

Puls-Phasen-Thermographie an definiert geschädigten und reparierten Faserverbundbauteilen

Thomas KRELL, Johannes WOLFRUM, Wehrwissenschaftliches Institut für Werk-, Explosiv- und Betriebsstoffe – WIWEB, Erding

Benjamin DEUS, Universität der Bundeswehr München, Fachbereich Maschinenbau mit der Wissenschaftlichen Einrichtung für Technologie und Waffentechnik

Kurzfassung. Die zunehmende Verwendung von faserverstärkten Verbundwerkstoffen sowie ihr Einsatz in integralen Strukturen der Luftfahrt und Fahrzeugtechnik machen eine Anwendung von konventionellen zerstörungsfreien Prüfverfahren im Rahmen der Qualitätskontrolle während der Herstellung sowie der Instandhaltung schwierig oder gar unmöglich. Aus diesem Grunde wurden in den vergangenen Jahrzehnten eine Reihe von alternativen Prüfverfahren entwickelt und diese an Faserverbundwerkstoffen erprobt. Zu diesen neuartigen Prüfverfahren zählt auch die Puls-Thermographie in ihren verschiedenen Varianten. Das Verfahren hat eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber anderen Prüfverfahren: Es ist sehr schnell in der Anwendung und Analyse, berührungsfrei, bildgebend, erfasst einen größeren Prüfbereich simultan und kann mit einer Vielzahl von Anregungsmöglichkeiten kombiniert werden.

Diese Untersuchung präsentiert die Ergebnisse der Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mit Puls-Thermographie in der Variante der Puls-Phasenanalyse. Letztere beinhaltet eine Fourier-Entwicklung der Temperaturverteilung und liefert als Ergebnis eine Darstellung der Phasenwerte für den Prüfbereich. Im Vergleich zur Temperaturbild-Analyse ist eine verbesserte Nachweisempfindlichkeit und Erhöhung der Nachweistiefe von Schäden möglich. Prüfungen wurden durchgeführt an monolithischen CFK-Proben sowie an CFK-Sandwichstrukturen mit Wabenkern. Die Proben enthielten zum Teil künstliche Vergleichsfehler wie Flachbodenbohrungen und Wabenkerneinsätze. Ferner wurde eine Untersuchung an einer CFK-Hauptfahrwerksklappe mit realem Schlagschaden durchgeführt. Ein letzter Punkt beinhaltete den Nachweis von Fehlern in klebtechnischen Reparaturen. Die Resultate zeigen eine sehr gute Eignung des Verfahrens zum Nachweis von oberflächennahen Fehlern.

1. Einleitung

Die fünf Standardverfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung in der Luftfahrt, die Ultraschall-, Wirbelstrom-, Farbeindring-, Magnetpulver- und Durchstrahlungsprüfung, waren in den vergangenen Jahrzehnten für die Prüfung von Luftfahrzeugkomponenten und -strukturen aus konventionellen Metall-Legierungen ausreichend. Jedoch der zunehmende Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in neuen Luftfahrzeugstrukturen in Integralbauweise macht einen Einsatz dieser Standard-Verfahren unzuweckmäßig oder unmöglich. Daher wurden in den letzten Jahren verstärkt alternative Prüfverfahren für die Prüfung dieser neuen Werkstoffklasse entwickelt und erprobt. Eines dieser Prüfverfahren, deren Einsatz in der Luftfahrt entsprechend der Norm DIN EN 4179 in naher Zukunft bevorsteht, ist das Thermographie-Verfahren.

Das Verfahren besitzt eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber anderen Prüfverfahren, wie beispielsweise dem bildgebenden Ultraschall- oder mechanischen Impedanz-Verfahren: Es ist sehr schnell in der Anwendung und Analyse, berührungsfrei, bildgebend, erfasst in einer einzigen Abbildung einen größeren Prüfbereich und kann in einer Vielzahl von Varianten verwendet werden. Diese Untersuchung präsentiert die Ergebnisse der Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mit Puls-Thermographie in den Varianten der Temperaturbild-Auswertung und der Puls-Phasenanalyse, teilweise im Vergleich zum manuellen Ultraschall-Verfahren und zeigt die prüftechnischen Möglichkeiten und Beschränkungen bei der zerstörungsfreien thermographischen Prüfung dieser Werkstoffklasse.

2. Experimentelle Ausstattung und Durchführung

Das Prinzip der aktiven Thermographie mit optischer Pulsanregung ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Die zugängliche Oberfläche eines Prüfobjektes wird hierbei kurzzeitig mit Blitzlampen bestrahlt. Diese Strahlung wird entsprechend dem Absorptionsgrad der Oberfläche teilweise absorbiert und in Wärme umgewandelt. Es entsteht eine Wärmediffusion ins Werkstoffinnere. In Bereichen, in denen sich verdeckte Werkstofffehler, wie Delaminationen oder andere Werkstofftrennungen mit einer Orientierung parallel zur Oberfläche befinden, ist jedoch dieser Wärmefluss gestört. Der Wärmestrom muss seitlich um den Fehler abfließen, damit sich wieder thermisches Gleichgewicht einstellen kann. Dies führt dazu, dass sich zeitweilig oberhalb dieser verdeckten Fehler bis an die Oberfläche etwas höhere Temperaturen als in fehlerfreien Bereichen des Bauteils einstellen. Entsprechend dieser höheren Temperaturen wird auch ein höheres Maß an Wärmestrahlung freigesetzt, deren überwiegender Anteil im Bereich des thermischen Infrarots (1 – 14 µm) liegt. Diese sogenannten „hot spots“ werden dann mittels einer Infrarot-Kamera detektiert. In aller Regel wird nach Auslösung des Pulses nicht nur ein Einzelbild, sondern eine ganze Bildsequenz über ein PC-System digitalisiert und elektronisch aufgezeichnet. Grund hierfür ist, dass sich die Fehleranzeigen erst nach einer von der Fehlertiefe abhängigen Zeit während der Abkühlung des Prüfteils einstellen (siehe [1] Abschnitt 9.2).

Für den einfachsten Fall der anschließenden Fehleranalyse, der Temperaturbild- bzw. Thermogramm-Auswertung, wird eine Normierung der Bildsequenz durchgeführt. Hierzu wird für alle Pixel der Einzelbilder ein vor dem Puls aufgenommenes Nullbild abgezogen und diese Differenz durch ein frühes Bild der Sequenz nach dem Puls dividiert. Dadurch werden Unterschiede im Emissionsverhalten der Oberfläche weitestgehend eliminiert. Anschließend kann die Bildsequenz in verschiedenster Form auf Abweichungen vom idealen Abkühlverhalten untersucht werden. Nachteilig an dieser Vorgehensweise ist, dass bei der Analyse im Wesentlichen nur die Information eines Einzelbildes mit größtem Temperatur-Kontrast des Fehlers zur Anwendung kommt. Dieser Nachteil kann durch das Verfahren der Puls-Phase-Analyse umgangen werden. Der thermische Puls wird hierbei aufgefasst als eine Überlagerung von thermischen Wellen mit einer bestimmten Frequenz-Verteilung, die in das Prüfteilinnere laufen. Das grundlegende Prinzip der Puls-Phasenanalyse ist nun die Überführung der zeitabhängigen, thermischen Antwort des Prüfteils mittels Fourier-Entwicklung in den entsprechenden Frequenzbereich. Dazu wird für jedes Pixel die Fourier-Transformierte über die Gesamtdauer der Bildaufzeichnung berechnet. Ist N die Anzahl der Thermogramme der Bildsequenz und $n = 1, 2, \dots, N/2$ das Inkrement der Frequenz, dann errechnet sich die Fourier-Transformierte des n -ten Frequenzwertes zu:

$$F_n(x, y) = \sum_{k=0}^{N-1} T(k) \cdot e^{i2\pi kn/N} = \text{Re}(F_n) + i \text{Im}(F_n).$$

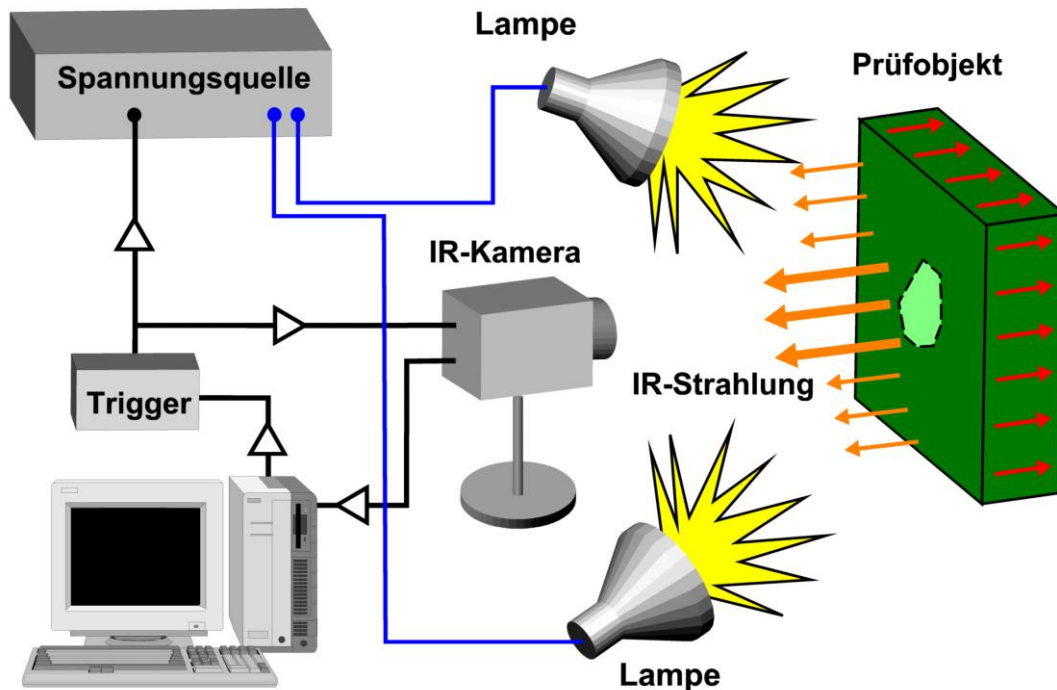


Bild 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der optischen Puls-Thermographie

Aus Imaginärteil und Realteil der Fourier-Transformierten wird anschließend ein Phasenwert Φ berechnet, der ein Maß für die Laufzeit der Wellen bis zum Fehler darstellt und ebenfalls graphisch dargestellt werden kann:

$$\Phi(x, y) = \arctan\left(\frac{\text{Im}(F_n(x, y))}{\text{Re}(F_n(x, y))}\right).$$

Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass praktisch die Information der gesamten Bildsequenz für die Analyse herangezogen und in einem einzigen Bild verdichtet wird. Hierdurch ergibt sich gegenüber der Temperaturbild-Auswertung eine höhere Nachweisempfindlichkeit und Nachweistiefe. Weitere Einzelheiten hierzu sind ebenfalls in [1] (Abschnitt 10.4) angegeben.

Die Untersuchungen wurden mit einer FLIR SC 3000 IR-Kamera durchgeführt. Diese Long Wave-IR-Kamera mit aktiv gekühltem GaAs-Quantum-Well-Detektor hat ihre maximale Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von 8 – 9 μm . Die nominelle thermische Auflösung der Kamera beträgt 30 mK bei 30 °C. Zur Bildaufzeichnung und anschließenden Analyse wurde ein PC-System mit ThermoLab-Software der Firma T-ZfP, Dinslaken verwendet. Für die optische Anregung der Prüfteile wurden Xenon-Blitzlampen verwendet, die jeweils eine Energie von 6 kJ in ca. 12 ms freisetzen.

Bei isotropen Werkstoffen ist ein thermographischer Nachweis von Fehlern möglich, wenn die Fehlertiefe ungefähr dem ein- bis anderthalbfachen der Fehlergröße entspricht [2]. Gegenüber konventionellen Werkstoffen mit isotropen Eigenschaften ergeben sich für die thermographische Prüfung von Faserverbundwerkstoffen Besonderheiten. Insbesondere bei CFK-Werkstoffen sind die Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit in Faserrichtung um ein Vielfaches größer als in Tiefenrichtung, so dass die Fehlernachweistiefen gegenüber isotropen Werkstoffen deutlich geringer ausfallen.

3. Ergebnisse

Es wurden in einem ersten Teil vergleichende Untersuchungen sowohl an monolithischen CFK-Proben sowie an Sandwichproben mit künstlichen Fehlern durchgeführt. Weitere Studien beinhalteten zerstörungsfreie Prüfungen an einer realen Luftfahrzeugkomponente aus Faserverbundmaterial. Zum Abschluss wurde eine Reparatur an einem CFK-Sandwichbauteil mit künstlichem Fehler untersucht.

3.1 Thermographische Prüfungen an monolithischen CFK-Proben mit künstlichen Fehlern

Ein erster Probensatz bestand aus monolithischen CFK-Platten mit künstlichen Fehlern. Die Platten wurden beim WIWEB in einem Laborautoklaven hergestellt. Das verwendete Prepreg-Material war Hexcel 8552/IM7 mit Einzellagen einer unidirektionalen Faserorientierung. Jede der Platten enthielt 48 Einzellagen und hatte eine Gesamtdicke von 6 mm. Der Aufbau der monolithischen Platten mit quasi-isotroper Laminat-Struktur entsprach der Lagenfolge $[[45/0/-45/90]_6]_s$. Es wurden verschiedene Arten von Proben mit realistischen Luftfahrzeugoberflächenaufbauten hergestellt:

- Aufbau 1:** CFK-Laminat, Dicke 6 mm
- Aufbau 2:** CFK-Laminat, Dicke 6 mm mit zusätzlicher Kupfergewebe-Lage
- Aufbau 3:** CFK-Laminat, Dicke 6 mm mit zusätzlicher Kupfergewebe-Lage, GFK-Einzellage und Lackschicht mit ca. 50 µm Dicke

Die Untersuchungen an Proben mit Aufbau 2 und 3 wurden durchgeführt, um den Einfluss von Kupferblitzschutzgewebe und Lackschichten auf die Nachweisempfindlichkeit des Thermographie-Verfahrens festzustellen. Es wurde vermutet, dass durch diese zusätzlichen Oberflächenlagen die Nachweisfähigkeit von Fehlern mit abnehmender Fehlergröße und zunehmender Fehlertiefe deutlich reduziert wird. Jede der Laminat-Platten enthielt Fehler in Form von Flachboden-Bohrungen in Matrix-Anordnung (siehe Bild 2). Die Bohrungen hatten vier verschiedene Durchmesser von 5, 10, 15 und 20 mm. Zwei verschiedene Plattentypen mit unterschiedlichen Fehlertiefen wurden hergestellt. **Typ A** enthielt Fehler mit Tiefen von 0,5 mm bis 2,5 mm und **Typ B**-Fehler in Tiefen von 3,0 bis 5,5 mm unter der Oberfläche.

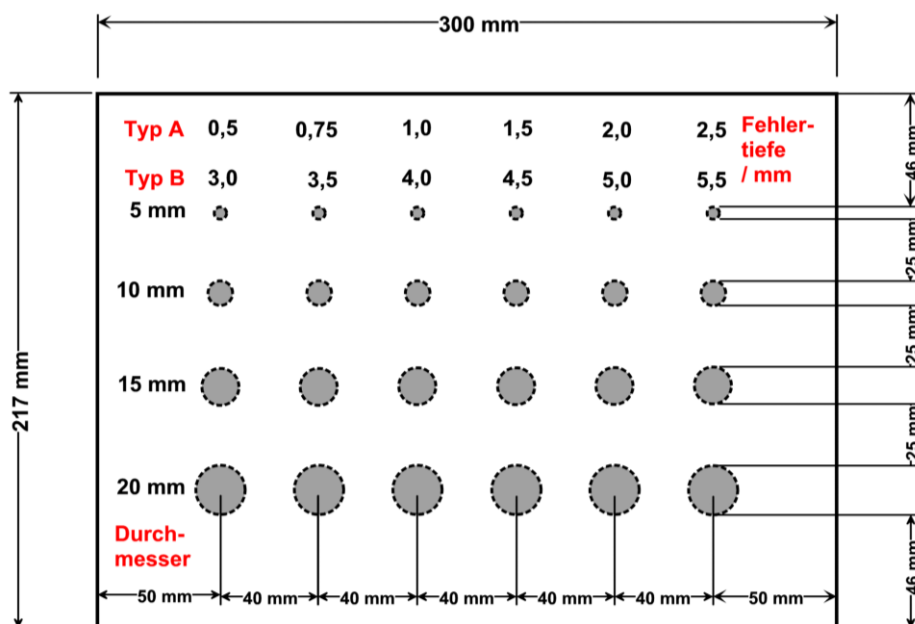


Bild 2: Anordnung der Flachbodenbohrungen in CFK-Platten

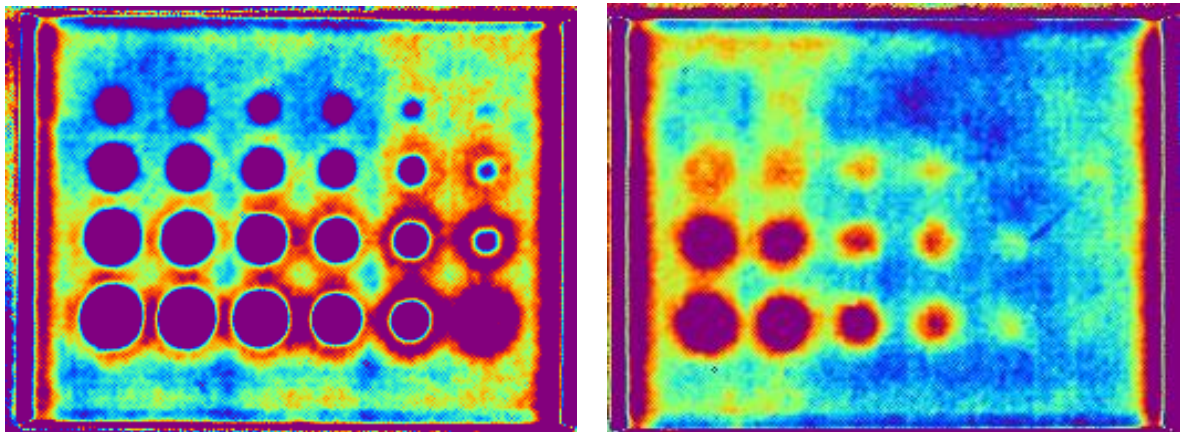


Bild 3: Phasenbilder der CFK-Platten mit Aufbau 1; links Typ A und rechts Typ B

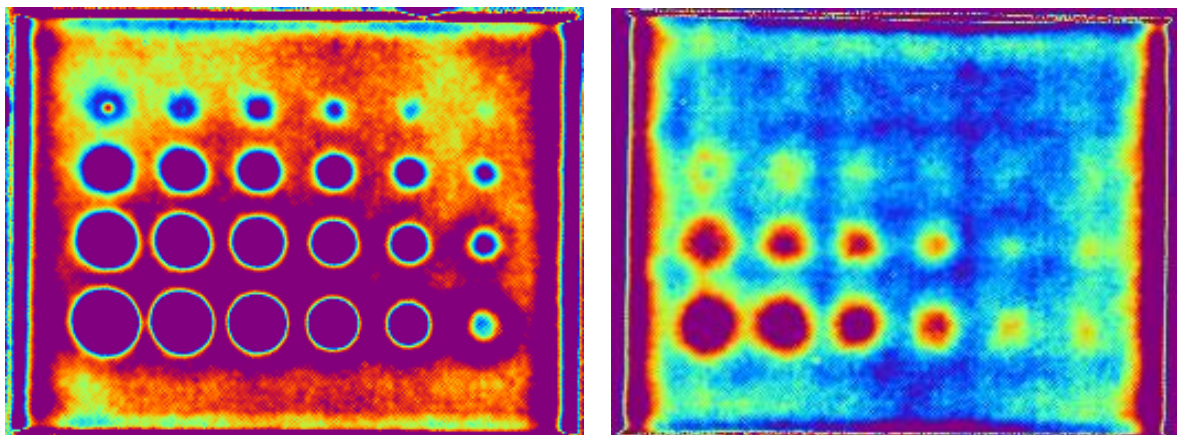


Bild 4: Phasenbilder der CFK-Platten mit Aufbau 2; links Typ A und rechts Typ B

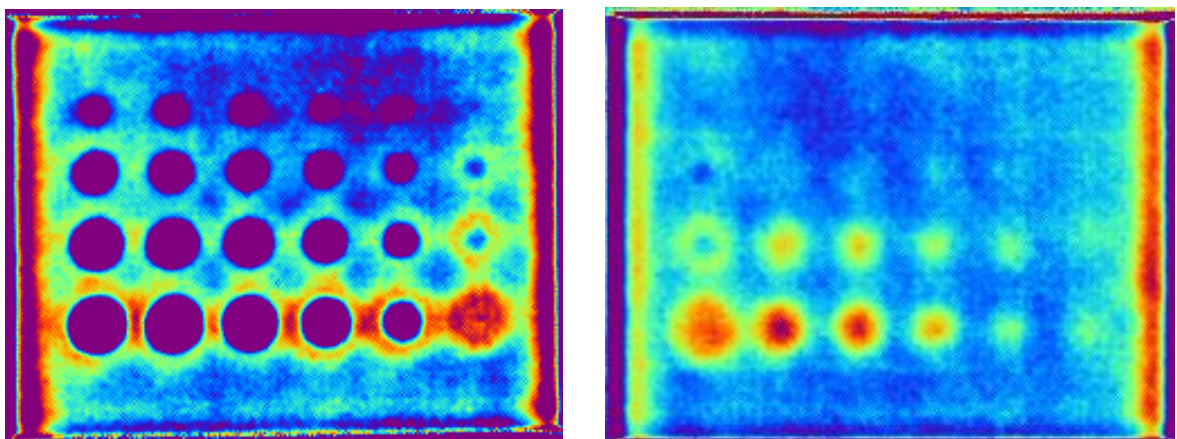


Bild 5: Phasenbilder der CFK-Platten mit Aufbau 3; links Typ A und rechts Typ B

Bild 3 bis 5 stellt die Ergebnisse der entsprechenden thermographischen Untersuchung mit der Puls-Phasenanalyse dar. Die Untersuchung zeigt für alle Strukturen eine vergleichsweise gute Nachweisbarkeit der eingebrachten Fehler. Wie erwartet und deutlich erkennbar nimmt die Nachweisbarkeit der Fehler mit zunehmender Fehlertiefe und abnehmender Fehlergröße schnell ab. Je tiefer und kleiner der Fehler, desto geringer ist die erreichbare Nachweistiefe und umso schwächer werden die Anzeigen. Darüber hinaus ist ein gewisser Einfluss der zusätzlichen Oberflächenlagen erkennbar. Für alle drei Typ A-Platten waren stets alle Fehler bis 2,5 mm Tiefe nachweisbar, unabhängig vom Oberflächenaufbau. Für die Platten mit Aufbau 2 ergibt sich erstaunlicherweise nahezu keine Veränderung der Anzeigen im Vergleich zu Aufbau 1. Das zusätzliche Kupfer-Blitzschutzgewebe führt trotz

hoher Wärmeleitfähigkeit zu keiner Verschlechterung der Anzeigen der 15 mm und 20 mm großen Fehler im Vergleich zu den Platten ohne Blitzschutz. Eine zusätzliche Lage Cu-Blitzschutzgewebe zeigte also keinen nachteiligen Effekt auf die Nachweistiefe dieser Fehler. Im Gegenteil werden bei den Typ B-Platten sogar noch Fehler von 15 und 20 mm Durchmesser in 5,5 mm Tiefe festgestellt, während der Nachweis dieser Fehler bei der Platte ohne Cu-Gewebe auf Tiefen von 5,0 mm beschränkt war. Ursache hierfür sind vermutlich Fertigungstoleranzen. Fehler mit 10 mm Durchmesser liefern ohne Blitzschutzgewebe Anzeigen bis 4,5 mm, mit Blitzschutzgewebe bis 4,0 mm Tiefe und sind bei zusätzlicher Lackschicht gar nicht mehr sichtbar. Generell können mit der Puls-Phasenanalyse Fehler mit 5 mm Durchmesser bei Typ B-Platten nicht mehr nachgewiesen werden. Hier scheint eine grundsätzliche physikalische Grenze erreicht zu sein.

3.2 Untersuchung von CFK-Sandwich-Proben

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit stellt die Untersuchung von CFK-Sandwich-Proben mit künstlichen Fehlern dar. Die verwendeten Proben enthielten einen Wabenkern aus Nomex HRH 1/83.0 mit einer Dicke von 16 mm. Die Vorderseite des Verbunds bestand aus zwei und die Rückseite aus drei Einzellagen des Materials Hexcel M18-1/G939 mit der Lagenfolge [0/0] bzw. [0/45/0]. Die Stärke einer Einzellage betrug 0,25 mm. Es wurden folgende Fehler eingebracht:

- | | |
|--------------------------------|--|
| (1) Kleber, Vorderseite: | kreisförmige Aussparungen mit Durchmessern von 5, 10, 20, 30, 40 and 50 mm; |
| (2) Wabenkern, vordere Hälfte: | kreisförmige Wabenkerneinsätze mit Durchmessern von 5, 10, 20, 30, 40 and 50 mm an der Vorderseite des Kerns, nur mit vorderem Laminat verklebt; |
| (3) Wabenkern, hintere Hälfte: | kreisförmige Wabenkerneinsätze mit Durchmessern von 5, 10, 20, 30, 40 and 50 mm an der Hinterseite des Kerns, nur mit hinterem Laminat verklebt; |
| (4) Kleber, Hinterseite: | kreisförmige Aussparungen mit Durchmessern von 5, 10, 20, 30, 40 and 50 mm. |

In Bild 6 links ist die Lage der Fehler im Probenquerschnitt dargestellt, während Bild 6 rechts die Größe und Anordnung der einzelnen Fehler beschreibt. Bild 7 und 8 gibt die Fehleranzeigen im Phasenbild für die vier verschiedenen Fehlerlagen wieder. Deutlich erkennbare Anzeigen für alle Durchmesser sind nur für Fehler im vorderseitigen Kleber erkennbar, während die Fehler im Wabenkern nur sehr schwach und auch nur für die beiden größten Durchmesser erkennbar sind. Keinerlei Anzeigen sind für die Fehler im rückseitigen Kleber der Sandwichstruktur nachweisbar.

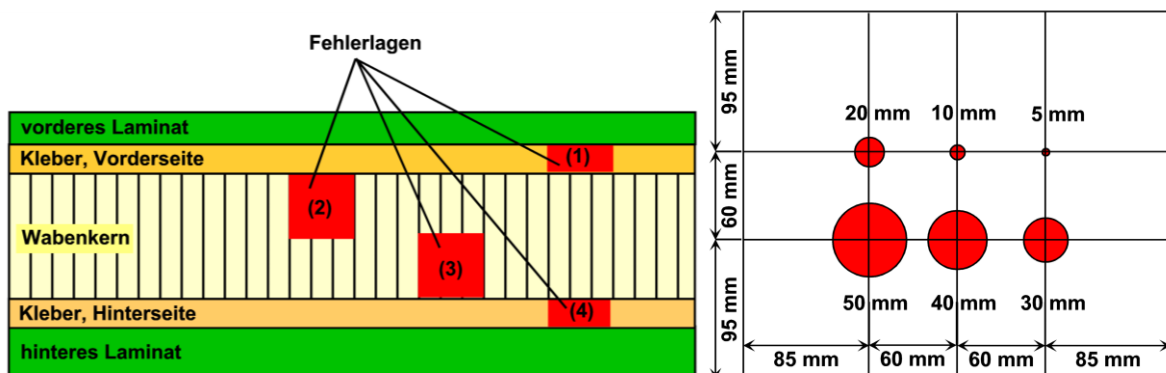


Bild 6: Verschiedene Fehlerlagen (rot) in CFK-Sandwichproben mit Nomex-Wabenkern

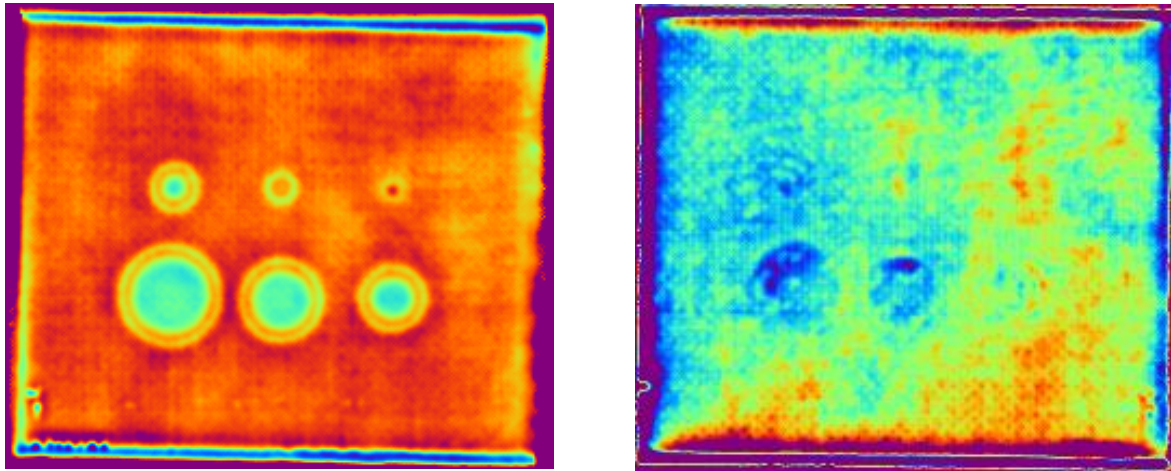


Bild 7: Fehleranzeigen: links Fehler im vorderseitigen Kleber, rechts Fehler im vorderen Wabenkern

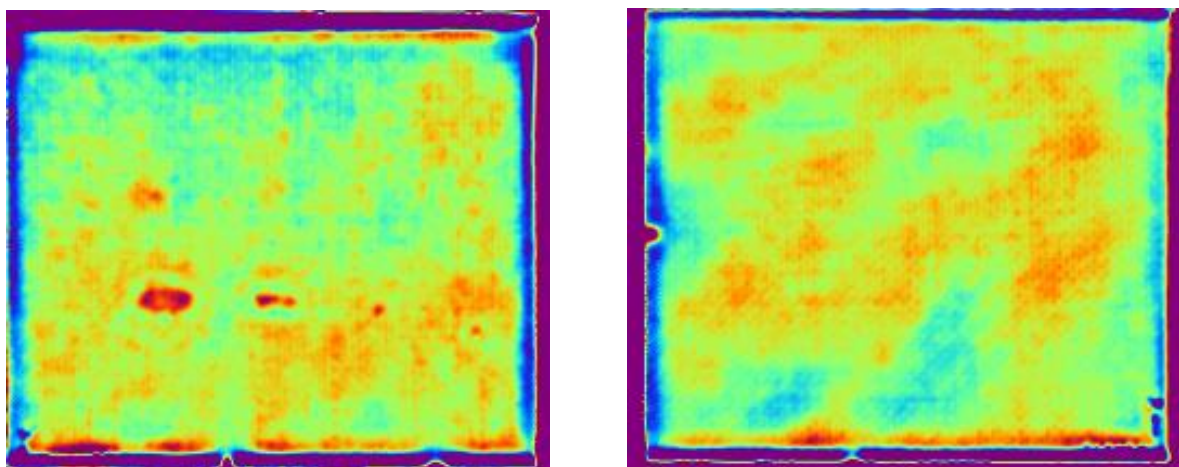


Bild 8: Fehleranzeigen: links Fehler im hinteren Wabenkern, rechts Fehler im hinteren Kleber

3.3 Untersuchung einer Hauptfahrwerksklappe mit Schlagschaden

Neben Prüfungen von Proben mit künstlichen Fehlern sollen in diesem Beitrag auch Ergebnisse der thermographischen Prüfung an einer realen Luftfahrzeugkomponente gezeigt werden. Bild 9 links zeigt eine Hauptfahrwerksklappe aus monolithischem CFK in der Gesamtansicht. Dieses Prüfteil weist einen Schlagschaden auf, der im rechten Teil von Bild 9 in der Vergrößerung zu sehen ist. Der Schadensbereich ist im Bild durch eine rote Linie markiert. Das Ausmaß des Schadens wurde vor der thermographischen Prüfung durch eine manuelle Ultraschallprüfung identifiziert.

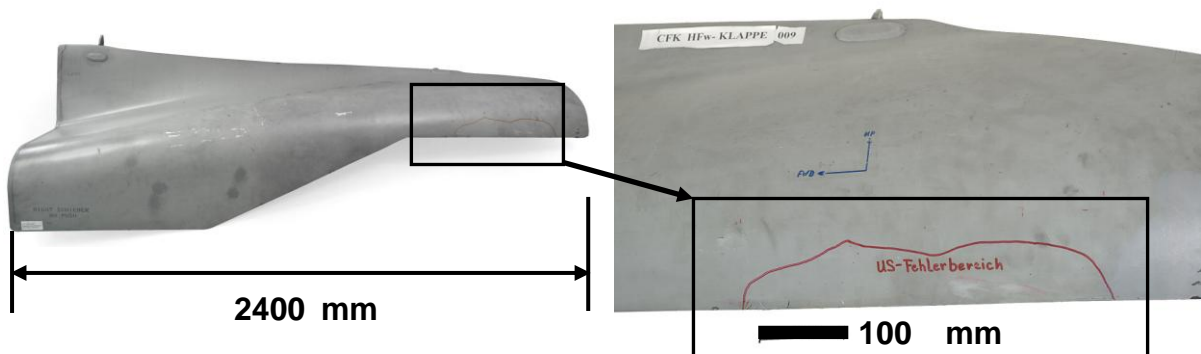


Bild 9: links: Gesamtübersicht der Hauptfahrwerksklappe; rechts: Detailbild mit Bereich des Schlagschadens

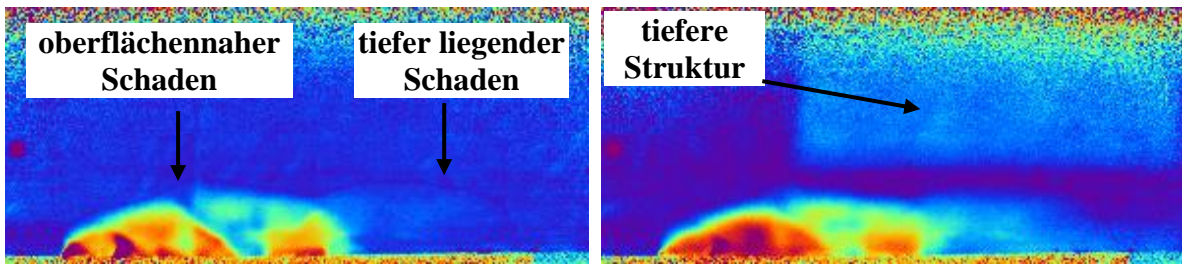


Bild 10: Thermogramme der Schadensfläche; links frühes Bild der Sequenz; rechts spätes Bild der Sequenz

Die Ergebnisse der thermographischen Untersuchung sind in Bild 10 dargestellt. Es wird hier nur die Thermogramm-Darstellung gewählt und auf eine Phasenanalyse verzichtet, um das Zeit-Temperatur-Verhalten des Schadens zu beschreiben. Hierüber lassen sich qualitative Aussagen zur Tiefenlage des Schadens machen. Man erkennt eine sehr gute Übereinstimmung der mit Puls-Thermographie und Ultraschall-Verfahren erzielten Ergebnisse. Größe und Form der identifizierten Schadensfläche stimmen bei beiden Verfahren sehr gut überein. Die thermographische Prüfung zeigt zu einem frühen Zeitpunkt der Abkühlung nur für den linken Teil des Prüfbereichs ausgeprägte Anzeigen (linkes Teilbild). Erst im weiteren Verlauf der Abkühlung erscheinen schwache Anzeigen auch für die rechte Restfläche (rechtes Teilbild). Dies bedeutet, dass die entsprechenden Schäden in einer größeren Werkstofftiefe liegen als die Schäden links davon.

3.4 Untersuchung von klebtechnischen Reparaturen

Als ein lohnendes Anwendungsgebiet thermographischer Prüfung erscheint auch die Untersuchung klebtechnischer Reparaturen. Erste Versuche im WIWEB zu diesem Thema zeigen ein gewisses Potenzial dieses Verfahrens [3]. Bild 11 links zeigt den schematischen Aufbau einer Modell-Reparatur für eine Sandwich-Struktur mit Wabekern. Der dargestellte Reparaturtyp dient der Ausbesserung von Schlagschäden am Sandwichverbund, die nur am vorderen Laminat bzw. im Wabekern auftreten, jedoch nicht am rückseitigen Laminat. Das verwendete Faserverbundmaterial entsprach dem bereits in Abschnitt 3.2 verwendeten Material. Der hypothetische Schaden wurde ausgebessert, indem an der Schadstelle das vordere Laminat und der Wabekern ausgebohrt wurden. Anschließend wurde ein kreisförmiges Stück Wabekern in die Bohrung eingesetzt und über ein zuvor eingelegtes Klebsegment Klebefolie mit dem rückseitigen Laminat verklebt. Auf die Vorderseite wurde ein ebenfalls kreisrunder, zweistufiger Reparaturflecken, ein sogenanntes Patch, über ein weiteres Segment Klebefolie mit dem eingesetzten Wabekern und dem vorderen Laminat verklebt. Der Außendurchmesser des Patches betrug 48 mm, der Innendurchmesser 39 mm.

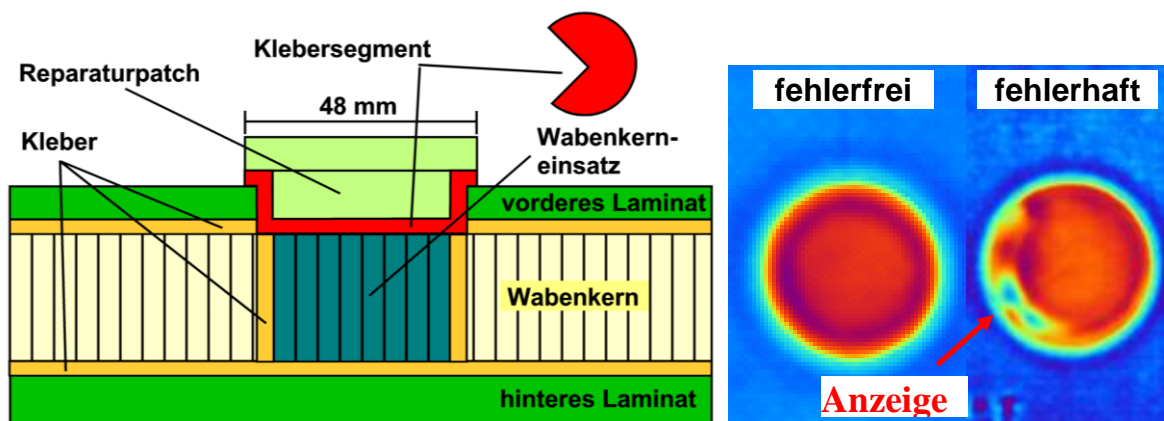


Bild 11: links: schematischer Aufbau der Reparatur; rechts: Phasenbild von fehlerfreier/fehlerhafter Reparatur

Ein künstlich erzeugter Reparaturfehler wurde durch die Einlage eines $\frac{3}{4}$ -Kreis-Segments erzeugt. Bei der Erwärmung der Reparaturstelle führte die Aufschmelzung des Klebersegments zu einer fehlerhaften Anbindung zwischen Wabenkerneinlage und Reparaturpatch. Ähnliche Reparaturen wurden für die unzugängliche Rückseite durchgeführt.

Die puls-thermographische Prüfung dieser fehlerhaften Reparaturklebung zeigt Bild 11 rechts im direkten Vergleich zu einer fehlerfrei ausgeführten Reparatur. Es wird im Phasenbild eine deutlich ausgeprägte Anzeige im Randbereich der Fleckens sichtbar, die auf eine unzureichende Anbindung des Wabeneinsatzes an das Reparaturpatch hinweist. Entsprechende, auf der Rückseite zwischen Wabenkern und Laminat befindliche Klebefehler konnten nicht nachgewiesen werden (hier nicht abgebildet).

4. Diskussion

Die zuvor präsentierten Ergebnisse belegen insgesamt eine gute Eignung der Puls-Phasen-Thermographie für den Nachweis von Schäden in CFK-Faserverbundwerkstoffen. Grundsätzlich ist der Nachweis von Schäden aufgrund der ausgeprägten, lateralen Wärmeleitfähigkeit auf oberflächennahe Bereiche begrenzt. Die Detektierbarkeit von Schäden nimmt drastisch mit zunehmender Fehlertiefe und abnehmender Fehlergröße ab. Trotzdem konnten in 6 mm dicken, monolithischen CFK-Platten für realistische Schadensgrößen mit 15 und 20 mm Durchmesser je nach Oberflächenaufbau Nachweistiefen von 5 – 5,5 mm erreicht werden. Dem entsprach ein Durchmesser-zu-Tiefen-Verhältnis von ca. 3 bzw. 4 zu 1. Dabei war auffällig, dass ein Cu-Blitzschutzgewebe an der Oberfläche die Detektierbarkeit kaum beeinflusste. Offensichtlich wurde der laterale Wärmefluss durch das Kupfergewebe weniger stark beeinflusst als zunächst vermutet. Die vom Cu-Gewebe unbedeckte CFK-Fläche reichte aus, um eine hinreichende Energieabsorption und Wärmeableitung ins Werkstoffinnere zu gewährleisten. Erst durch den Auftrag eines Lackschichtsystems wurden die Fehlernachweistiefe und der Bildkontrast durch das Auftreten zusätzlicher Grenzflächen im Bauteil deutlich verschlechtert. Zur Gewährleistung einer hohen Fehlerauffindwahrscheinlichkeit wird es daher zukünftig unumgänglich sein, lackierte CFK-Flächen für die thermographische Prüfung zu entlacken. Die prinzipielle Eignung des Thermographie-Verfahrens zum Nachweis von Schäden in monolithischen Strukturen konnte ferner durch Nachweis eines Schlagschadens an einer Hauptfahrwerksklappe gezeigt werden. Die sehr gute Übereinstimmung des Ergebnisses mit dem einer aufwändigen Ultraschallprüfung bedarf keiner weiteren Diskussion.

Weitere Prüfungen an CFK-Sandwich-Proben mit Wabenkern zeigten ebenfalls eine akzeptable Leistungsfähigkeit im Hinblick auf den Nachweis von Schäden im Bereich der zugänglichen Oberfläche. Eine unzureichende Verklebung zwischen vorderem Laminat und Wabenkern wurde selbst für kleinste Bereiche von 5 mm Durchmesser zuverlässig angezeigt. Jedoch nahm die Detektierbarkeit von Schäden in verschiedenen Bereichen des Wabenkerns deutlich ab und ein Nachweis von Anbindungsfehlern zwischen Wabenkern und rückwärtigem Laminat erscheint nach gegenwärtigem Stand der Untersuchungen nicht möglich. Der Grund hierfür ist in der strukturbedingten, auf die Wabenwände begrenzten Wärmeleitung zu sehen, die nur zu einer unzureichenden Erwärmung des Prüfteils in der Tiefe führt. Dementsprechend kann sich bei tieferliegenden Fehlern kein ausreichender Temperaturkontrast zwischen fehlerbehafteten und fehlerfreien Bereichen ausbilden. Ferner dürfte auch die Anordnung von mehreren übereinanderliegenden Grenzflächen im Verbundwerkstoff dem Verfahren beim Nachweis von tiefliegenden Fehlern grundsätzliche, physikalische Grenzen setzen. Dies gilt gleichermaßen für die Untersuchung von fehlerbehafteten, klebtechnischen Reparaturen an CFK-Sandwichstrukturen. Auch hier waren Klebefehler im Wesentlichen nur an der zugänglichen Vorderseite, nicht jedoch an den Rückseiten des Werkstoffverbunds nachweisbar. Der Vergleich zwischen einer fehlerfreien und

einer fehlerbehafteten Reparaturklebung auf der Vorderseite ergab bei letzterer eine deutliche Anzeige. Der Nachweis einer fehlerhaften Anbindung zwischen Reparaturpatch und Wabenkern erscheint daher mit Puls-Thermographie prinzipiell möglich.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag untersuchte die Anwendbarkeit des Puls-Thermographie-Verfahrens mit Puls-Phasenanalyse zur zerstörungsfreien Prüfung von Faserverbundstrukturen. Es zeigte sich, dass mit diesem Verfahren insbesondere an monolithischen CFK-Strukturen beim Nachweis von oberflächennahen Fehlern zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden können. Die Untersuchung von Sandwich-Komponenten mit Wabenkern ergab sehr gute Ergebnisse für den Nachweis von Fehlern zwischen Decklaminat und Wabenkern. Fehler im Wabenkern mit für die Luftfahrt realistischen Größen konnten ebenfalls gut erkannt werden. Das Verfahren bietet daher insgesamt betrachtet eine gute Möglichkeit, oberflächennahe Schädigungen, wie sie beispielsweise bei Schlagschäden entstehen, schnell und qualitativ nachzuweisen. Diese Fähigkeit wurde an einer echten Luftfahrzeugkomponente, einer Hauptfahrwerksklappe, beispielhaft nachgewiesen.

Ferner wurden Untersuchungen an klebtechnischen Reparaturen von CFK-Verbundwerkstoffen durchgeführt. Hierbei zeigte sich in ersten Studien, dass mit dem verwendeten Puls-Verfahren der Nachweis einer unzureichenden Verklebung zwischen Reparaturpatch und Wabenkern möglich ist. Für den thermographischen Nachweis von Reparaturfehlern im Wabenkern und an der Rückseite des Verbundes werden vermutlich andere Mechanismen der Wärmeerzeugung, wie zum Beispiel die Einleitung von Leistungsschall u. a., günstiger sein. Die thermographische Qualitätskontrolle von klebtechnischen Reparaturen an Faserverbundwerkstoffen und die Lösung damit verbundener Probleme ist daher ein aktueller Forschungsschwerpunkt im WIWEB.

Referenzen

- [1] Xavier P. V. Maldague: Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing; John Wiley & Sons, Inc.; New York 2001
- [2] Vavilov V.P., Taylor R.: "Theoretical and practical aspects of the thermal non-destructive testing of bonded structures"; in Sharpe R. S.: Research Techniques in Nondestructive Testing, 5: Seite 238 –279, 1982
- [3] Deus, B.: "Zerstörungsfreie Prüfung definiert geschädigter faserverstärkter Sandwichstrukturen"; Diplomarbeit im Fachbereich Maschinenbau der Universität der Bundeswehr München, 2007