

IMPERFEKTIONSBEWERTUNG VON FASERVERBUND-METALLSTRUKTUREN MIT ZERSTÖRUNGSFREIEN PRÜFVERFAHREN

M. Perterer, M. Wedekind, H. Baier,
Lehrstuhl für Leichtbau, Technische Universität München,
Boltzmannstrasse 15, 85747 Garching, Deutschland

Zusammenfassung

Der steigende Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in der Luft- und Raumfahrtindustrie führt zu einem anwachsenden Bedarf im Bereich zerstörungsfreier Prüfmethode (ZfP). Erst durch deren Einsatz kann die Betriebssicherheit von komplexen Bauteilen gewährleistet werden. In dieser Werkstoffgruppe stellen speziell hybride Bauweisen eine große Herausforderung für die Prüfsysteme dar. Diese werden beispielsweise in Form von hybriden Faserverbund-Metall Laminaten zur Steigerung der Lochleibungsfestigkeit eingesetzt. Die große Differenz der physikalischen Eigenschaften der Einzelwerkstoffe (beispielsweise bei Faserverbund-Metall Laminaten) stellt vor allem dann ein Problem dar, wenn Bereiche, welche hinter diesen Grenzflächen liegen, bewertet werden müssen. Da insbesondere in der Wartung in den meisten Fällen lediglich ein einseitiger Zugang gewährleistet ist, müssen Prüfmethode entwickelt und angepasst werden, um diese Anforderungen erfolgreich zu bewältigen. Zu diesem Zweck werden hier verschiedene zerstörungsfreie Prüfmethode, darunter ein kostengünstiges, phasenbasiertes Thermographiesystem, vorgestellt, deren Leistungsfähigkeit anhand typischer Fehlstellen gezeigt wird. Eine Verbundplatte mit sich überlappenden metallischen Einlagen dient dabei als Anwendungsreferenz. Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wird der Einfluss von Anzahl und Lage der metallischen Schichten sowie der unterschiedlicher Werkstoffe und Laminatdicken betrachtet. Die Untersuchungen zeigen, dass neben Ultraschallverfahren auch die thermische Bewertung dieser Werkstoffe gute Ergebnisse liefert, wobei ein deutlicher Einfluss der Tiefenlage der Defekte sowie der metallischen Einlagen zueinander zu verzeichnen ist. Die gesammelten Ergebnisse unterschiedlicher Verfahren sollen das Verständnis zur Bewertung von Faserverbund-Metallstrukturen beim Vorhandensein von Fehlstellen verbessern.

1. MOTIVATION

Durch die wachsenden Anforderungen an Faserverbundstrukturen und den stetigen Drang nach Gewichtseinsparung getrieben, werden Faserverbund-Metallhybride in immer mehr Teilbereichen eingesetzt. Spezielle Vorteile ergeben sich beispielsweise bei der Gestaltung von Lasteinleitungsstellen, wobei metallische Zusatzmaterialien zur Verbesserung der lokalen Spannungsverteilung eingesetzt werden. Durch die Kombination von Werkstoffen mit unterschiedlichen mechanischen wie auch thermischen Eigenschaften können vermehrt im Interface zwischen den Fügepartnern Fehlstellen auftreten, welche verlässlich zerstörungsfrei detektiert werden müssen. Darüber hinaus muss die Frage nach der Bewertbarkeit von Fehlstellen gestellt werden, welche sich hinter diesen metallischen Schichten befinden und möglicherweise dadurch abgeschattet werden. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit verschiedene vielversprechende zerstörungsfreie Prüfverfahren verwendet, um anhand repräsentativer Probenkörper diese Fragestellungen zu klären.

2. GRUNDLAGEN

Auch in modernen Strukturen werden Anbindungspunkte und Verbindungsstellen zwischen einzelnen Komponenten oder Baugruppen benötigt. Im Bereich dieser Lasteinleitungen entsteht um die Bolzen ein komplexer Spannungszustand, dem ein Werkstoff mit stark

Richtungsabhängigen Werkstoffeigenschaften, wie ein Faserverbundwerkstoff, nicht gerecht werden kann. In der Praxis werden diese Bereiche meist aufgedickt, was jedoch einerseits mit einer höheren Masse einhergeht. Andererseits birgt dies im Bereich der Dickenänderung den Nachteil von Spannungen in Richtung der Flächennormalen des Laminats. Als Alternative können hier hybridisierte Laminat eingesetzt werden. Hierbei werden einzelne Lagen des Laminates ganz oder teilweise durch metallische Schichten substituiert. (Eine schematische Darstellung ist in BILD 1 zu finden.) Im Rahmen dieses Papers werden diese werkstoffhybriden Laminat hinsichtlich ihrer Inspezierbarkeit mit unterschiedlichen zerstörungsfreien Prüfverfahren untersucht.

Die meisten Konstruktionswerkstoffe können bei einer makroskopischen Betrachtung als homogen angenommen werden. Aufgrund der heterogenen Verteilung der Bleche ist dies bei den hybridisierten Laminaten nicht der Fall, somit stellen sich bei der Bewertung dieser Laminat besondere Herausforderungen bei der zerstörungsfreien Prüfung. Bereits ohne eine Vorschädigung finden sich hier Grenzflächen zwischen den einzelnen Werkstoffen. Da diese massiv unterschiedliche physikalische Eigenschaften, wie zum Beispiel Wärmekapazitäten, Wärmeleitfähigkeiten, Schallgeschwindigkeiten und Dämpfungen aufweisen, kann dies sowohl die Durchdringung des Bauteils als auch die Interpretation der Ergebnisse deutlich erschweren.

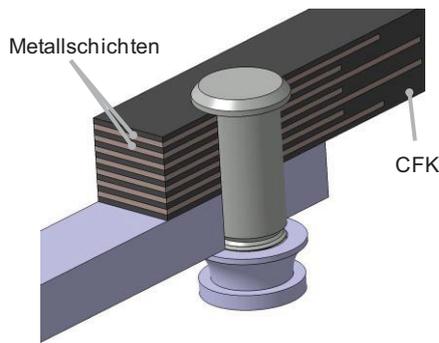


BILD 1. Schematische Schnittdarstellung eines teilhybridisierten Bauteils mit Bolzenverbindung

Insbesondere für die Verwendung im Bereich der Luftfahrt ist eine effiziente Schadensdetektion zwingend erforderlich.

3. VERSUCHSAUFBAUTEN

Zur Schadensbewertung bei Faserverbund-Metalstrukturen werden zwei unterschiedliche akustische Verfahren sowie eine phasensensible thermische Methode eingesetzt. Zur akustischen Prüfung dienen Ultraschallwellen, wobei basierend auf deren Dämpfungs- und Reflektionseigenschaften beim Bauteildurchgang eine Schadensbewertung vollzogen wird. Die gewählte thermische Methode nutzt eine periodische Anregung zur Erzeugung eines zeitlich veränderlichen Temperaturfeldes in der Probe zusammen mit einer sequenziellen Auswertung zur Extraktion charakteristischer defektsensitiver modaler Parameter.

3.1. Wassergekoppeltes Ultraschall

Die Ultraschallprüfung erfolgt in beiden Fällen mit Wasserankopplung, wobei die Positionierung der Sonotroden auf zwei unterschiedliche Arten gewählt wird. BILD 2 zeigt schematisch die gewählten Anordnungen der Sonotroden.

Beim Impuls-Echo-Verfahren (Bild 2 links) kommt in der Regel ein Prüfkopf zum Einsatz, welcher über der Bauteiloberfläche positioniert wird. Nach Aussendung eines zeitlich begrenzten akustischen Signals dient der gleiche Prüfkopf als Empfänger für die reflektierten Signale. Durch die Betrachtung der Signallaufzeit bzw. der Signalschwächung können Rückschlüsse auf den Bauteilzustand gezogen werden [1]. Ist eine Fehlstelle im Bauteil vorhanden, so muss das akustische Signal die Distanz von der Bauteiloberfläche bis zur Schädigung doppelt zurücklegen, was in einigen Fällen zu einer deutlichen Schwächung des Signals führt.

Die Durchschallungsmethode, in BILD 2 rechts dargestellt, weist zwei gegenüber liegende Prüfköpfe auf, wobei die eine Sonotrode als Sender, die andere als Empfänger betrieben wird. Die Auswertung erfolgt im Wesentlichen anhand der Schwächung des detektierten akustischen Signals, was eine Bestimmung der Fehlertiefe, welche mit dem Impuls-Echo-Verfahren möglich ist, nicht zulässt.

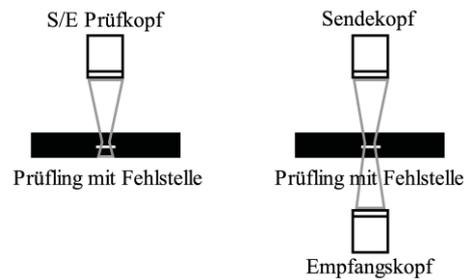


BILD 2. Schematischer Aufbau der akustischen Prüfung: Impuls-Echo-Verfahren (links) und Durchschallungsverfahren (rechts)

Ein wesentlicher Vorteil dieses Systems ist, dass das Bauteil zwischen Bauteiloberfläche und Fehlstelle nur einmal durchlaufen werden muss. Speziell bei Defekten, die sich in der Nähe der Bauteilrückwand befinden, weist das Durchschallungsverfahren eine deutlich geringere Signaldämpfung infolge des lediglich einmaligen Bauteildurchganges auf, was in weiterer Folge eine größere Defektsensitivität und damit auch einen besseren Fehlstellenkontrast liefert. Befinden sich Verstärkungselemente, wie Stringer, Spante, etc., auf der Bauteilrückseite bzw. ist das Bauteil nur einseitig zugänglich, kann das Verfahren nicht angewendet werden.

3.2. Phasensensitives Thermographieverfahren

Zur thermischen Charakterisierung wird ein auf periodischer Anregung basiertes System eingesetzt, dessen prinzipieller Aufbau in BILD 3 dargestellt ist.

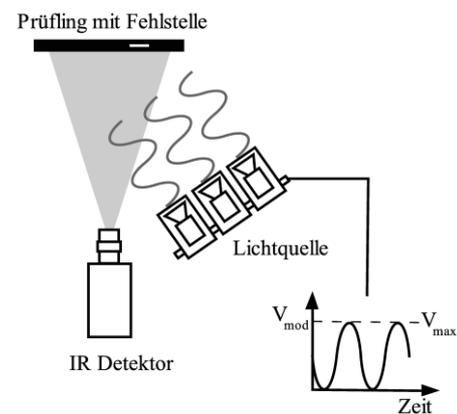


BILD 3. Schematischer Aufbau der thermischen phasensensiblen Untersuchung

Die Funktionsweise dieses Systems ist dem von Lock-In Methoden [2] [3] sehr ähnlich, wobei auf eine Synchronisierung zwischen Anregung und Aufzeichnung verzichtet wird, was neben der Verwendung von günstigen Off-the-shelf Komponenten zu einer erheblichen Kostenersparnis führt. Im Rahmen von Forschungsarbeiten konnte gezeigt werden, dass diese *Sequentielle Phasenmodulierte Thermographie (SPT)* eine vergleichbare Defektsensitivität im Vergleich zu konventionellen Lock-In Verfahren aufweist [4] [5]. Die Anregung erfolgt optisch sinusförmig über ein Halogenlampenarray, wobei Anregungsfrequenzen zwischen 0,01 Hz und 0,3 Hz zur Charakterisierung der sich in unterschiedlicher Tiefe befindlichen Fehlstellen

gewählt werden. Zur Auswertung werden Phasenbilder verwendet, welche die im Vergleich zur ungestörten, auf die Bauteiloberfläche aufgetragenen thermischen Welle, relative Phasenverschiebung darstellen.

4. ERGEBNISSE

Im Folgenden werden Ergebnisse an unterschiedlichen repräsentativen CFK-Metall-Hybridlaminaten mit verschiedenen Fehlstellen miteinander verglichen, um die Eignung der unterschiedlichen Verfahren zur Schadensbewertung zu charakterisieren.

4.1. Überlappende metallische Einschlüsse

Um Fehlstellen hinter metallischen Schichten in Faserverbundwerkstoffen genauer bewerten zu können, muss zunächst der Einfluss der Überlappung dieser metallischen Schichten zueinander geklärt werden. Zu diesem Zweck werden metallische Bleche (Stahl-, Titan-, und Aluminiumlegierung mit einer Dicke von ca. 0,25 mm) in eine ca. 4 mm dicke CFK Platte (T700/Epoxy mit orthotropem Aufbau) gemäß BILD 4 eingebracht. Die so entstehenden Cluster aus vier sich in unterschiedlicher Weise überlappenden Blechen werden in drei unterschiedlichen Tiefenlagen – $d_{\text{Deckschicht}}$ – von 0,27 mm bis 0,81 mm in das Laminat eingebracht.

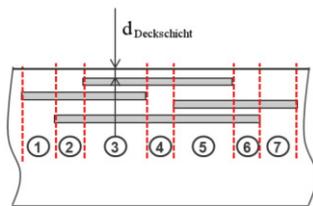


BILD 4. Schematische Anordnung eines Clusters sich überlappenden metallischer Blechschichten [5]

Die metallischen Bleche werden in entsprechende Ausschnitte in den einzelnen Prepreglagen (Lagendicke ca. 0,27 mm) eingebettet. Der Abstand der einzelnen metallischen Lagen in ansteigender Tiefe beträgt jeweils eine CFK Lage (ca. 0,27 mm). BILD 5 zeigt die Ergebnisse einer Impuls-Echo Ultraschalluntersuchung des entsprechenden Plattenbereichs, wobei die unterschiedlichen Werkstoffe in drei horizontalen Reihen angeordnet sind. Hierbei steigt die Fehlertiefe der Clustern vom linken Bildbereich bis zum rechten kontinuierlich an. Die Steigerung der Tiefenlage beträgt jeweils eine Prepregschicht und somit ca. 0,27 mm.

Alle drei eingebrachten Werkstoffe zeigen vergleichbare Antwortsignale, wobei speziell die oberflächennächsten Cluster scharfe Abgrenzungen zwischen den einzelnen Überlappungsbereichen aufweisen.

Es sind im Wesentlichen fünf unterschiedliche Zonen erkennbar, welche jeweils durch charakteristische Dämpfungswerte gekennzeichnet sind. Vergleicht man dies mit der Skizze aus BILD 4, so sieht man, dass die dort markierten Bereiche eins und zwei bzw. sechs und sieben im Ultraschallbild nicht voneinander trennbar sind und vielmehr die gleiche Schallschwächung aufweisen.

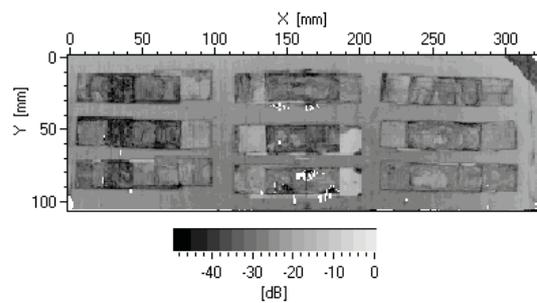


BILD 5. Schwächung des Rückwandsignals: Cluster überlappenden metallischer Bleche in unterschiedlichen Tiefen in CFK- Platte: Erste Reihe: Titan; zweite Reihe: Stahl; dritte Reihe: Aluminium

Die Untersuchung mit dem phasensensiblen SPT System, deren Ergebnisse in BILD 6 und in BILD 7 dargestellt sind, zeigt etwas unterschiedliche Ergebnisse. Aufgrund der feineren Auflösung des Ultraschallbildes (Charakteristischer Auflösungswert: Spotgröße: 0,1 mm) im Bezug zu den thermographischen Ergebnissen (Charakteristischer Auflösungswert: Pixelgröße ca. 1,5 mm) erscheinen die Phasengrenzen im Ultraschallbild klarer.

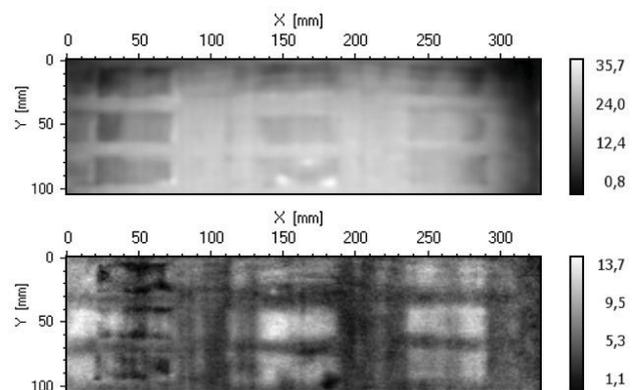


BILD 6. Thermisches Phasenbild: Cluster überlappenden Einschlüsse in unterschiedlichen Tiefen in CFK- Platte: 0,01Hz Anregungsfrequenz oben; 0,10Hz Anregungsfrequenz unten

Allerdings können speziell bei den oberflächennahen Fehlstellen bei einer Anregungsfrequenz von 0,01 Hz die Bereiche zwei und sechs (vergleiche dazu BILD 4) von den benachbarten Bereichen eins und sieben getrennt und so identifiziert werden (helle Bereiche im Phasenbild in BILD 6 bzw. Anstieg im Phasenwinkel im horizontalen Schnitt durch die Fehlstellen in BILD 7).

Erhöht man die Anregungsfrequenz auf 0,1 Hz, so führt dies neben einer Verkürzung der Messzeit zu einer Erhöhung des Kontrastes der oberflächennahen Fehlstellen. Gleichzeitig sinkt im Gegenzug das Signal zu Rausch Verhältnis und Fehlstellen in größerer Tiefe können nicht mehr eindeutig detektiert werden. Die Phasenspreizung sinkt von 35,7° (Messung bei 0,01 Hz) auf 13,7° (Messung bei 0,1 Hz).

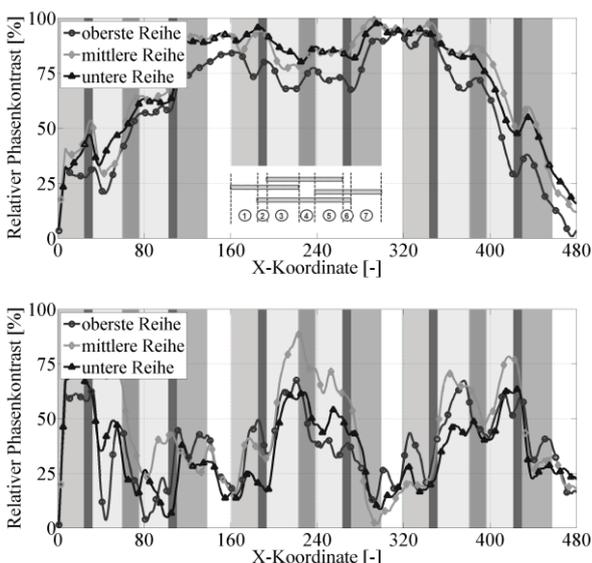


BILD 7. Horizontale geglättete Schnitte bei Fehlerbereichen des thermischen Phasenbildes: oben bei 0,01Hz Anregungsfrequenz; unten bei 0,10 Hz Anregungsfrequenz

Vergleicht man die unterschiedlichen metallischen Liner miteinander, so ist auch bei der thermischen Messung der Kontrast ähnlich. Lediglich die Messung bei einer Anregungsfrequenz von 0,1 Hz zeigt einen etwas höheren Kontrast bei der mittleren Reihe an Fehlerclustern, welche Stahlblechen aufweisen. Dieses Phänomen ist vor allem in BILD 7 unten deutlich zu erkennen.

4.2. Fehlstellen zwischen metallischen Schichten

Nachdem der Einfluss sich überlappender metallischer Lagen zueinander aufgezeigt ist, werden im nächsten Schritt Fehlstellen hinter metallischen Lagen in unterschiedlichen Tiefen betrachtet.



BILD 8. Hybridplatten mit künstlich eingebrachten Fehlstellen: oben: CFK Laminat mit 16 Lagen 0,25 mm dicken Stahlblechen (1.4310); unten: CFK Laminat mit 16 Lagen 0,25 mm dicken Titanblechen (Ti15-3)¹

In BILD 8 sind zwei Faserverbund-Metallaminat abgebildet (oben: Faserverbund-Titanstruktur; unten: Faserverbund-Stahlstruktur), welche als Referenzproben zur Fehlerbewertung verwendet werden. Die

¹ Probenbereitstellung durch Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig

Faserverbund-Metallstrukturen umfassen jeweils 16 metallische Lagen mit je acht künstlich eingebrachten Fehlstellen in unterschiedlichen Tiefen. Die Fehlstellen werden durch doppelt eingebrachte Trennfolien gebildet [6]. Die Untersuchung der Probenkörper erfolgt mit allen drei zuvor beschriebenen unterschiedlichen Methoden. Das Durchschallungsverfahren zeigt bei beiden geprüften Verbundstrukturen gute Ergebnisse. Wie in BILD 9 unten und BILD 10 unten dargestellt, können alle Fehlstellen in Lage und Größe aus der akustischen Signalschwächung bestimmt werden. Dabei weisen beide CFK-Hybridverbunde ähnliches Verhalten auf, was in Einklang mit [6] steht.

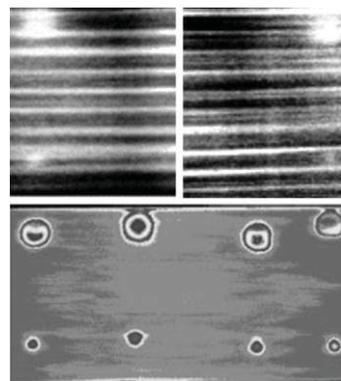


BILD 9. Hybridplatte CFK-Stahl (Ausschnitt): Ultraschall Durchschallung [6] (unten) und thermisches Phasenbild bei 0,02Hz (oben)

Vergleicht man diese Ergebnisse mit denen der thermischen Untersuchung, welche in BILD 9 oben und BILD 10 oben dargestellt sind, so stellt man fest, dass in diesem Fall lediglich die oberflächennahen Fehlstellen detektierbar sind. Die thermischen Untersuchungen beider Probenkörper zeigen zwei nebeneinanderliegende Phasenbilder, welche jeweils von Vorder- (links) und Rückseite (rechts) aufgenommen wurden.

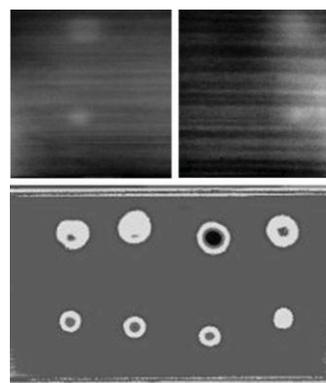


BILD 10. Hybridplatte CFK-Titan (Ausschnitt): Ultraschall Durchschallung [6] (unten) und thermisches Phasenbild bei 0,01Hz (oben)

Der Fehlstellenkontrast des Phasenbildes ist dabei deutlich geringer als der des vergleichbaren C-Durchschallungsbildes. Auch die Fläche der Fehlstelle ist durch im Bauteil vorhandene Wärmeströme, welche durch die vergleichsweise geringe Anregungsfrequenz zur Prüfung dickwandiger Probenkörper begünstigt werden, nur mit einigem Aufwand exakt zu ermitteln. Darüber hinaus wird das Phasenbild durch die über die Probenbreite variierende Verteilung der Faserstränge

beeinflusst, was im vermehrten Maße bei der Faserverbund-Stahl-Struktur in BILD 9 oben zu sehen ist. Somit kann im Vergleich zu den Ergebnissen aus BILD 6 gesagt werden, dass sich die thermische Prüfung zur Charakterisierung von dünnwandigen Strukturen tendenziell besser eignet, wobei die Defektsensitivität bei größerer Dicke und höherem metallischen Anteil verringert. Ein Vorteil der thermischen Analyse ist allerdings, dass die Tiefenlage der Fehlstellen durch eine Variation der Anregungsfrequenz bestimmt werden kann, was für die akustische Durchschallungsmethode nicht möglich ist.

Ein weiterer Nachteil des Durchstrahlungsverfahrens gegenüber der vorgestellten thermischen Methode ist die Notwendigkeit eines beidseitigen Zugangs zur Probe bzw. der Struktur im Allgemeinen. Aus diesem Grund wird im Folgenden auch die Ultraschall Impuls-Echo Methode betrachtet und die Ergebnisse dem Durchschallungssystem gegenübergestellt. In BILD 11 ist die Schwächung des Rückwandsignals beider Probenkörper unter Verwendung eines 1 MHz Prüfkopfes zu sehen. Dabei ist die Probe in zwei (BILD 11 oben) bzw. drei (BILD 11 unten) Teilbereiche gegliedert, wobei Messungen von der Vorder- bzw. Rückseite durchgeführt wurden.

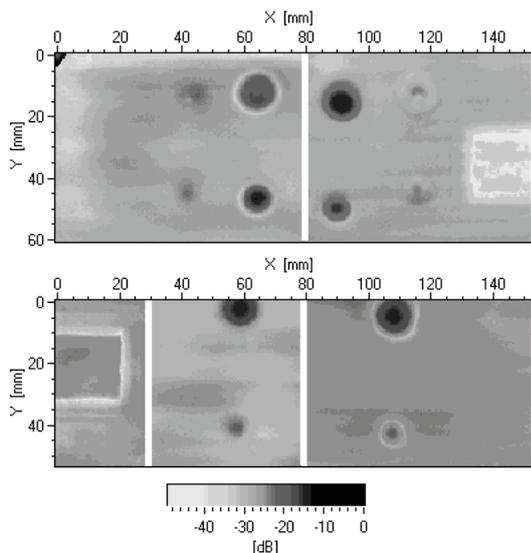


BILD 11. Ultraschall Impuls-Echo-Verfahren: Schwächung des Rückwandsignals: Hybridplatte CFK-Titan (oben): Messung an Rückseite links und Messung an Vorderseite rechts; CFK-Stahl (unten): Messung an Rückseite Mitte und Messung an Vorderseite rechts bzw. links

Im Fall der CFK-Stahl Hybridstruktur, in BILD 11 oben, können mit der Impuls-Echo Methode jeweils die vier zur Prüfoberfläche am nächsten liegenden Fehlstellen detektiert werden. Ist somit nur einseitiger Zugang zum Probenkörper möglich, können nur vier der acht Fehlstellen identifiziert werden. Betrachtet man die Ergebnisse der CFK-Titan Hybridstruktur, so sind von Vorder- und Rückseite lediglich jeweils zwei Fehlstellen erkennbar, was beispielsweise durch den Unterschied der divergierenden akustischen Eigenschaften des Phasenübergangs CFK-Stahl bzw. CFK-Titan erklärt werden kann.

4.3. Fehlstellen aus VARI² Prozess

Nachdem bei den zuvor behandelten Probenkörpern künstliche Fehler eingebracht und diese bewertet wurden, soll nun Augenmerk auf reale Schadensbilder gelegt werden. Genauer gesagt wird im Folgenden eine mittels VARI-Verfahren hergestellte Faserverbundprobenplatte behandelt (BILD 12: links: Vorderseite, rechts: Rückseite), welche zur Hälfte mit einer metallischen Lage verstärkt ist. Der Harzfluss erfolgte bei der Infiltration vom ungestörten Faserverbundbereich hin zum mittels Stahlliner hybridisierten Bereich mit Hilfe eines linienförmigen Angussbereiches. Die Platte wurde dabei rückseitig auf eine metallische Form aufgebracht. Auf der Vorderseite befand sich kein Werkzeug.

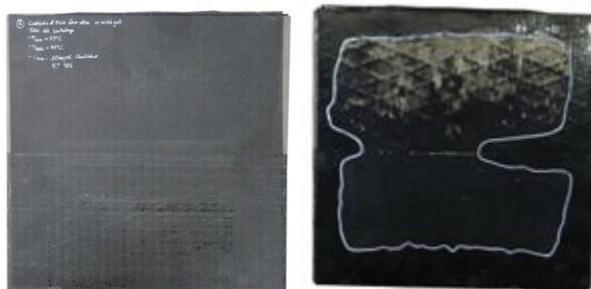


BILD 12. Vakuuminfiltrierte CFK-Stahl Platte (VARI-Prozess): Vorderansicht (links) und Rückansicht mit markiertem harzarmen Bereich (rechts)

Aufgrund ungünstiger Prozessparameter war auf der Plattenrückseite ein trockener Bereich mit unzureichender Infiltration zu erkennen. Dieser ist in BILD 12 rechts weiß umrandet und erstreckt sich dabei sowohl über den hybridisierten Teil der Platte (obere Hälfte) als auch über den Teil der Probe, welcher nur Kohlefaserlagen aufweist (untere Hälfte). Von der Vorderseite ist kein schadhafter Bereich zu sehen. Die Fragestellung ist nun, ob sich der offensichtlich trockene Bereich auf der Plattenrückseite bei einer Inspektion der Plattenvorderseite detektieren lässt. Speziell die Detektion der trockenen Bereiche hinter dem metallischen Liner soll genauer betrachtet werden, da dieser Bereich hinsichtlich der Schadstellendetektion kritisch scheint

In BILD 13 sind die Ergebnisse einer thermischen Untersuchung bei einer Anregungsfrequenz von 0,04 Hz dargestellt. Durch die Teilhybridisierung ergeben sich im Phasenbild zwei unterschiedliche Bereiche, welche zueinander einen Phasensprung aufweisen. Die obere Abbildung zeigt den nicht hybridisierten Bereich im unteren Teil der Platte. Die Bereiche unzureichender Infiltration sind deutlich durch eine Reduktion des Phasenwinkels erkennbar. Auch die Gestalt der detektierten Fehlstelle ist mit der rückseitig erkennbaren Region vergleichbar (Da das thermische Phasenbild die Plattenvorderseite zeigt, ist die Schadenfläche relativ zu BILD 12 horizontal gespiegelt). Betrachtet man die Ergebnisse des hybridisierten Bereiches (BILD 13 unten), so ist einerseits ein schadhafter Bereich in der Mitte der hybridisierten Region durch einen Anstieg im Phasenwinkel erkennbar, allerdings unterscheidet sich

² VARI ist die englischsprachige Abkürzung für Vacuum Assisted Resin Infusion

dieser von der mittels rückseitiger visueller Inspektion abgeschätzten Fläche. Der thermisch detektierte Bereich ist etwas kleiner als die zuvor optisch auf der Plattenrückseite vermessene Fläche und befindet sich innerhalb dieser Fläche.

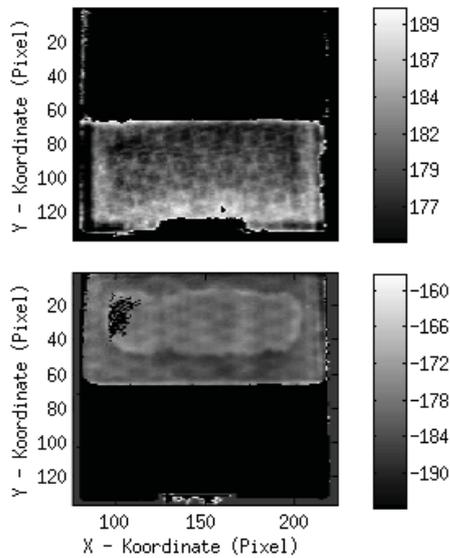


BILD 13. Vakuuminfiltrierte CFK-Stahl Platte: Thermische Phasenbilder bei 0,04 Hz.

Somit kann daraus geschlossen werden, dass der schlecht infiltrierte Bereich auf der Plattenrückseite unterschiedlich viele Lagen betrifft. Bereiche, welche sich direkt an der Rückseite befinden und sehr geringe Tiefenausdehnung aufweisen, wie es bei den Randbereichen der visuellen Schadensfläche der Fall ist, können mittels thermischer Inspektion nicht eindeutig identifiziert werden. Weiter ins Probenkörperinnere reichende trockenere Bereiche können eindeutig detektiert und klar vom Signal der Bauteilrückseite getrennt werden.

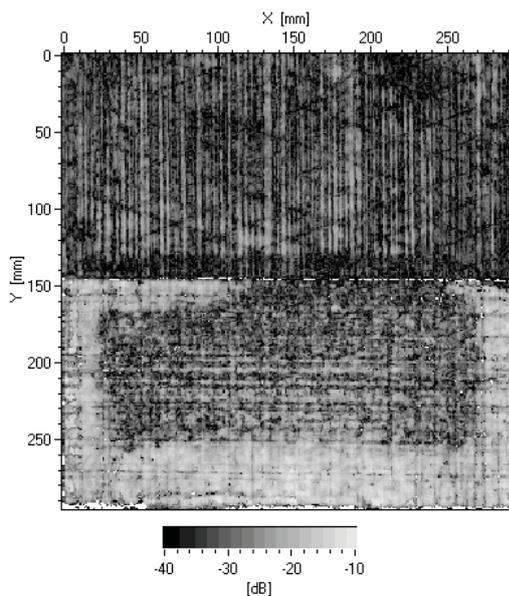


BILD 14. Vakuuminfiltrierte CFK-Stahl Platte: Impuls-Echo Ultraschallverfahren: Schwächung des Rückwandsignals

Betrachtet man die gleiche Probenplatte mit dem

akustischen Impuls-Echo-Verfahren unter Verwendung eines 5 MHz Prüfkopfes, kommt man zu dem in BILD 14 dargestellten C-Bild, wobei die Schwächung des Rückwandsignals als Charakteristik für die Fehlstellencharakterisierung dient. Der Bereich ohne Metallverstärkung (untere Plattenhälfte) zeigt eine zur thermischen Untersuchung analoge Schadensfläche. Die Ergebnisse des hybridisierten oberen Plattenbereiches lassen allerdings im Gegensatz zu den thermischen Phasenbildern keine eindeutige Identifikation eines schadhaften Bereiches zu. Dieser wird durch die eingebrachte metallische Lage vollständig abgeschirmt. Auf eine Untersuchung in Ultraschall Durchschallung wurde an dieser Stelle verzichtet und anstelle auf Die Ergebnisse vergleichbarer Untersuchungen in Abschnitt 4.2 verwiesen.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Basierend auf den hier vorgestellten Untersuchungen unterschiedlicher Faserverbund-Metalstrukturen mit akustischen und thermischen Verfahren, kann eine gute prinzipielle Eignung beider Verfahren in Bezug auf die Bewertung von Faserverbund-Metalstrukturen resümiert werden. Die Güte der Ergebnisse bzw. die Defektsensitivität hängt stark von verschiedenen Probenparametern, wie Dicke, Verbundmaterial und Laminatgüte als auch von diversen Prozessparametern ab. Die thermische Prüfung eignet sich sehr gut für dünnwandige Probenkörper und liefert in Hinblick auf das Impuls-Echo-Ultraschallverfahren vergleichbare Ergebnisse, wobei die Defektgrenzen im Allgemeinen etwas kontrastärmer sind. Dies ist der Tatsache zu schulden, dass die thermische Untersuchung eine flächige durch die Kameraoptik dominierte Untersuchung darstellt, während die Ultraschalluntersuchung eine punktuelle Messung ist. Der Punktabstand der Ultraschallmessung kann deutlich geringer gewählt werden als der sich aus der geometrischen Auflösung und minimalen Fokusslänge sich ergebenden minimalen Pixelgröße.

In einigen Fällen zeigt die thermische Messung deutliche Vorteile gegenüber vergleichbaren akustischen Verfahren wie beispielsweise bei der Bewertung von Infiltrationsfehlern an Faserverbund-Metalstrukturen.

Im Vergleich von Durchschallung und Impuls Echo-Verfahren zeigt die Durchschallung größere Defektsensitivität, wobei allerdings ein beidseitiger Zugang zur zu prüfenden Struktur gegeben sein muss, was in der Realität in vielen Fällen nicht gegeben ist.

Somit hängt die Wahl des zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur Charakterisierung von Schadstellen an Faserverbund-Metalstrukturen in hohem Maße auch von der zu prüfenden Struktur bzw. der Zugänglichkeit ab. Darüber hinaus spielt die Geometrie der Struktur eine entscheidende Rolle. Bei den hier untersuchten Probenkörpern handelte es sich um plattenförmige, weitgehend ebene Strukturen. Da die akustische Prüfung eine größere Sensitivität auf den Einschallungswinkel aufweist als die thermische Prüfung (siehe beispielsweise die Ergebnisse einer Studie, welche unter anderem den Einfluss der Bauteilkrümmung auf die Ergebnisse verschiedener ZfP Methoden zum Thema hat [7]), was zu einem erhöhten messtechnischen Aufwand führt, sind

speziell bei gekrümmten Strukturen thermische Verfahren vorzuziehen.

6. DANKSAGUNG

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten des Lehrstuhls für Leichtbau (LLB) der TU München aus dem Projekt „Betriebssicherheit von Sportgeräten aus CFK“, gefördert von der Bayerischen Forschungsförderung (BFS, Förderkennzeichen: AZ-816-08), in Kooperation mit CUBE Pending System GmbH & Co. KG, Modell- und Formenbau Blasius Gerg GmbH und VISPIRON ASIS GmbH und dem Projekt HyCoS (Hybrid Composite Structures) gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Förderkennzeichen: 20W0806B) unter der Verbundführung von RUAG Aerospace Structures GmbH.

Besonderer Dank gilt Herrn Axel Fink für die Bereitstellung von Probenkörpern und allen Partnern und Beteiligten, welche sich aktiv in die Forschungsprojekte eingebracht, dieses unterstützt und gefördert haben

7. LITERATUR

- [1] K.-J. Langenberg, R. Marklein, K. Mayer. *Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschall*. Oldenbourg Verlag, München, 2009
- [2] X. P. V. Maldaque. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [3] O. Breitenstein, W. Wart und M. Langenkamp. *Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials*. Advanced Microelectronics. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [4] M. Perterer, F. Höchtl, A. Kiefmann, H. Baier, V. Senner. Kosteneffiziente phasenmodulierte Thermographie zur Schadensdetektion an flachen und stark gekrümmten Bauteilen aus CFK. *DGZfP-Jahrestagung 2011*, Bremen, 2011
- [5] M. Perterer, F. Höchtl, A. Kiefmann, H. Baier und V. Senner. Cost-effective phase-modulated thermography for damage inspection of at and strongly curved CFRP structures. *2nd Innovative International Composites Summit (I.I.C.S)*, 2011.
- [6] A. Fink. Lokale Metall-Hybridisierung zur Effizienzsteigerung von Hochlastfügstellen in Faserverbundstrukturen. *Forschungsbericht 2010-14 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*, 2010 Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
- [7] M. Perterer, F. Höchtl, A. Kiefmann, H. Baier, V. Senner. Ultrasonic And Thermographic Monitoring of Impact induced damage of CFRP Structures. *SAMPE 2010 Spring Conference*, Seattle (WA), 2010