

Kosteneffiziente phasenmodulierte Thermographie zur Schadensdetektion an flachen und stark gekrümmten Bauteilen aus CFK

Martin PERTERER^{*}, Franz HÖCHTL^{**}, Horst BAIER^{*}, Veit SENNER^{**}

^{*} Lehrstuhl für Leichtbau, TU München, Boltzmannstr. 15, 85747 Garching

^{**} Fachgebiet für Sportgeräte und Materialien, TU München, Boltzmannstr. 15, 85747 Garching

Kurzfassung. Zerstörungsfreie Prüfmethoden (ZfP¹) spielen sowohl im Luft- und Raumfahrtbereich als auch in der Automobilindustrie sowie bei Hochleistungssportgeräten eine wichtige Rolle. In vielen Anwendungen kommen dabei stark gekrümmte Strukturen zum Einsatz, welche für die zerstörungsfreie Prüfung eine spezielle Herausforderung darstellen. In dieser Arbeit wird ein zweistufiges phasensensibles Thermographiesystem vorgestellt, welches diese Anforderungen erfüllt, indem es die Vorteile von konventionellen Lock-In Methoden – hohe Defektsensibilität bei Minimierung der Störeinflüsse – mit den Vorteilen robuster, auf einmaliger Anregung basierender Systeme – Hohe Effizienz bei moderaten Kosten – kombiniert. Zur Qualifizierung des Systems wird eine Testplatte aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) mit unterschiedlichen künstlich eingebrachten Fehlstellen verwendet, wobei ein Vergleich mit den Ergebnissen alternativer ZfP Methoden angestellt wird. Abschließend wird die Anwendbarkeit des vorgestellten Systems auf stark gekrümmte Rohrstrukturen mit entsprechenden Fehlstellen gezeigt.

1. Motivation

Durch den vermehrten Einsatz von Faserverbundmaterialien in den unterschiedlichsten Industriezweigen ist der Bedarf an zerstörungsfreien Prüfverfahren in stetigem Wachstum begriffen. Während in früheren Jahren der Trend dieser Prüfsysteme durch die Steigerung der Sensibilität hin zu Submillimeterfehlstellen erfolgt ist, beobachtet man nun vermehrt einen Bedarf nach robusten und kosteneffizienten Systemen mit für die Detektion von relevanten Fehlstellen ausreichender Sensibilität. Viele im Labor eingesetzte und erfolgreich erprobte Systeme bieten zwar die geforderte Detektionsgenauigkeit und gehen in vielen Fällen sogar darüber hinaus, stellen allerdings einen erheblichen Invest dar.

In dieser Arbeit wird das Augenmerk auf die Gruppe der Thermographiemethoden (nachzulesen beispielsweise in [1] [2] oder [3]) gelegt. Im speziellen wird die Lock-In Thermographie [4] detailliert untersucht und eine Methode daraus abgeleitet, welche durch eine Aufhebung der Kopplung zwischen Datenaufzeichnung und Anregung bei gleichzeitiger Verwendung von kostengünstigen Komponenten bzw. geeigneter

¹ Neben der deutschsprachigen Abkürzung *ZfP* wird in vielen Fällen die englischsprachige gleichbedeutende Abkürzung *NDI* (engl. für „Non Destructive Inspection“) verwendet.

Auswertungsalgorithmen die zuvor geforderten Eigenschaften aufweist. Diese Vorgehensweise wird im Folgenden als zweistufige phasensensible Thermographie bezeichnet.

2. Phasenverschiebungsbasierte Thermographie Systeme

Zunächst soll die Funktionsweise der Lock-In Methode genauer beschrieben werden, um daraus die nötigen Schritte zum Aufbau eines entkoppelten Systems ableiten zu können.

2.1 Konventionelle Lock-In Systeme

Die zentrale Steuerungs- und Regeleinheit wird als Lock-In Modul bezeichnet, welches neben der Steuerung und Aufzeichnung der thermischen Signale die Regelung der Anregungsquelle und deren Synchronisation mit der Datenaufzeichnung übernimmt.

Durch das Aufbringen eines definiert modulierten thermischen Signals auf die Bauteiloberfläche wird eine Absorption auf der Bauteiloberfläche hervorgerufen, welche proportional zur eingebrachten Wärmeleistung ist. Diese Absorption führt ihrerseits zu einer Generierung einer thermischen Welle, welche sich ins Bauteilinnere in Form einer Kugelwelle ausbreitet. Trifft diese Welle auf eine Grenzfläche zwischen zwei Materialien, so kommt es zu einer Teil- bzw. Vollreflektion der Welle. Der Grad der Reflektion hängt dabei vom Reflektionskoeffizienten R_{12} ab, welcher seinerseits von den thermischen Impedanzen Z_i der angrenzenden Materialien und dem Kontaktwiderstand W_k gemäß folgender Gleichung [5] abhängt.

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1 + W_k}{Z_2 + Z_1 + W_k} \quad (1)$$

Der Reflektionskoeffizient R_{12} stellt eine komplexe Größe dar, was in weiterer Folge impliziert, dass die reflektierte Welle in Abhängigkeit von der vorliegenden Grenzfläche sich sowohl in der Amplitude als auch in der Phasenlage relativ zur Ursprungswelle unterscheiden kann. Tritt die reflektierte Welle an die Bauteiloberfläche, so interferiert sie mit der eintreffenden Welle und es ergibt sich eine resultierende, an der Bauteiloberfläche messbare thermische Welle. Durch einen Vergleich mit der am Bauteil aufgetragenen thermischen Welle lassen sich nun Rückschlüsse auf Fehlstellen im Bauteilinneren ziehen.

In konventionellen Prüfverfahren wird die auf der Bauteiloberfläche aufgetragene Welle in der Regel gemessen und zurückgeführt, um ein Anregungssignal hoher Güte – und hier in den meisten Fällen ein Sinussignal – zu realisieren, wodurch effiziente Algorithmen zur Berechnung der Phasen- und Amplitudenänderung eingesetzt werden können. Da diese Regelung zusammen mit der Kopplung der Anregungsquelle und des Detektors einen wesentlichen Kostenfaktor des Gesamtsystems bildet, wird versucht, auf die Regelung der Anregungsquelle zu verzichten und die Kopplung aufzuheben.

2.2 Zweistufige phasenmodulierte Thermographie

Unter dem Hintergrund der Kostenreduktion werden die einzelnen Bestandteile eines konventionellen Lock-In Systems analysiert und wenn erforderlich verändert bzw. adaptiert. So wird beispielsweise die Anregungsquelle bzw. deren Steuerung neu konzipiert. Neben dem Wegfall der Lock-In Einheit werden die Softwareroutinen zur Datenreduktion, Datenaufbereitung und Datenauswertung entsprechend angepasst und erweitert.

2.2.1 Prinzipieller Aufbau

Der prinzipielle Aufbau des neu konzipierten Systems ist in Abbildung 1 zu sehen. Auf der linken Seite ist der erste Block, nämlich die Datenaufzeichnung, dargestellt, während auf der rechten Seite die anschließende Datenverarbeitung bzw. die Datenauswertung abgebildet ist.

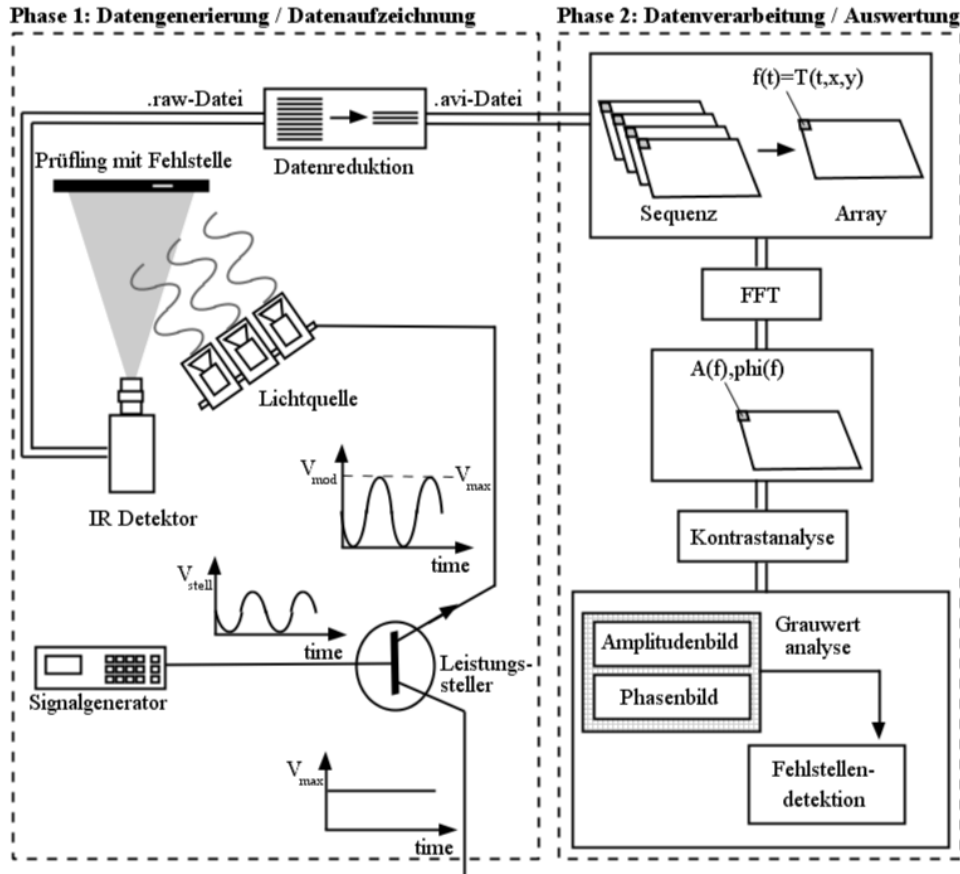


Abbildung 1. Prinzip der zweistufigen phasenmodulierten Thermographie [7]

Die Anregungsquelle (Lichtquelle) wird dabei über den Leistungssteller gespeist, wobei die Spannung durch eine Phasenanschnittsteuerung variiert wird, was in einer Variation der zugeführten Wechsellspannungsleistung der thermischen Strahler resultiert. Das Steuersignal der Leistungssteller wird dabei von einem Signalgenerator geliefert, wobei das Trägersinussignal stufenlos in der Frequenz einstellbar ist. Die flächige Aufzeichnung des zeitabhängigen Oberflächensignals erfolgt mit einem IR Detektor. Die Rohdaten werden in ein geeignetes Videoformat konvertiert, was in einer Datenreduktion resultiert, welche wiederum die Auswertung in großem Maße erleichtert bzw. beschleunigt. Die Aufzeichnungsrate des Detektors wird in Abhängigkeit des aufgebrauchten Sinussignals bzw. dessen Frequenz variiert. Somit ist die Datenmenge bei unterschiedlichen Frequenzen größtenteils konstant.

Nach der Datenreduktion beginnt der Prozess der Datenverarbeitung bzw. Datenauswertung. Zunächst muss die aufgezeichnete thermische Sequenz in geeigneter Weise konvertiert werden, um pixelbezogene Temperaturverläufe $T(t,x,y)$ darstellen zu können, welche in weiterer Folge in Analogie zu konventionellen Lock-In Systemen mittels einer numerisch stabilen Fourier Transformation, der *Fast Fourier Transformation (FFT)* [4] in Frequenzspektren überführt werden. Diese Spektren werden in der Umgebung der

Lock-In Frequenz ausgewertet und die Phasen- und Amplitudeninformation ($A(f)$, $\phi(f)$) extrahiert. Nach einer geeigneten Kontrastanalyse können Amplituden und Phasenbilder erstellt werden.

Im Anschluss daran findet eine Grauwertanalyse bzw. entsprechende Bildbearbeitung statt, um Fehlstellen aus den Rohbildern zu extrahieren, diese zu detektieren, zu gruppieren und statistisch auszuwerten. Dieser Vorgang wird in Kapitel 4 detailliert beschrieben.

2.2.2 Charakterisierung des Anregungssignals

Um die Ergebnisse auswerten und interpretieren zu können, ist es zunächst notwendig, das an der Bauteiloberfläche generierte thermische Signal zu charakterisieren, da wie zuvor beschrieben es sich lediglich um eine Leistungssteuerung nicht aber um einen rückgeführten Regelkreis handelt.

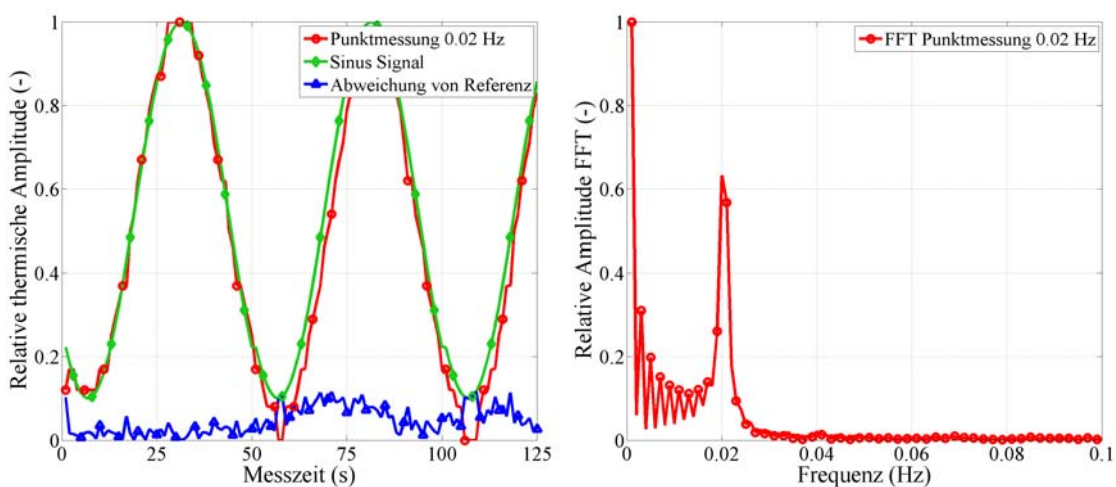


Abbildung 2. links: Punktmessung des zeitlich veränderlichen Temperaturverlaufes bei 0,02Hz; rechts: Frequenzspektrum des Signals

In Abbildung 2 ist beispielhaft das Ergebnis einer punktuellen Messung an einer Probenplatte aus CFK mit 4 mm Dicke und einem orthotropen Lageraufbau bei einer Anregungsfrequenz von 0,02 Hertz zu sehen. Links ist das Zeitsignal der Punktmessung dargestellt, wobei dieses mit einem perfekten Sinussignal mit angepasster Amplitude verglichen wird. Die punktuelle Abweichung der Amplitude, welche die mit Dreiecken markierte Linie darstellt, beträgt maximal 10 %, wobei die durchschnittliche Abweichung mit 4,65% beziffert wird. Die Frequenzgenauigkeit des gemessenen und theoretisch simulierten Signals ist dabei zu vernachlässigen.

In Abbildung 2 rechts ist das Frequenzspektrum des gemessenen Signals zu sehen, wobei ein deutlicher Peak im Bereich der Anregungsfrequenz zu verzeichnen ist. Der Ausschlag im niederfrequenten Bereich um 0 Hertz ist der Tatsache geschuldet, dass das gemessene Sinussignal einen konstanten Anteil aufweist, was eine Verschiebung gegenüber der Nulllinie bedeutet. Da dieser Bereich für die Auswertung nicht relevant ist und diese auch nicht negativ beeinflusst, wird zu Gunsten eines effektiven Auswertalgorithmus auf eine Signalanpassung bzw. eine Reduktion dieses Störeinflusses verzichtet.

3. Defektsensitivität

Nachdem die Güte des Anregungssignals bewertet ist, wird im nächsten Schritt die Defektsensitivität des Systems charakterisiert. Zu diesem Zweck soll unter anderem eine

Probenplatte aus CFK verwendet werden, welche unterschiedliche künstlich eingebrachte Fehlerarten und Fehlergeometrien beherbergt.

3.1 CFK Probenplatte mit künstlich eingebrachten Fehlstellen

Die zur Bestimmung der Defektsensitivität verwendete Probenplatte aus CFK weist einen Lagenaufbau von [(0/90)7/0/(90/0)7] bei einer Gesamtdicke von 4 mm auf (dargestellt in Abbildung 3).

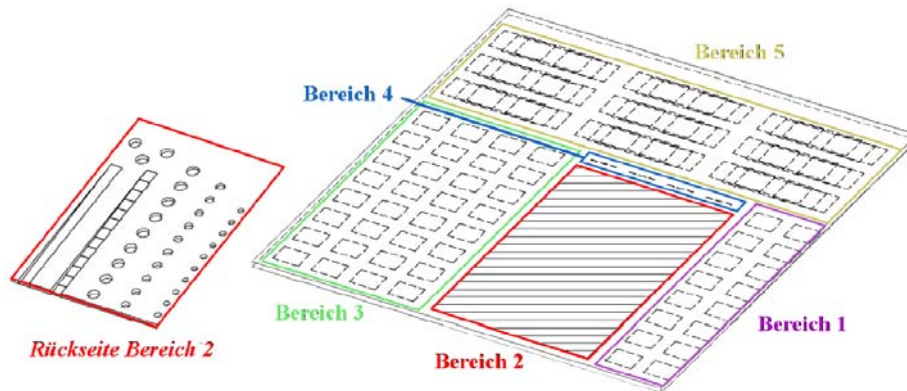


Abbildung 3. Schematischer Aufbau der Probenplatte mit künstlich eingebrachten Fehlstellen [7]

Sie kann in fünf unterschiedliche Bereiche eingeteilt werden, welche jeweils verschiedene Fehlergeometrien des gleichen Fehlertyps beinhalten. Im ersten Bereich sind durch einlamierte und teilweise entfernte (äußere Reihe) PTFE Folien simulierte Delaminationen in unterschiedlicher Tiefe vorhanden. Dieses Vorgehen wird meist für die Qualifizierung akustischer Verfahren verwendet. Der Bereich zwei weist durch mechanisch rückseitige Bearbeitung unterschiedlicher Geometrie ebenfalls simulierte Delaminationen (drei Bohrungsreihen unterschiedlichen Durchmessers und unterschiedlicher Tiefe) sowie einen Stufenkeil und einen kontinuierlichen Keil auf. Diese alternative Vorgehensweise wird in der Regel für thermische Systeme genutzt, um Grenzflächen zu schaffen, welche im Vergleich zu Delaminationen ähnliche Eigenschaften aufweisen. Darüber hinaus sind drei rückseitige Sacklochbohrungen (oben links) vorhanden, welche mit Epoxidharz gefüllt sind und Harzansammlungen bzw. das Fehlen von Fasern darstellen.

Im dritten Bereich befinden sich interlaminare Einlagerungen vierer unterschiedlicher Materialien in unterschiedlichen Tiefen. Die Materialien der eingelagerten Folien sind Stahl, Glasfaser verstärkter Kunststoff (GFK), Titan und Aluminium (v. l. n. r.).

Der Bereich Nummer vier stellt durch Einschnitte in den Prepreglagen simulierte Faserbrüche dar, während im Bereich fünf sich überlappende Einlagerungen / Fehlstellen simuliert werden. Die gewählten Materialien hierbei sind Titan-, Stahl- und Aluminiumfolien. Die Anordnung der einzelnen Fehlstellen zueinander ist Abbildung 6 zu entnehmen und wird später detaillierter beschrieben.

3.2 Bestimmung der Fehlertiefe

Bevor auf die Bewertung der künstlich eingebrachten Fehlstellen genauer eingegangen wird, stellt sich die Frage nach der Tiefensensibilität des zerstörungsfreien Prüfsystems. Da das Messprinzip in den Grundzügen analog zu konventionellen Lock-In Systemen ist, kann die Variation der Anregungsfrequenz für die Tiefenbestimmung verwendet werden.

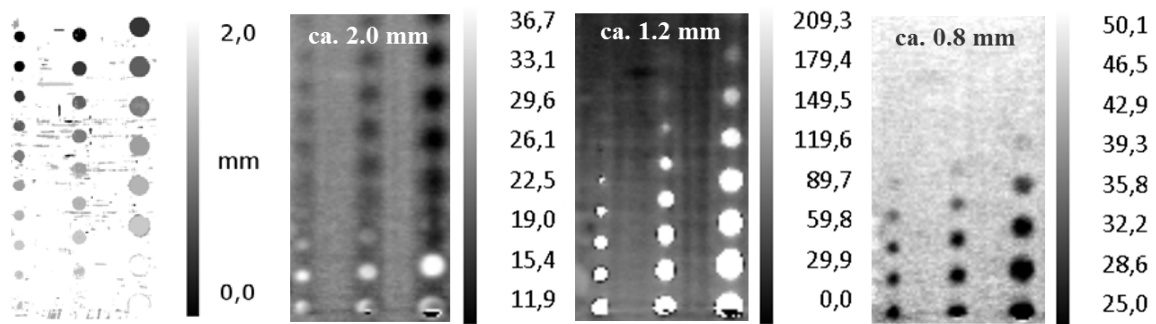


Abbildung 4. Vergleich der Tiefenbestimmung mittels Ultraschall und Thermographie anhand von kreisförmig rückseitig angebrachte Sacklochbohrungen: linkes Bild: Ultraschall C-Bild des Fehlerechos; Bilder links Mitte, rechts Mitte und rechts: Phasenbilder² bei verschiedenen Lock-In Frequenzen (von links nach rechts): 0,05Hz, 0,15Hz, 0,40Hz

In Abbildung 4 sind einerseits Ergebnisse einer Ultraschallmessung (linkes Bild) andererseits die Ergebnisse dreier thermischer Messungen bei unterschiedlichen Frequenzen (übrigen Bilder) dargestellt. Die Graustufen im Ultraschallbild entsprechen hierbei der unterschiedlichen Tiefenlage der Fehlstellen, welche aus der Laufzeit der Ultraschallechos berechnet werden. Die Tiefenbestimmung mittels thermographischer Phasenbilder ist im Vergleich dazu nur indirekt möglich. Da die thermische Welle eine stark gedämpfte Welle ist, klingt sie rasch ab, wobei Fehlstellen, welche sich hinter einer frequenzabhängigen maximalen Eindringtiefe μ befinden nicht mehr bzw. schwer zu erkennen sind. Somit können beispielsweise bei einer Anregungsfrequenz von 0,40 Hertz Fehlstellen bis ca. 0,8 mm Tiefenlage detektiert werden (entspricht den untersten vier Sacklochbohrungen), während Anregungsfrequenzen von 0,15 bzw. 0,05 Hertz Fehlstellen bis zu einer Tiefe von 1,2 bzw. 2,0 mm sichtbar machen. Durch eine grafische Subtraktion zweier Messungen können somit Fehler innerhalb eines Tiefenbereiches bewertet werden.

Die Tiefenauflösung kann unter Bezugnahme der Messung bei 0,40 Hertz mit etwa 0,2 mm angegeben werden, da die Sacklochbohrung in 0,8 mm Tiefe eindeutig erkennbar ist, wobei die nächsttiefere Bohrung in einer Tiefe von 1,0 mm nur mehr schemenhaft erkannt werden kann und im Bereich des Rauschens liegt.

3.3 Charakterisierung künstlich eingebrachter Fehlstellen

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse zu den unterschiedlichen Fehlertypen der Probenplatte beschrieben. Eines der für die spätere Anwendung wichtigsten Schadensmuster stellen Delaminationen dar. Im ersten und im zweiten Bereich werden diese wie zuvor beschrieben, auf zwei unterschiedliche Arten simuliert. Im Folgenden wird exemplarisch auf die Ergebnisse des zweiten Bereiches eingegangen. Abbildung 4 zeigt die rückseitig eingebrachten Sacklöcher, wobei bei tiefen Frequenzen ab ca. 0,05 Hertz alle eingebrachten Fehlstellen in einer Tiefe von 0,2 mm bis zu 2,0 mm erkennbar sind. Dieses Ergebnis wird durch Untersuchungen an den eingebrachten Keilen bestätigt.

Das Phasenbild eines Ausschnittes des dritten Bereiches bei einer Anregungsfrequenz von 0,01 Hz ist in Abbildung 5 dargestellt. Hierbei ist besonders auffällig, dass die vorhandenen Fehlstellen aus glasfaserverstärktem Kunststoff die geringste Verschiebung des Phasenwinkels hervorrufen (dritte vertikale Reihe) und nur mit gesteigertem Aufwand eindeutig erkennbar sind. Den größten Fehlerkontrast zeigen die Stahlfolien, welche die äußerst rechte Fehlerreihe darstellen. Aluminium und Titanfolien

² Die Skalierung der Phasenbilder (relative Phasenverschiebung) ist bei den einzelnen Lock-In Frequenzen unterschiedlich. Sie ist so gewählt, dass der Kontrast der Phasenbilder maximiert wird.

zeigen ähnliches Verhalten. Exemplarisch sind an beiden Seiten der Grafik jeweils in Bezug zur vertikalen Fehlerreihe mittige Schnitte zu sehen, wobei die Amplitude der relativen Phasenverschiebung entspricht. Während bei den eingelagerten Stahlfolien alle fünf sich im Bildausschnitt befindenden Fehlstellen auffindbar sind (Eindringtiefe > 2,2 mm), können lediglich die ersten drei Aluminium bzw. Titanfolien eindeutig erkannt werden (Eindringtiefe ca. 0,8 mm). Tieferliegende Fehlstellen sind nur schematisch zu erkennen.

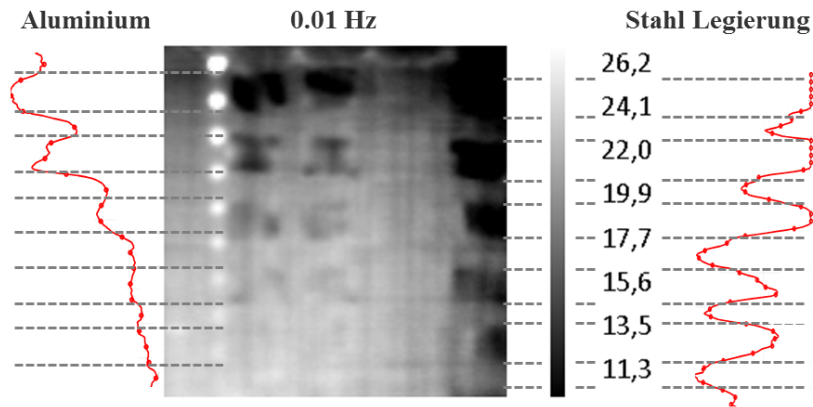


Abbildung 5. Interlaminare Einlagerung von Fremdkörpern (Defekttiefe von 0,28 mm bis 2,24 mm in 0,28 mm Schritten in vertikaler Richtung ansteigend): Phasenbild bei 0,01Hz: Aluminiumfolien, Titanfolien, GFK Lagen und Stahlfolien (v. l. n r.)

Ein weiterer Fehlertypus im zweiten Bereich sind künstlich erzeugte Harzansammlungen in 0,2 mm, 0,5 mm und 1 mm Tiefe (Durchmesser 10 mm), welche alle eindeutig identifiziert werden können. Der vierte Bereich, welcher Faserbrüche in Form von Einschnitten in den Einzellagen darstellen soll, liefert bei der thermischen Charakterisierung keine messbaren Ergebnisse. Unter Umständen sind zwar die einzelnen Faserbündel unterbrochen, allerdings liegen die aneinanderstoßenden Faserbündel so weit zusammen, dass eine Wärmeleitung über den Einschnitt hinweg ohne deutliche Verschlechterung möglich ist. Somit kann in erster Näherung keine definitive Aussage über die prinzipielle Detektierbarkeit getroffen werden und es müssen weitere komplementäre Untersuchungen durchgeführt werden.

3.4 Überlappende Fehlstellen

Eine spezielle Herausforderung für zerstörungsfreie Prüfsysteme stellen sich überlappende Fehlstellen dar. Abbildung 6 stellt schematisch die eingebrachten Mehrfachdefekte dar. Die Tiefenlage $d_{\text{Deckschicht}}$ variiert zwischen 0,28 mm, 0,56 mm bzw. 0,84 mm. Die einzelnen Blöcke mit übereinander angeordneten Einlagerungen können in sieben Bereiche eingeteilt werden, welche jeweils eine, zwei oder drei übereinanderliegende Fehlstellen aufweisen, die zueinander in verschiedener Art und Weise angeordnet sind.

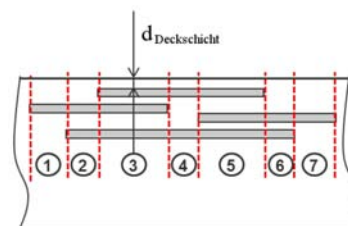


Abbildung 6. Geometrische Anordnung überlappender Fehlstellen [6]

Die Ergebnisse einer Untersuchung eingebrachter Stahlfolien ist in Abbildung 7 dargestellt, wobei das Phasenbild der thermischen Untersuchung zu sehen ist. Der relative

Phasenwinkel ist längs eines horizontalen Schnittes darunter aufgetragen, wobei ein äquivalentes Ultraschall C-Bild des Fehlerechos der am nächsten zur Bauteiloberfläche angeordneten Gruppe von Fehlstellen als Vergleich zu sehen ist.

Betrachtet man zunächst dieses Ultraschallbild, so kann die oberste mittige Fehlstelle bzw. die darunter hervorragenden Folien identifiziert werden. Alle verdeckten Fehlstellen können nicht identifiziert werden.

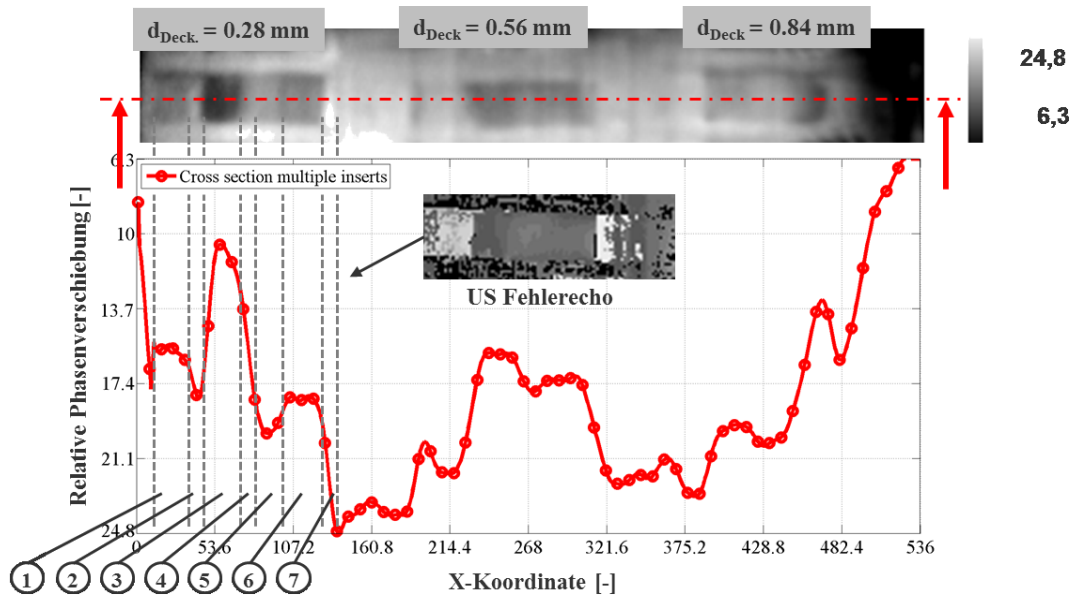


Abbildung 7. Mehrfachfehlstellen in Form von einlamierten Folien aus Stahllegierung [6]

Das thermische Phasenbild zeigt hingegen ein größeres Potential zur Detektion von hintereinanderliegenden Fehlstellen. Am Beispiel der oberflächennächsten Gruppe ist zu sehen, dass alle sieben zuvor beschriebenen Zonen durch einen charakteristischen Verlauf des Phasenbildes eindeutig identifiziert werden können. Mit zunehmender Tiefenlage der Fehlstellen ($d_{\text{Deck}}=0,56$ mm bzw. $d_{\text{Deck}}=0,84$ mm) kommt es erwartungsgemäß zu einer Reduktion der Phasenunterschiede, wobei allerdings ähnliches Verhalten zu erkennen ist.

5. Bewertung von Impactschäden an gekrümmten Strukturen

Zum Abschluss findet eine Untersuchung der Eignung dieses Systems für stark gekrümmte Strukturen in Form einer Bewertung von Impactschäden an Rohrstrukturen mit variierendem Durchmesser (15 mm bis 50 mm) statt. Zum Vergleich dienen Ergebnisse aus Ultraschalluntersuchungen.

Es kann bei allen untersuchten Rohrgeometrien eine gute Übereinstimmung zwischen den abgewickelten Flächenbildern des Ultraschallprüfsystems und der thermographischen Untersuchung beobachtet werden. Exemplarisch ist eine zerstörungsfreie Untersuchung eines geschädigten CFK-Rohres mit 50 mm Durchmesser in Abbildung 8 zu sehen, wobei rechts das entsprechende Ultraschallbild und links bzw. in der Mitte thermische Phasenbilder bei einer Anregungsfrequenz von 0,50 Hz bzw. 0,10 Hz zu sehen sind.

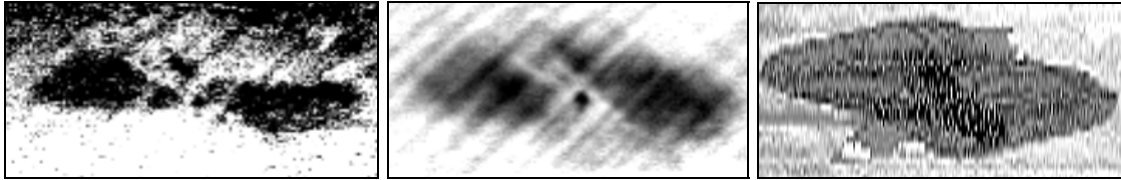


Abbildung 8. Zerstörungsfreie Prüfung einer mittels 15 J Impact geschädigten Rohrstruktur mit 50 mm Durchmesser: thermisches Phasenbild bei 0,50 Hz (links), bei 0,10 Hz (Mitte) und Abwicklung des flächigen Ultraschallscans zur Darstellung der Schwächung des Rückwandsignals (rechts) [6]

Im Phasenbild bei 0,10 Hz sind zwei unterschiedliche Zonen zu erkennen. Ein etwas dunkler dargestellter Bereich rechts und links neben dem Impact und ein etwas hellerer, rautenförmiger Bereich, der eine größere vertikale Ausbreitung besitzt. Die dunkleren Zonen stellen dabei oberflächennahe Schädigungen dar (vgl. dazu das Phasenbild bei 0,50 Hz), während die helleren Zonen Schäden in der Nähe der Rückwand anzeigen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit zeigt die Konzeption, Implementierung und Bewertung einer an die konventionelle Lock-In Thermographie angelehnte Prüfmethode, wobei neben technischen vor allem wirtschaftliche Aspekte im Vordergrund stehen. Durch eine sequenzielle Messung und Auswertung können kosteneffiziente Bauteile eingesetzt werden, was zu einer deutlichen Kostenreduktion des Gesamtsystems bei zur konventionellen Methode vergleichbaren Ergebnissen führt. Eine Probenplatte aus CFK mit künstlich eingebrachten Fehlstellen diente zur Qualifizierung des Systems und zum Vergleich mit alternativen Prüfmethoden. Auch die Anwendung auf stark gekrümmte Strukturen wurde mit Hilfe von Untersuchungen an durch Impact geschädigten CFK Rohrstrukturen erfolgreich gezeigt.

Im nächsten Schritt sollen zukünftig unterschiedliche komplexe Bauteile verwendet werden, um die Eignung bzw. die Performance des Systems bei der Charakterisierung von hochkomplexen, mehrfach gekrümmten Strukturen zu bewerten.

Referenzen

- [1] Xavier P. V. Maldaque. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [2] C. J. Hellier. *Handbook of Nondestructive Evaluation*. McGraw-Hill, 2001.
- [3] H. Schmiedel. *Handbuch der Kunststoffprüfung*. Carl Hanser Verlag München Wien, 1992.
- [4] Otwin Breitenstein, Wilhelm Wart und Martin Langenkamp. *Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials*. Advanced Microelectronics. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2003.
- [5] Gernot Riegert. *Induktions-Lockin-Thermographie : Ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung*. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik, 2007.
- [6] M. Perterer, F. Höchtel, 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.
- [7] Franz Höchtel, Martin Perterer und Andreas Kiefmann. Jahresbericht März 2010 bis Februar 2011 zum Förderprojekt Betriebssicherheit von Sportgeräten aus CFK. Technical report, Bayerische Forschungsstiftung, 2011.