

Untersuchung der Auflösungsgrenzen der Lockin-Thermografie zur Prüfung von Faserverbundwerkstoffen

Philipp MYRACH *, Christiane MAIERHOFER *, Mercedes REISCHEL *,
Markus RAHAMMER **, Niels HOLTSMANN **

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin

** Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart

Kurzfassung. Aktive Thermografie mit Lockin-Anregung stellt ein berührungsfreies und zerstörungsfreies Prüfverfahren dar, welches insbesondere auch die Prüfung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen ermöglicht. Um eine Standardisierung dieses Verfahrens voranzubringen, wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes umfangreiche Untersuchungen zur Validierung des Verfahrens durchgeführt.

Dabei wurden unter anderem der Einfluss der spektralen Empfindlichkeit verschiedener Kamerasysteme, unterschiedlicher Lagenaufbauten bei CFK-Probekörpern und der Einfluss einer Phasenverschiebung zwischen dem Anregungssignal und der Detektion der Thermografiebilder untersucht.

1 Einführung

Die zunehmende Verwendung von Kohlefaserverbundwerkstoffen in der Luft- und Automobilindustrie stellt auch neue Herausforderungen an die Methoden der Prozess- und Qualitätskontrolle. Hierbei stellt die aktive Thermografie mit Lockin-Anregung als ein berührungsloses und zerstörungsfreies Prüfverfahren eine vielversprechende Alternative zu den etablierten Prüfmethoden dar und findet vereinzelt auch schon Anwendung [1, 2].

Mit der andauernden Weiterentwicklung der Thermografiekamerasysteme wurde auch das Verfahren der Lockin-Thermografie von den ersten Anwendungen [3] in den 70er Jahren bis heute stetig weiterentwickelt [4, 5, 6]. Zudem zeigt auch die Entwicklung unterschiedlicher Anregungskonzepte, von optischen Anregungen durch Halogenstrahler über LED-Quellen bis hin zu Lasersystemen, bis zur Verwendung von Ultraschall oder Wirbelstromanregung [7] die vielseitige Anwendbarkeit und vor allem die Anpassbarkeit des Verfahrens an spezifische Prüfprobleme.

Nichtsdestotrotz ist der geringe Grad der Standardisierung immer noch ein Hindernis für eine breite Anwendung der Lockin-Thermografie. Um dem zu begegnen wurden deshalb innerhalb eines TNS (Transfer von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen (FuE) durch Normung und Standardisierung) Verbundprojekts mit dem Titel „Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Lockin-Anregung“, welches die BAM in Kooperation mit dem Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart durchführt, grundsätzliche Anforderungen und die Leistungsfähigkeit der Verfahrens systematisch untersucht. Hierbei sind unter anderem



die Anforderungen, die an die benutzte Hardware, die Wahl des Aufbaus, aber auch die Prüfbarkeit verschiedener Materialien und Fehlerarten untersucht worden. Innerhalb des Projekts wurden dazu zahlreiche Probekörper unterschiedlicher Materialien mit jeweils unterschiedlichen Fehlern hergestellt. Diese wurden mit optisch angeregter Lockin-Thermografie untersucht, wobei jeweils verschiedene Messparameter variiert wurden. Ergänzend zu den optischen Untersuchungen wurden auch Messungen mit Induktions- und Ultraschallanregung durchgeführt, welche hier allerdings nicht diskutiert werden. Aus der großen Parameterbandbreite können so Aussagen und Hinweise für die Durchführung einer Lockin-Thermografieprüfung, Richtwerte zur Bewertung der Prüfbarkeit bestimmter Bauteile und allgemeine Angaben zur Leistungsfähigkeit des Verfahrens gewonnen werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse stellen dabei nur einen kleinen Teil der im Projekt erlangten Erkenntnisse dar. Die im Folgenden exemplarisch ausgewählten Beispiele sollen deshalb auf einige wichtige Abhängigkeiten hinweisen.

Zunächst soll gezeigt werden, welchen Einfluss die Wahl der Infrarot-Kamera bzw. die Wahl des spektralen Empfindlichkeitsbereichs auf die Ergebnisse einer Lockin-Thermografieprüfung hat. Anschließend wird der Einfluss unterschiedlicher Lagenaufbauten von kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) und abschließend die Abhängigkeit des Messergebnisses von der Phasenbeziehung zwischen der Anregung und der Detektion diskutiert.

2 Prinzip der Lockin Thermografie

In Abgrenzung zur Puls-Thermografie mit Blitzanregung wird bei der optischen Lockin-Thermografie die zu untersuchende Probe nicht einmalig, kurzzeitig und stark erwärmt, sondern die Erwärmung erfolgt hier periodisch mit wesentlich geringeren Leistungsdichten. Während der Anregungsphase wird die von der Oberfläche emittierte Wärmestrahlung kontinuierlich mit einer Infrarot (IR)-Kamera aufgezeichnet und je nach Messsystem online (während der Anregung) oder offline (nach der Anregung) ausgewertet. Die Auswertung erfolgt durch eine pixelweise Fourier-Transformation des Intensitäts-Zeit-Verlaufs für die gewählte Anregungsfrequenz. Als Ergebnis stehen ein Amplituden und ein Phasenbild zur Verfügung, welche die Abschwächung und Phasenverschiebung der thermischen Anregung beschreiben. Grundsätzlich hängt dabei die Informationstiefe, also die Tiefe in der noch

Tabelle 1. Im Projekt untersuchte Einflussgrößen

	Einflussgröße
Messparameter	<ul style="list-style-type: none"> - Anzahl der Perioden (Einschwingen) - Signalform (Sinus, Rechteck) - Art bzw. Güte der Synchronisation
Kamerasystem	<ul style="list-style-type: none"> - Detektortyp (InSb, MCT, Mikrobolometer) - Spektralbereich - Integrationszeiten
Anregungsquelle	<ul style="list-style-type: none"> - Halogen, LED, Laser - Anregungsleistung - Phasenstabilität
Prüfproblem	<ul style="list-style-type: none"> - Material (thermische Eigenschaften) - Art der Fehlstelle (Flachbodenbohrung, Nut, Delamination, Minderdicke) - Absorptions- & Emissionseigenschaften (Oberfläche)
Auswertung	<ul style="list-style-type: none"> - Online/Offline Lockin - Untergrundabzug - Abtastfrequenz - Kreuzkorrelation - Phasenlage

Defekte detektiert werden können, von der gewählten Lockin-Frequenz ab [8], wobei die Phaseninformation eine höhere Tiefenreichweite zeigt [9]. Für die Interpretation der Ergebnisse und die Berechnung von Fehlstellentiefen aus der Phaseninformation ist dabei die Interferenz der thermischen Welle, die in das Material einläuft, und der Reflexionskoeffizient der Fehlstelle selbst von Bedeutung [10], wobei laterale Wärmeflüsse zunächst nicht berücksichtigt werden.

Neben diesen sehr grundsätzlichen Abhängigkeiten wurde in dem oben genannten Projekt darüber hinaus die Einflüsse messtechnischer Parameter und Eigenschaften der verwendeten Hardware untersucht. Eine Auflistung dieser Einflussfaktoren ist in Tabelle 1 aufgeführt.

3. Ergebnisse

3.1 Einfluss der zur Detektion verwendeten Spektralbereichs

Für thermografische Untersuchungen stehen heute eine Vielzahl an kommerziellen Kamerasystemen zu Verfügung, welche sich neben den verwendeten Detektortechnologien (InSb, MCT, Mikrobolometer) vor allem hinsichtlich der spektralen Empfindlichkeit unterscheiden.

Um den Einfluss des verwendeten Spektralbereichs zu untersuchen wurde der in Abb. 1 gezeigte CFK-Probekörper mit verschiedenen Kamerasystemen in unterschiedlichen Spektralbereichen (InSb (1,6-5,4) μm , InSb (3,7-5,4) μm , InSb (4,7-5,4) μm , MCT (8,0-9,4) μm) untersucht. Bei dem Probekörper handelt es sich um eine ungeschwärzte CFK-Platte (200 mm x 200 mm x 6 mm), in die Flachlochbodenbohrungen unterschiedlicher Durchmesser (24 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm) und Restwandstärken (siehe Abb. 1) eingebracht wurden. Die Platte besteht aus einem Kohlegelege (100 g/m², biaxial +/- 45°) mit quasiisotropem Lagenaufbau. Für die optische Anregung wurden zwei Halogenstrahler mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von insgesamt 2500 W benutzt, die während der Messung mit etwa 10% der maximalen Leistung betrieben wurden.

Die Ergebnisse der Lockin-Thermografiemessung, gemessen von der Vorderseite

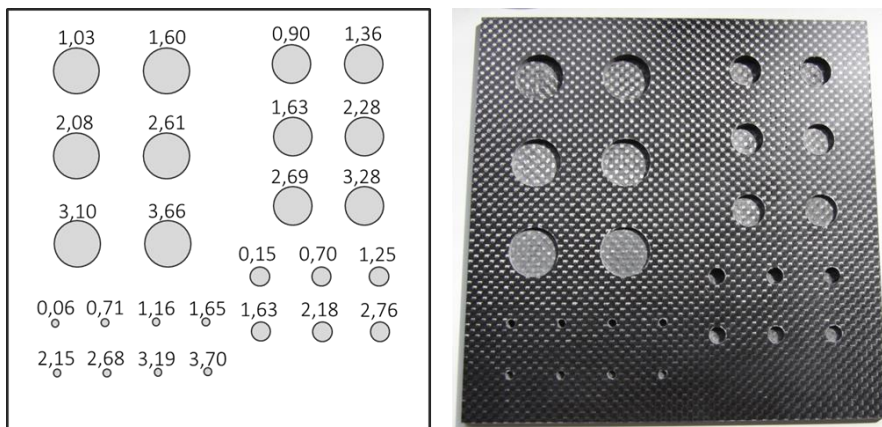


Abb. 1. (links) Schematische Darstellung des CFK-Probekörpers (200mm x 200mm x 6mm) mit den gemessenen Restwandstärken (Angaben in mm) der Flachbodenbohrungen mit Durchmessern von 4 mm, 8 mm, 16 mm, 24 mm. **(rechts)** Foto der Rückseite des Probekörpers.

des Probekörpers, sind in Abbildung 2. dargestellt.

In den Phasenbildern zeigt sich dabei, dass sich sowohl im mittleren (MWIR), als auch im langwelligigen (LWIR) Infrarot vergleichbare Resultate erzielen lassen.

Signifikant schlechter ist allerdings das Ergebnis für den Spektralbereich von $1,6 \mu\text{m} - 5,4 \mu\text{m}$ (Abb. 2 (a)). Hier führt die breitere spektrale Empfindlichkeit der Kamera dazu, dass auch Strahlung im nahen Infrarot detektiert wird. Da die Halogenstrahler aber während der gesamten Anregungsphase in Betrieb sind, emittieren sie auch über die

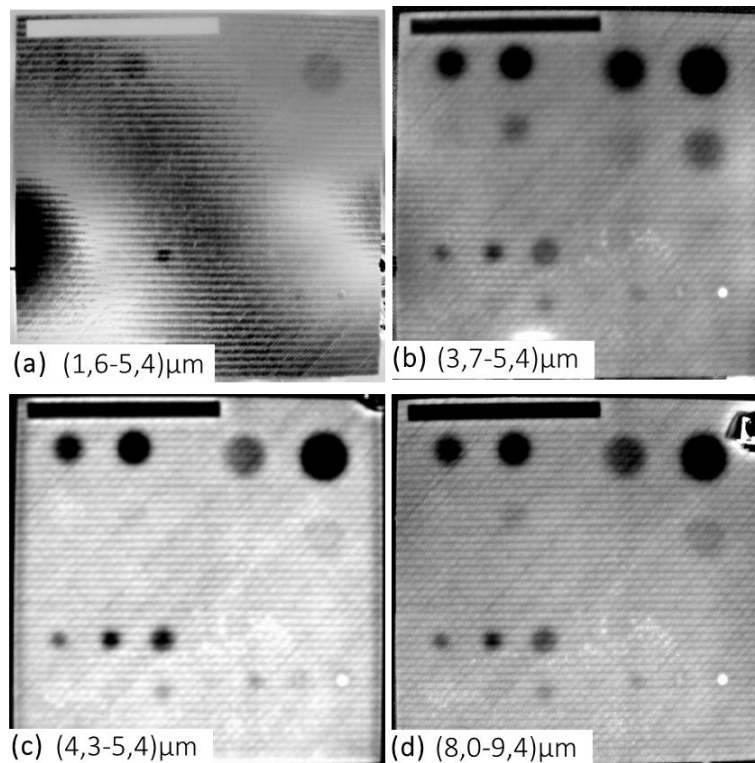


Abb. 2. Phasenbilder des CFK-Probekörpers CFK-FLB-100g mit einer Lockin-Frequenz von 0,05 Hz im Spektralbereich (a) $(1,6-5,4) \mu\text{m}$, (b) $(3,7-5,4) \mu\text{m}$, (c) $(4,3-5,4) \mu\text{m}$ und (d) $(8,0-9,4) \mu\text{m}$

gesamte Dauer der Messung Licht, unter anderem im nahinfraroten Wellenlängenbereich. Diese reflektierte Störstrahlung kann bei diesem breiten Empfindlichkeitsbereich nicht von der emittierten Strahlung getrennt werden, welche durch die Erwärmung des Probekörpers erzeugt wird. Die Störstrahlung überlagert also die Wärmestrahlung der Probe und verfälscht so den eigentlichen Phasengang und damit das Ergebnis. Verbesserte Ergebnisse lassen sich deshalb durch die Wahl eines geeigneten Spektralbereichs, aber auch durch die Verwendung von PMMA- bzw. Quarzglasfiltern vor den anregenden Halogenlampen erzielen. Die so erzielte spektrale Trennung von Anregung und Detektion gewährleistet, dass ausschließlich Wärmestrahlung der Probenoberfläche detektiert wird. Durch die Verwendung von Laser- oder LED-Quellen kann eine solche Trennung, abhängig von den gewählten Emissionswellenlängen, auch ohne die Verwendung von Filtern erreicht werden.

3.2 Tiefenauflösung an CFK Probekörpern

Neben der oben diskutierten CFK-Probe wurden innerhalb des Projektes drei weitere CFK-Probekörper mit gleichen Abmessungen und eingebrachten Flachbodenbohrungen untersucht. Herstellungsbedingt ergaben sich dabei allerdings Abweichungen sowohl bei den Durchmessern als auch bei den Restwandstärken der Flachbodenbohrungen (siehe Abb. 3.). Für die Herstellung der verschiedenen Probekörper wurden Kohlefasergelege und Kohlefaserewebe verwendet und unterschiedliche Lagenaufbauten realisiert. Für die verschiedenen Proben ergaben sich dabei rechnerische Faservolumenanteile zwischen 35%

und 53%. Im Folgenden sollen hier zwei Probekörper diskutiert werden, bei denen einerseits ein quasiisotroper und andererseits ein unidirektionaler Lagenaufbau vorliegt.

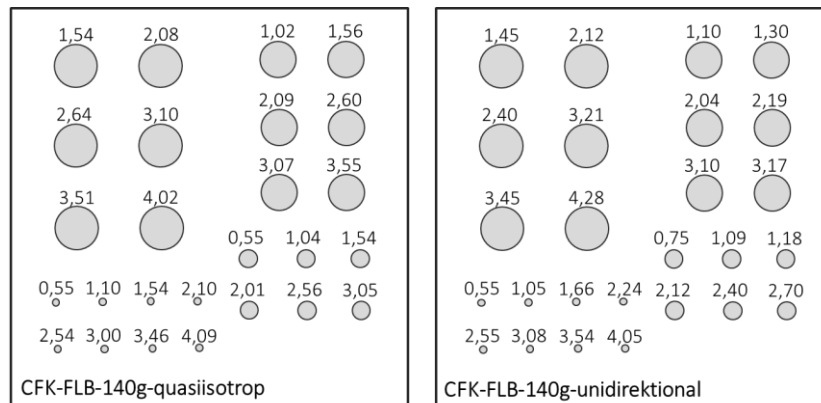


Abb. 3. Schematische Darstellung der Probekörper (**links**) CFK-FLB-140g-quasiisotrop und (**rechts**) CFK-FLB-140g-unidirektional mit den gemessenen Restwandstärken in mm und Durchmessern von 4 mm, 8 mm, 16 mm bzw. 24 mm.

- CFK-FLB-140-UD: - Kohlegewebe 140 g/m² kettverstärkt UD Style 763
- 34 Lagen 0° unidirektional, 2 Decklagen 90°
- B x H x T: 200 mm x 200 mm x 6 mm
- CFK-FLB-140-QI: - Kohlegewebe 140 g/m² kettverstärkt UD Style 763
- 8x 0°/90°/+45°/-45° quasiisotrop
- B x H x T: 200 mm x 200 mm x 6 mm

Beide Probekörper wurden unter den gleichen Bedingungen untersucht. Zur Anregung wurden wie oben beschrieben zwei Halogenstrahler verwendet. Die Detektion erfolgte mit einer MCT-Kamera mit 640 x 512 Pixeln, einer maximalen Bildwiederholrate von 100 Hz und im Spektralbereich von 8,0 µm – 9,4 µm. Die Ortauflösung betrug 0,4 mm/pixel. Eine Schwärzung der Proben wurde nicht durchgeführt.

Abbildung 4 zeigt die Amplituden- bzw. Phasenbilder für die Lockin-Frequenzen 0,1 Hz, 0,05 Hz, 0,01 Hz. Gut erkennbar ist die zunehmende Anzahl an Defekten, die mit Verringerung der Lockin-Frequenz in den Phasenbildern sichtbar werden. Dabei lassen sich sowohl für die quasiisotrope Probe, als auch für die unidirektionale Probe Defektsignaturen für ähnliche Defekttiefen beobachten.

Im Fall der unidirektionalen Probe tritt allerdings vor allem bei kleineren Lockin-Frequenzen deutlich eine Deformation der Defektgeometrie auf. Diese ist begründet in der höheren Wärmeleitfähigkeit des Materials parallel zur Faserorientierung, welche zu einer schnelleren Wärmediffusion in dieser Richtung und damit zu einer Verbreiterung des Defektkontrastes führt. Dieser Effekt ist in den Amplitudenbildern weniger stark ausgeprägt. Die reale Defektgeometrie wird hier besser wiedergegeben, weshalb sich die Amplitudeninformation in diesem Fall eher für die Bewertung der Defektgeometrie eignet. Nachteilig ist, dass im Vergleich zu den Phasenbildern tieferliegende Defekte nicht mehr auffindbar sind.

Generell ist zu beobachten, dass Flachbodenbohrungen mit größeren Durchmessern auch noch bei größeren Überdeckungen nachweisbar sind. Um diese Beobachtung weiter zu quantifizieren, wurde für die Flachbodenbohrungen mit den Durchmessern 23,8 mm, 15,8 mm und 7,8 mm der quasiisotropen Probe jeweils der Phasenkontrast bestimmt. Dazu wurden je fünf Linienprofile über den Defekten gemittelt. Anschließend wurde ein ebenfalls gemittelt Linienprofil aus der näheren, aber ungestörten, Umgebung des

Defekts subtrahiert. Die sich so ergebenden Phasenkontraste für Flachbodenbohrungen

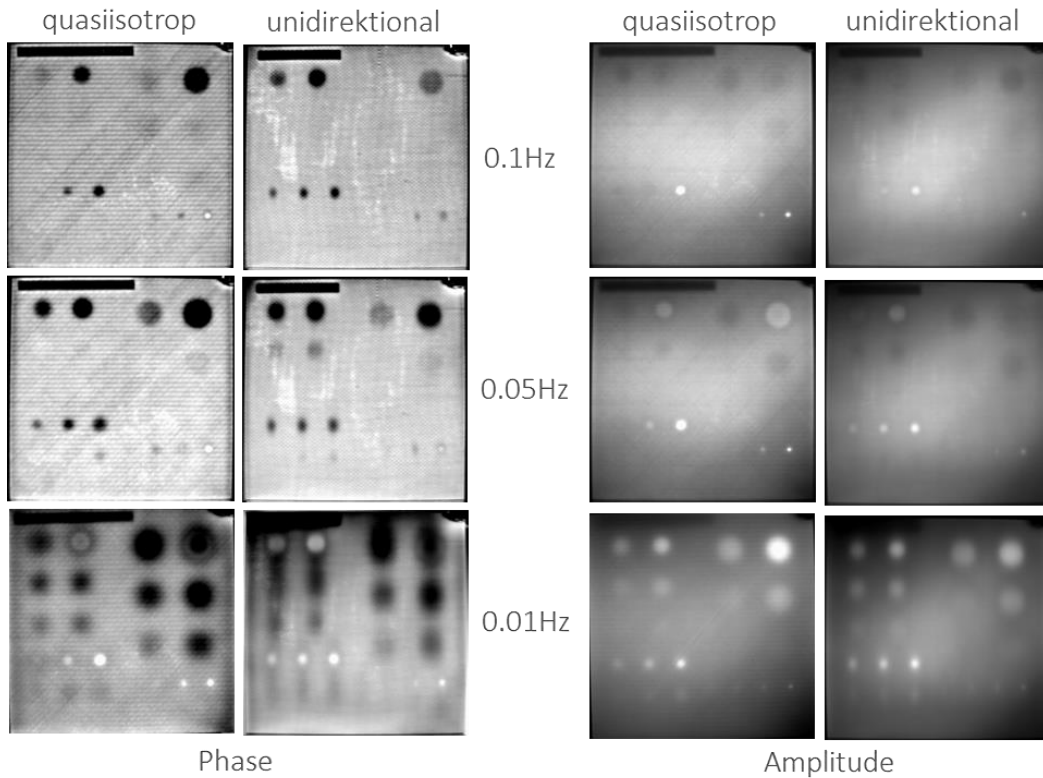


Abb. 4. Phasen- (**links**) und Amplitudenbilder (**rechts**) für die unidirektionale und quasiisotrope CFK-Probe gemessen bei Lockin-Frequenzen von 0,1 Hz, 0,05 Hz und 0,01 Hz.

unterschiedlicher Durchmesser in Abhängigkeit von der Lockin-Frequenz sind in Abb. 5 dargestellt. Hier lässt sich nun deutlich ablesen, dass größere Defektdurchmesser einen größeren Phasenkontrast hervorrufen. Werden die Defekte kleiner, so wird der Einfluss lateraler Wärmefflüsse größer, die dann wiederum zu einer geringeren Phasenverschiebung führen.

Zusammenfassend lassen sich für die hier untersuchte Probe also Flachbodenbohrungen in folgenden Tiefen nachweisen: $\geq 4,0$ mm (\varnothing 23,8 mm), $\geq 3,5$ mm (\varnothing 15,8 mm) und 3,0 mm (\varnothing 7,8 mm).

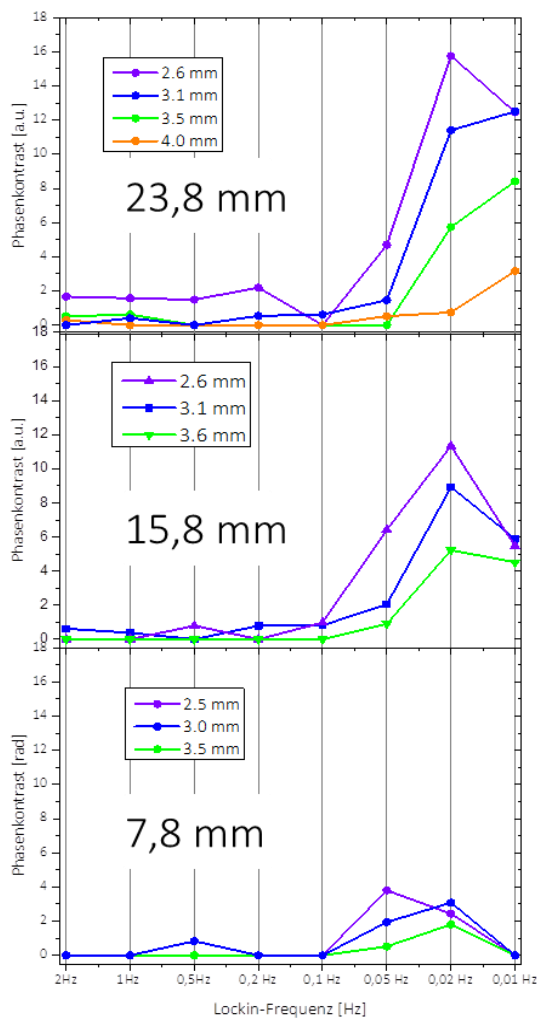


Abb. 5. Phasenkontrast für Defekte im quasiisotropen CFK-FLB-140g-Probekörper mit unterschiedlichen Durchmessern (23,8 mm, 15,8 mm, 7,8 mm) in Abhängigkeit von der Lockin-Frequenz und der Restwandstärke.

3.3 Einfluss der Anregungsfunktion und der Phasenstabilität zwischen Anregung und Detektion

Neben der Verwendung von Halogenstrahlern als Anregungsquelle werden zunehmend auch andere Quellen, wie z.B. Laser- oder LED-Quellen, für die Lockin-Thermografie benutzt. Neben der schon oben diskutierten spektralen Trennung von Anregung und Detektion, bieten diese Quellen darüber hinaus den Vorteil, dass aufgrund der geringen Anstiegszeiten auch höhere Frequenzen oder auch unterschiedliche Signalformen für die Anregung benutzt werden können. Die Verwendung von höheren Frequenzen zum Beispiel erlaubt so die Untersuchung von dünnen Schichtsystemen, wie z.B. Lacken.

Inwieweit die Verwendung unterschiedlicher Signalformen eine Verbesserung der Ergebnisse ermöglicht, wurde innerhalb des Projekts mit einer LED-Quelle [11, 12] untersucht. Die LED-Quelle bestand dabei aus einem Array von Einzeldioden, die durch ihre Anordnung eine flächige Anregung der Probe ermöglichen. Die Emissionwellenlänge beträgt 850 nm, wobei Bestrahlungsstärken von etwa 0,5 W/cm² erreicht werden.

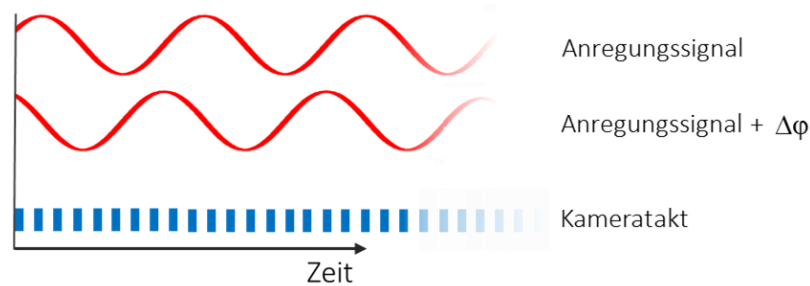


Abb.6. Schematische Darstellung der Beziehung zwischen der Anregung und der Detektion.

Da mit einer LED-Quelle fast beliebige Signalformen erzeugt werden können, ließ sich hier auch der Einfluss einer Phasenverschiebung des anregenden Signals zu der thermografischen Aufzeichnung untersuchen. Dazu wurde bei Beginn der Aufzeichnung die Anregung mit einer Sinusfunktion mit definierter Phasenverschiebung gestartet. Dies ist schematisch in Abb. 6 dargestellt.

Die Lockin-Untersuchung wurde nun mit Sinusanregungen mit Phasenverschiebungen von 0° bis 315° an einem PVC-Probekörper (B x H x T: (150 x 150 x 6) mm) mit Flachbodenbohrungen (Restwandstärken: 1 mm, 1,8 mm, 3,0 mm, 3,8 mm, 5,7 mm, 7,9 mm, 11,9 mm; Durchmesser: 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 12 mm) durchgeführt. Die Phasenbilder, die sich für diese Untersuchung ergeben, sind in Abbildung 7 (a) zusammengestellt. Schon hier zeigt sich, dass je nach Phasenlage des Anregungssignals sehr unterschiedliche Phasenkontraste ausbilden und vor allem, dass bei bestimmten Phasenverschiebungen, wie z.B. 45° , einige Defekte nicht sichtbar sind. Deutlicher wird dies in Abb. 7 (b), in der wie weiter oben beschrieben die Phasenkontraste über den in Abb. 7 (a) gelb markierten Defekt aufgetragen sind. Zu beobachten ist hier, dass sich die Absolutwerte der Phase stark ändern und zudem ein Minimum durchlaufen (durch die in den Bildern vorgenommene Kontrastanpassung ist dieser Effekt dort weniger deutlich). Dies bedeutet, dass vor allem bei einer Online-Messung, bei der nach der Messung nur die Ergebnisbilder (Phasen- und Amplitudenbild), nicht aber die gesamte Thermografiesequenz vorhanden ist, eine definierte Phasenverschiebung zwischen dem Anregungssignal und der Kameraaufzeichnung gewährleistet sein muss. Ist dies nicht der Fall, oder ist die Phasenverschiebung ungünstig, reduziert das den erreichbaren Phasenkontrast und macht damit das Auffinden von Fehlstellen unter Umständen unmöglich.

Im Falle einer Offline-Auswertung, bei der auch nach der Messung die gesamte Thermografiesequenz zur Verfügung steht, kann eine möglicherweise ungünstige Phasenverschiebung dadurch beseitigt werden, dass nachträglich die Thermografiesequenz so beschnitten wird, dass die Anregung z.B. immer bei einer Phasenverschiebung von 0° beginnt. Zudem lässt sich die Sequenz auch so beschneiden, dass sich andere Phasenverschiebungen und damit auch veränderte Kontraste ergeben.

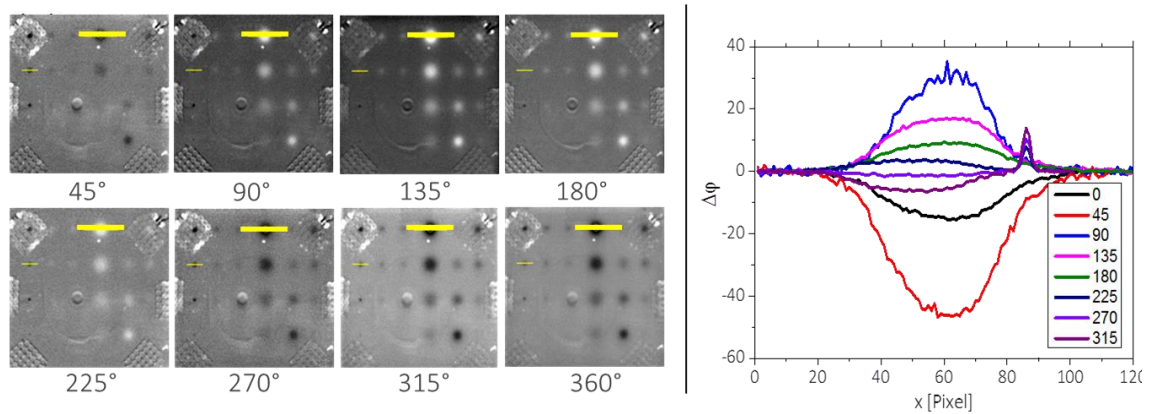


Abb. 7. (links): Phasenbilder für den PVC-Probekörper gemessen mit jeweils unterschiedlichen Phasenverschiebungen zwischen Anregung und Detektion. **(rechts):** Linienprofile durch die in (a) gelb markierten Bereiche einer Flachbodenbohrung mit 11,9 mm Durchmesser und einer Restwandstärke von 4,0 mm.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des Projekts „Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Lockin-Anregung“ wurde der Einfluss unterschiedlicher Messparameter auf das Ergebnis einer Lockin-Thermografiemessung systematisch untersucht. Einige dieser Ergebnisse wurden hier exemplarisch vorgestellt.

Es wurde gezeigt, dass die Wahl des spektralen Empfindlichkeitsbereichs der verwendeten IR-Kamera starken Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Es empfiehlt sich hier Störstrahlung im nahen Infrarotbereich, z.B. durch kameraseitige Einschränkung des Spektralbereichs durch Filter oder die Verwendung von Glas- bzw. Plexiglasfilter vor den Anregungsquellen, zu unterdrücken.

Für den Nachweis von Flachbodenbohrungen in CFK-Probekörpern zeigen sich Abhängigkeiten von der Defektgröße, wobei Fehler mit kleineren Durchmessern aufgrund lateraler Wärmeflüsse nur in geringeren Tiefen nachweisbar sind. Für die hier vorgestellten Probekörper ergaben sich die Nachweisbarkeit für Fehlstellen mit 23,8 mm Durchmesser bis zu einer Tiefe von 4,0 mm, mit 15,8 mm Durchmesser bis zu 3,5 mm und bei Durchmessern von 7,8 mm bis zu einer Tiefe von 3,0 mm. Der Vergleich einer quasiisotropen mit einer unidirektionalen CFK-Probe zeigte starke Deformationen der Defektgeometrien im Fall der unidirektionalen Probe. Diese, durch die Anisotropie der Wärmeleitung hervorgerufenen Deformationen sind sowohl im Phasen- als auch im Amplitudenbild sichtbar, wobei hier der Einfluss auf die Phaseninformation stärker ist.

Bei der Untersuchung von Phasenverschiebungen zwischen dem Anregungssignal und der Detektion der Thermografiebilder ergaben sich Phasenkontraste, die in Abhängigkeit von der jeweils gewählten Phasenverschiebung ein Minimum durchlaufen und so einen Nachweis erschweren können.

Danksagung

Die Finanzierung des Projektes „Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Lockin-Anregung“ erfolgte über das Forschungsprogramm „Transfer von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen (FuE) durch Normung und Standardisierung“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie in Kooperation mit DIN e.V. und DGZfP e.V. Wir danken in diesem Zusammenhang Herrn Martin Sengebusch von DIN und Herrn Matthias Kunert von der DGZfP für die Unterstützung, Diskussionen und wertvolle Hinweise. Herstellung der Probekörper: zfl Zentrum für Faserverbunde und Leichtbau Haldensleben.

Referenzen

- [1] Wu, D.; Salerno, A.; Malter, U.; Aoki, R.; Kochendörfer, R.; Kächele, P. K.; Woithe, K.; Pfister, K.; Busse, G.: Inspection of aircraft structural components using lockin-thermography. In: Quantitative InfraRed Thermography, QIRT 96, Eurotherm Series 50, D. Balageas, G. Busse, and G. M. Carlomagno (Eds.), 1997, pp. 251-256
- [2] Riegert, G.; Eberle, K.: Thermography methods for non-destructive evaluation (NDE). In: Damage and its evolution in fiber-composite materials: simulation and non-destructive evaluation. Busse, G.; Kröplin, B.-H.; Wittel, F. K. (Hrsg.). ISBN 3-930683-90-3 (2006), pp. 107-123.
- [3] Carlomagno, G. M.; Berardi, P. G.: Unsteady thermography in nondestructive testing. Proceedings of the 3rd Biannual Information Exchange, St. Louis/USA (1976), pp. 33-39
- [4] Beaudoin, J. L.; Merienne, E.; Danjoux, R.; Egee, M.: Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photo-thermal radiometry. Infrared technology and applications. SPIE 590 (1985), pp. 287
- [5] Kuo, P. K.; Feng, Z. J.; Ahmed, T.; Favro, L. D.; Thomas, R. L.; Hartikainen, J.: Parallel thermal wave imaging using a vector lockin video technique. In: Photoacoustic and photothermal phenomena (Hrsg. P. Hess und J. Pelzl), Springer-Verlag, Heidelberg (1988), pp. 415-418
- [6] Busse, G.; Wu, D.; Karpen, W.: Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography. J. Appl. Phys. 71 8 (1992), pp. 3962-3965
- [7] Riegert, G.; Busse, G.: Induktions-Lockin-Thermografie (ILT). MP Materialprüfung Jahrg. 46 1-2 (2004), pp. 33-35
- [8] Rosencwaig, A.; Gersho, A.: Theory of the photoacoustic effect with solids. J. Appl. Phys. 47 (1976), pp. 64-69
- [9] Busse, G.: Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal. Appl. Phys. Lett. 35 (1979), pp. 759-760
- [10] Bennett, C.A.; Patty, R.R.: Thermal wave interferometry: A potential application of the photoacoustic effect. Appl. Opt. 21 (1982), pp. 49-54.
- [11] Ziegler, M., Lucht, M., Maierhofer, C. "Vorrichtung zur thermografischen Prüfung mittels Hochleistungs-LED-Quelle," DE Patent DE 10 2012 103 975, May 07, 2012
- [12] Röllig, M., Steinfurth, H., Ziegler M.: Untersuchung von Hochleistungs-LEDs für den Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung mittels Thermografie. Tagungsband Thermographie-Kolloquium 2013, Stuttgart, ISBN 978-3-940283-52-8