.U. erheblich einschränkt.

Das elastische Verhalten des Verbundwerkstoffes wird aus mechanischen Belastungs- Dehnungsmessungen bestimmt, ohne dass der mikroskopisch inhomogene Aufbau eine Rolle spielt. Die *eine* Matrix der elastischen Konstanten, die auf diese Weise gewonnen wird, beschreibt das elastische Verhalten eines Einkristalls. Da der Faserdurchmesser viel kleiner ist als die Wellenlänge, ist diese einkristalline Beschreibung fürs Erste auch für die Schallausbreitung brauchbar. Die Struktur des Lagenaufbaus und der Gewebeschichten kann durchaus in dieselbe Größenordnung kommen wie die Wellenlängen, was im Einzelfall bedeutsam werden könnte.

Bild 2 zeigt die aus den elastischen Konstanten berechneten Phasen- und Energiegeschwindigkeiten c_{ph} und c_E von Longitudinalwellen am Beispiel eines $0^\circ/90^\circ$ - CFK - Plattenmaterials in Form von Polardiagrammen in einer Ebene, die eine Faserrichtung (z.B. 0°) und die Oberflächennormale \vec{n} der Platte enthält; links im Bild c_{ph} und c_E als Funktion der Richtung des Wellenvektors und rechts im Bild c_{ph} und c_E als Funktion der Energieausbreitungsrichtung.

Bei der Ausbreitung von (per Definition unendlich ausgedehnten) ebenen Wellen beobachtet man das Voranschreiten der Wellenflächen, der Orte gleicher Phase, mit der sogenannten Phasengeschwindigkeit in Richtung des Wellenvektors \vec{k}_i , der senkrecht auf den Wellenflächen steht; siehe die blauen Kurven in Bild 2. Ein räumlich begrenzter Wellenzug, wie er in Bild 3 skizziert ist, breitet sich im anisotropen Material als Ganzes i.Allg. nicht in Richtung des Wellenvektors aus, sondern weicht seitlich aus, ein Phänomen, das als Schallbündelablenkung bekannt ist.

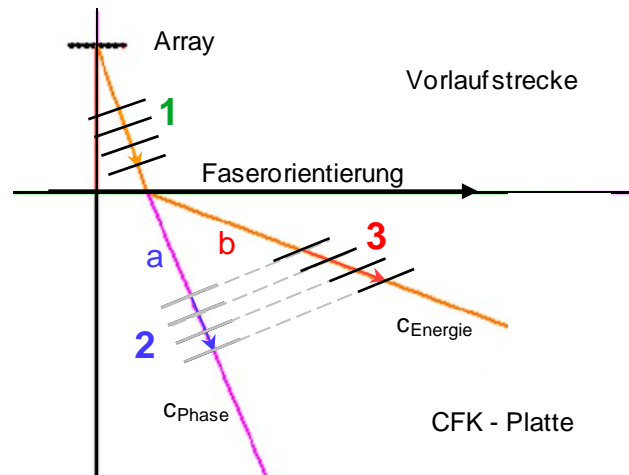


Bild 3: Schallausbreitung eines begrenzten Wellenzuges in einer CFK-Platte

Der Wellenzug **1** in Bild 3 trifft aus der Vorlaufstrecke kommend auf die Grenzfläche zum CFK und wird dort gebrochen. Das Snelliussche Brechungsgesetz bezieht sich auf die Phasengeschwindigkeiten und beschreibt die Richtung des Wellenvektors \vec{k}_i bzw. der Wellenflächen. Im isotropen Material hätte sich der Wellenzug nach einer Zeit t um die Strecke **a** bis zur Position **2** ausgebreitet. Tatsächlich breitet sich der Wellenzug in eine Richtung schräg zu \vec{k}_i aus und hat sich nach der Zeit t um die Strecke **b** bewegt. Der Wellenzug und damit auch die transportierte Energie befinden sich physikalisch dann in Position **3**.

$$c_E \geq c_{Ph}, \quad b / a = c_E / c_{Ph} = 1 / \cos(\gamma) \quad (1)$$

Die Energiegeschwindigkeit c_E ist immer größer oder gleich der Phasengeschwindigkeit c_{Ph} . Der Winkel γ in Formel (1) ist der Winkel zwischen dem Wellenvektor und der Energieausbreitungsrichtung.

2. Methode der Prüftechnik

2.1 Der Matrixgruppenstrahler

Ein Lineararray ermöglicht das Schwenken des Schallbündels in einer Ebene. Die Ergebnisse eines Winkelscans lassen sich relativ einfach in einem Schnittbild, dem bekannten Sektorscan, darstellen, in dem die laterale Auflösung durch die Schallfeldausdehnung im jeweiligen Abstand bestimmt wird und die Abstandsauflösung durch die Länge des akustischen Impulses. Ein Matrixarray ermöglicht das Schwenken des Schallbündels in zwei Ebenen und der zweidimensionale Winkelscan liefert Daten, die eine räumliche Zuordnung der Echoanzeigen erlauben. Die laterale Auflösung wird dabei durch die Schallfeldausdehnung in der jeweiligen Schwenkrichtung bestimmt und die Abstandsauflösung natürlich weiterhin durch die Länge des akustischen Impulses.

Bei Abständen innerhalb der Nahfeldlänge führt die Möglichkeit in beiden Ebenen zu fokussieren beim Matrixarray zu einem besonders großen Empfindlichkeitsgewinn gegenüber Lineararrays oder gar unfokussierten Sensoren.

Mit einem Matrixarray lassen sich also aus jeder Prüfkopfposition 3D-Bilder erzeugen, und das, soweit Fokussieren möglich und sinnvoll ist, gegenüber anderen

Sensorarten mit einer höheren Empfindlichkeit. Außerdem ist wegen des kleineren beschallten Volumens zu erwarten, dass Anzeigen aus der Struktur bzw. dem Gefüge des Werkstoffs relativ verringert werden.

2.2 Der Überlagerungsalgorithmus

Zwar erhält man wie beschrieben schon aus einer Sensorposition eine Art räumliches Bild, jedoch mit dem altbekannten Nachteil, dass Reflektoren nur aus einer Richtung angeschallt werden und die laterale Auflösung mit wachsenden Abständen schlechter wird. Durch die Überlagerung der Echosignale, die aus unterschiedlichen Richtungen empfangen werden, wird die Auflösung erheblich gesteigert.

Am bekanntesten sind die Algorithmen der „Synthetic Aperture Focussing Technique“ SAFT und für die Echotomographie [2] - [5]. In den vorgenannten Fällen sowie beim hier verwendeten Algorithmus wird der Prüfbereich in Voxel (bzw. für Schnittbilder in Pixel) diskretisiert. Wenn das an einer Sensorposition gemessene Echo vom Ort eines Voxels kommen könnte, wird dem Voxel der laufzeitrichtige Amplitudenwert des Echosignals zugeordnet bzw. mit den laufzeitrichtigen Amplitudenwerten aus anderen Sensorpositionen überlagert.

3. Prüfanordnung und Ablauf

Bild 4 zeigt den experimentellen Aufbau mit dem Steuerrechner, das COMPAS-XL Phased-Array-Gerät und den Manipulator, der den Prüfkopf auf der CFK-Platte bewegt. Das Ultraschallgerät COMPAS-XL und die Steuerungs- und Auswertesoftware wurden in der BAM entwickelt.

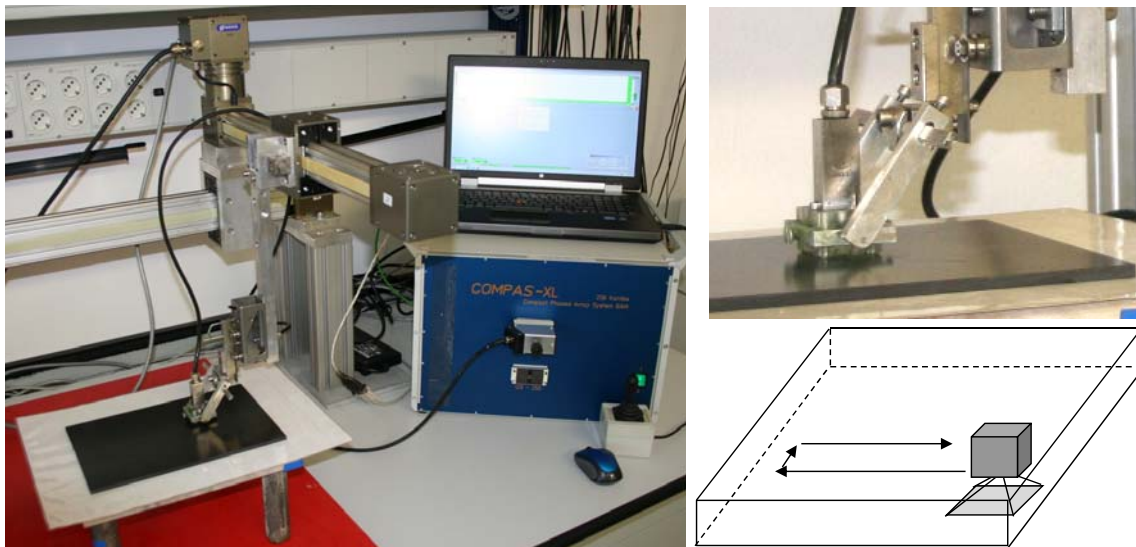


Bild 4: Laboraufbau

3.1 Prüfkopfdaten

Matrixarray 10 x 6 Elemente, $(1.2 + 0.1) \cdot (1.2 + 0.1) \text{ mm}^2$, 2.25 MHz, Vorlaufstrecke Plexiglas 20 mm, Einschallwinkel bis zu $\pm 20^\circ$ Longitudinalwelle in beiden Richtungen, $\lambda = 1.34 \text{ mm}$ bei $c = 3000 \text{ m/s}$ (senkrecht zur Faserrichtung)

3.2 Vorgehensweise

Zunächst wird mit Hilfe von Schallfeldsimulation die Größe des Blickfeldes des Matrixarrays (siehe Skizze in Bild 4 rechts unten) bestimmt, das von den Eigenschaften des Arrays und des Werkstoffs abhängt. Für den elektronischen Scan im Bereich des Blickfeldes werden im zweiten Schritt die Abfolge der Prüffunktionen festgelegt und die Steuerzeiten (Focal laws) berechnet. Hierbei sind insbesondere die Werkstoffanisotropie und die relativ lange Vorlaufstrecke zu berücksichtigen.

Bei der mechanischen Abtastung der CFK-Platte wird der Prüfkopf so bewegt, dass sich die Blickfelder aus nebeneinanderliegenden Einschallpositionen teilweise überdecken. Dies ermöglicht bei der Auswertung die Überlagerung der Echosignale.

Im letzten Schritt werden aus den Messdaten mit Hilfe des Auswerte- bzw. Überlagerungsalgorithmus die Bilddaten berechnet und in das 3D-Voxelfeld eingetragen. Hiermit ist dann die Darstellung von Volumenansichten und beliebigen Schnittbildern möglich.

4. Ergebnisse

4.1 Beispiel 1, Kreisscheibenreflektoren

Bild 5 zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse an einer 6 mm dicken CFK-Platte aus unidirektionalen Schichten $0^\circ/90^\circ$ unter Verwendung des Matrixarrays, links im Bild und eines für den oberflächennahen Bereich an sich geeigneten üblichen SE-Prüfkopfes, rechts im Bild. Die Skizze unten im Bild zeigt die Lage der Kreisscheibenreflektoren KSR 1 und 2, die in einer Tiefe von 3 und 4 mm liegen. Die C-Bilder zeigen eine Draufsicht in einer Tiefe von 3 mm. Die B-Bilder zeigen die Schnittebene, in der alle vier Reflektoren liegen.

Wie vor allem im B-Bild (rechts) zu erkennen, ist man mit dem SE-Prüfkopf an der Nachweisgrenze für die KSR 2 Reflektoren, da die quasi Gefügeanzeigen aus der Struktur des Verbundwerkstoffes eine ähnliche Echohöhe erreichen. Die Echos der KSR 1 Reflektoren können nicht lokalisiert werden.

Mit der vorgestellten Prüftechnik sind alle vier Reflektoren gut zu erkennen. Der KSR 1 in 4 mm Tiefe liefert das schwächste Signal, das sich mit einem Signal-Rausch-Abstand von > 10 dB von der Umgebung abhebt.

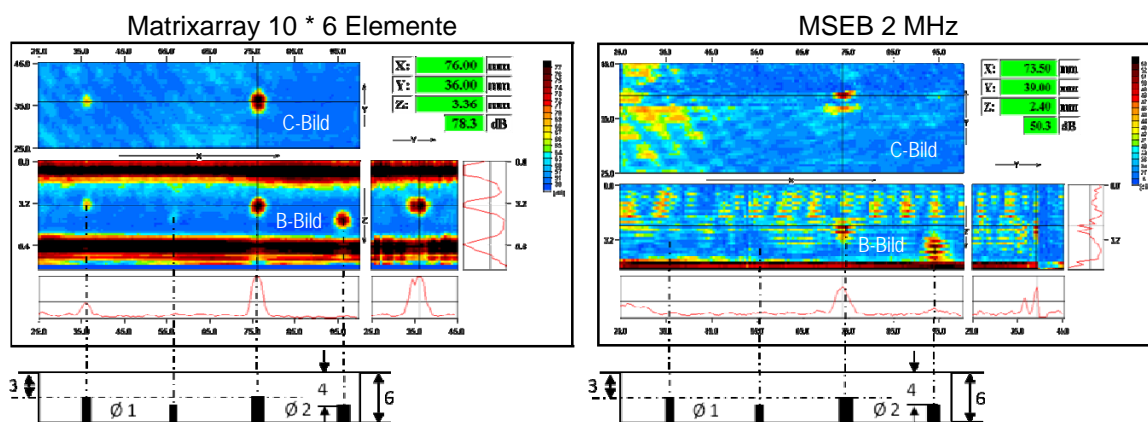


Bild 5: Echobilder von KSR 1 und KSR 2 in einer CFK-Platte

Das linke B-Bild aus Bild 5 wird in Bild 6 mit gleicher Skalierung der beiden Achsen dargestellt. Hier fällt besonders auf, dass die Tiefenausdehnung der Anzeigen mit 1.3 mm etwa so groß ist wie die Wellenlänge und damit etwa halb so groß wie die Impulslänge. Dieser Effekt kommt durch den Superpositionsalgorithmus zustande, möglicherweise unterstützt durch die große Dämpfung in dem Material.

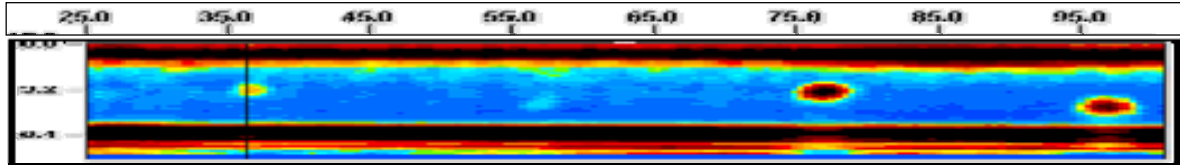


Bild 6: B-Bild der Echoanzeigen im richtigen Ansichtsverhältnis

4.2 Beispiel 2, Impaktschäden

Eine typische betriebsbedingte Schadensart entsteht durch Einschläge, Impakts, die durch eine lokale mechanische Überlastung. Bedingt durch den inhomogenen Aufbau des Verbundwerkstoffs führt dies zu internen Brüchen innerhalb und oder zwischen den Faserlagen. Diese Schäden sind visuell von außen schwer bzw. gar nicht erkennbar.

Mit der im Bild 7 gezeigten Fallmaschine [7] wurden reproduzierbare Impakts mit verschiedenen Fallenergien in die 6 mm dicke Testplatte eingebracht.

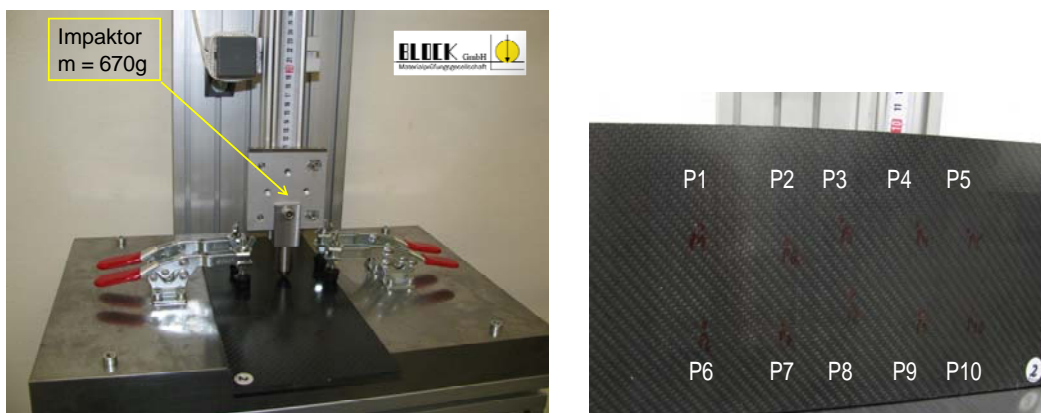
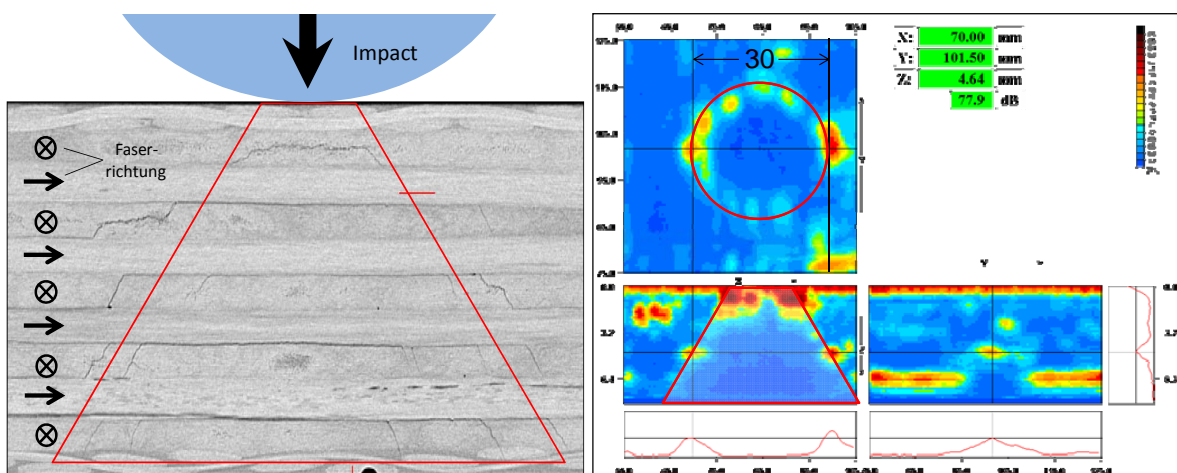


Bild 7: Fallmaschine, Fallenergie $E = m g h$, 6.56 J/m, Testplatte mit Impakts verschiedener Energie

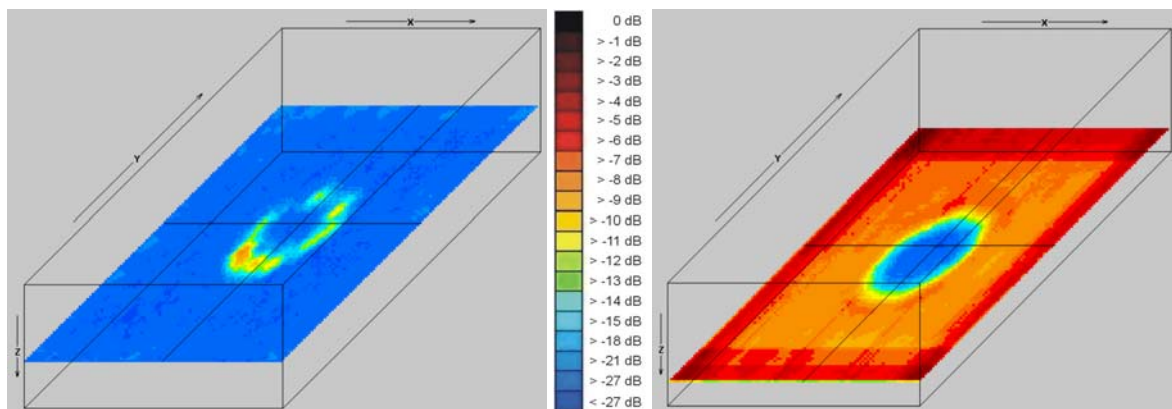


Im Computertomogramm in Bild 8 sind deutlich Materialtrennungen zu erkennen. Die Bildebene liegt senkrecht zur Oberfläche der Platte und enthält den Mittelpunkt des Einschlags und eine Faserrichtung der $0^\circ/90^\circ$ Schichtung. Die Materialtrennungen befinden sich offensichtlich in der Matrix und parallel zu den Fasern, da sie nur in Lagen zu beobachten sind, in denen die Fasern senkrecht auf der Bildebene stehen. Die Risse liegen symmetrisch um das Lot der Einschlagstelle, wobei der Abstand der Risse voneinander mit der Tiefe zunimmt. Faserbrüche sind nicht erkennbar.

Die Rissverteilung wird auch in den Ultraschallbildern bestätigt. Die Echoanzeigen im C-Bild in Bild 9 liegen auf einem Kreis. Man erkennt auch hier, dass es sich um mehrere verteilte Bruchstellen handelt.

Es ist hervorzuheben, dass die vorgestellte Prüftechnik neben der guten lateralen Auflösung vor allem auch eine sehr gute Tiefenauflösung hat. Dadurch lässt sich bestimmen in welchen Lagen des Schichtaufbaus es zu einer Schädigung gekommen ist.

Die Auswertung der räumlichen Ultraschallbilder eines Impaktschadens an einer weiteren 6 mm dicken Testplatte mit einem Aufbau aus $0^\circ/90^\circ$ Gewebelagen (in Bild 10 wird nur eine Schicht in einer Tiefenlage dargestellt) zeigt, dass die Echoanzeigen in der Nähe einer Kegelfläche liegen. Insofern es zu einer Abschattung des Kegelinneren durch die an der Kegeloberfläche liegenden Rissflächen kommt, können aus dem Kegelinneren allerdings keine Echos empfangen werden. Sehr eindrucksvoll ist dies an der Abschattung des Rückwandechos in Bild 11 zu sehen. Der Durchmesser des Schattens beträgt hier ca. 13 mm.

Bild 10: UT C-Bild, Tiefe $z = 4.8$ mmBild 11: UT C-Bild, Tiefe $z = 6.2$ mm

Eine weitere Anwendung der Prüftechnik an Kupferlötsschichten ist in [6] beschrieben.


5. Resumé

An Beispielen wurde gezeigt, dass mit der Prüftechnik an 6 mm dicken CFK-Platten mit verschiedenem Lagenaufbau eine für den Werkstoff bemerkenswert hohe Empfindlichkeit und Ortsauflösung erreicht wird. Beste Ergebnisse wären in dieser Hinsicht an sich mit SAFT zu erwarten. SAFT reagiert aber sehr empfindlich auf Fehler der berechneten Echolauftzeiten aufgrund von lokal variierenden Materialparametern. Der Mess- und Rechenaufwand ist ebenfalls größer.

Die vorgestellte Prüftechnik ist gegenüber Echolauftzeitfehlern deutlich toleranter und erfordert auch nicht zwingend einen größten Abstand der Messpunkte. Dadurch kann die Prüfgeschwindigkeit bei Bedarf stark gesteigert werden, natürlich auf Kosten von

Bildqualität und Empfindlichkeit. Die Prüftechnik kann sicher in vielen Fällen sinnvoll eingesetzt werden, wenn dreidimensionale Bildgebung gefragt ist. Eine Weiterentwicklung erscheint in jedem Fall lohnend.

Referenzen

- [1] BAM Dissertation Series, Volume 31, B. Eng MSc Jarlath Mc Hugh Ultrasound Technique for the Dynamic Mechanical Analysis (DMA), 2008, ISBN 978-3-9812072-0-0]
- [2] H. Wüstenberg, A. Erhard, G. Schenk, H.-J. Montag „Anwendung der Ultraschalltomographie an Turbinen und Generatorwellen“, Materialprüfung 29 (1987), Nr. 10, S. 297-302
- [3] T. Hauser, H.-J. Montag, R. Boehm, U. Voelz „Vergleich von Rekonstruktionsverfahren auf der Basis von Gruppenstrahler-Ultraschalldaten“, DGZfP Jahrestagung, Bamberg 1998
- [4] G. Brekow, R. Boehm, D. Brackrock, M. Kreuzbruck, “Quantitative Defect Sizing on Components with Different Wall Thickness using UT-SAFT”, 17th WCNDT, China, Shanghai 2008
- [5] R. Boehm, D. Brackrock, J. Kitze, G. Brekow, M. Kreuzbruck „SAFT für die Rissflächenanalyse, Vergleich von Modellrechnungen und Gruppenstrahlermessungen“, DGZfP Jahrestagung, Münster 2009
- [6] J. Kitze, G. Brekow, H.-J. Montag, R. Boehm, D. Brackrock, M. Kreuzbruck „Ultraschallprüfung mit Matrix-Arrays zur schnellen Fehlerdetektion in Kupferlötsschichten“ DACH-Jahrestagung, Graz 2012
- [7] Die Impakts wurden von der Fa. Block  in die Testplatte eingebracht.
- [8] Die Mikro-CT Aufnahmen wurden von Herrn Dr. Illerhaus, BAM 8.5, zur Verfügung gestellt.