

Thermografie mit optimierter Anregung für die quantitative Untersuchung von Delaminationen in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen

Jan P. MÜLLER¹, Sebastian GÖTSCHEL², Martin WEISER²,
Christiane MAIERHOFER¹

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

² Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB), Berlin

Kontakt E-Mail: jan.mueller@bam.de

Kurzfassung. Da kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) in anspruchsvollen sicherheitsrelevanten Einsatzgebieten wie im Automobilbau und in der Luftfahrt eingesetzt werden, besteht ein zunehmender Bedarf an zerstörungsfreien Prüfmethoden. Ziel ist die Gewährleistung der Sicherheit und Zuverlässigkeit der eingesetzten Bauteile. Aktive Thermografieverfahren ermöglichen die effiziente Prüfung großer Flächen mit hoher Auflösung in wenigen Arbeitsschritten. Ein wichtiges Teilgebiet der Prüfungen ist die Ortung und Charakterisierung von Delaminationen, die sowohl bereits in der Fertigung als auch während der Nutzung eines Bauteils auftreten können, und dessen strukturelle Integrität schwächen.

In diesem Beitrag werden CFK-Strukturen mit künstlichen und natürlichen Delaminationen mit Hilfe unterschiedlich zeitlich modulierter Strahlungsquellen experimentell untersucht. Verwendet werden dabei Anregungen mit Blitzlampen und mit frequenzmodulierten Halogenlampen. Mittels Filterfunktionen im Zeit- und Frequenzbereich wird das Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (CNR) der detektierten Fehlstellen optimiert. Verglichen werden anschließend die Nachweisempfindlichkeit, das CNR und die Ortsauflösung der zu charakterisierenden Delaminationen für die unterschiedlichen Anregungs- und Auswertungstechniken. Ergänzt werden die Experimente durch numerische Simulationen des dreidimensionalen Wärmetransportes.

Einleitung

Verbundmaterialien, wie carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) werden im Leichtbau verstärkt eingesetzt und ermöglichen steife und zugfeste Bauteile bei geringem Eigengewicht. CFK Bauteile werden häufig im Flugzeugbau, und in zunehmenden Maße im Fahrzeugbau eingesetzt. Sowohl im Herstellungsprozess, als auch im Einsatz sind die Detektion von Schäden als auch die Qualitätskontrolle der Bauteile wichtig. Zerstörungsfreie Diagnostik, wie die aktive Thermografie, ist dabei vorteilhaft, da jedes Bauteil getestet und danach eingesetzt werden kann. Sowohl Blitz-¹ als auch Lock-in-Thermografie² werden als bewährte Prüfverfahren eingesetzt, um große Flächen in einem Arbeitsschritt auf Defekte und Irregularitäten zu untersuchen. Beide Methoden sind sensitiv auf die Tiefe der Fehlstellen. Die Quantifizierung der Überdeckung, sowie die Ausdehnung des Defektes ist



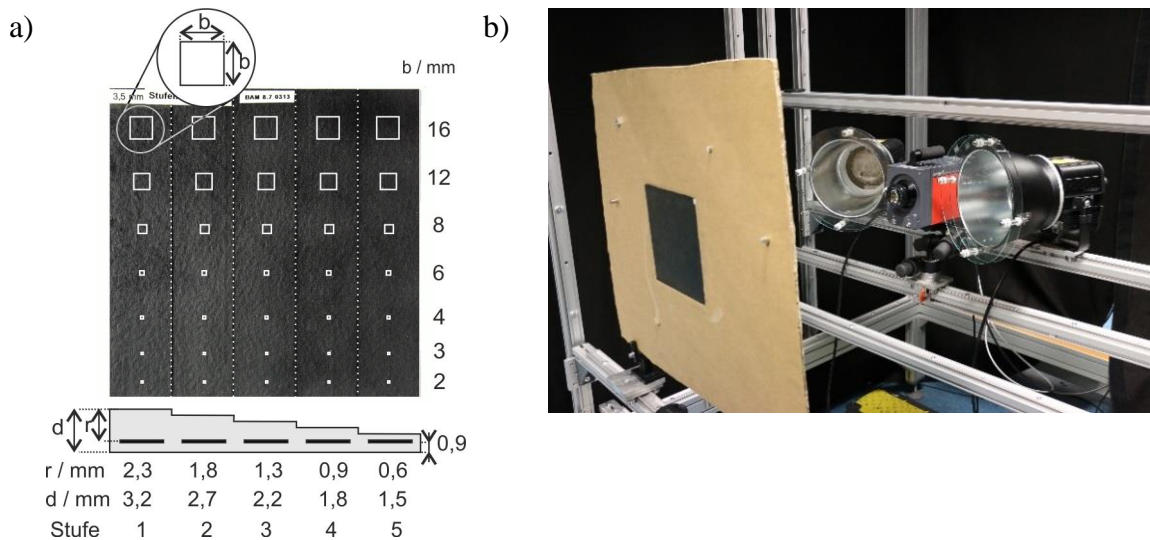


Abb. 1 a) Stufenprobekörper mit Delaminationen b) Experimenteller Aufbau für die Lock-in Thermografie. Es wird die Reflektionsgeometrie verwendet. Diese ermöglicht es, Proben zu untersuchen, welche nur von einer Seite zugänglich sind.

jedoch noch herausfordernd.³ Mit beiden Untersuchungsmethoden wird die Wärmeausbreitung in der Probe benutzt, um die (Rückseiten-) Geometrie oder interne Abweichungen in ihren thermischen Eigenschaften zu untersuchen. Ein Beispiel ist eine Delamination, bei der zwei Lagen des Verbundmaterials voneinander gelöst sind. Die Wärme wird durch die Beleuchtung der absorbierenden Oberfläche erzeugt, bei der Blitzanregung durch einen kurzen Impuls, bei der Lock-in Anregung durch eine über die komplette Messdauer sinusförmig modulierte Lichtquelle. In dieser Arbeit wird eine frequenzmodulierte Anregung verwendet, da die Tiefenempfindlichkeit der Lock-in-Messungen frequenzabhängig ist.

Experimentelle Methoden

Probekörper

Untersucht wird ein Stufenprobekörper, der aus mit Epoxidharz vorimprägnierten CFK-Faser-Halbzeugen (Prepreg) gefertigt wurde. Das verwendete Material KUTG 1406-12K (Fa. Krempel Group) besteht aus Fasern (UTS50F13-12K, 800 tex) aus 12k Filamenten, in unidirektionaler Bindungsart. Der Probekörper, mit einer Größe von 200 x 200 mm² besteht aus 12 bis 28 Lagen (Dicke 1,5 – 3,2 mm), der Aufbau der Schichten ist in Abb. 1 a) dargestellt. Die Schichten sind quasiisotrop gelegt, in der Schichtabfolge [90°, 0°, +45°, -45°]. Zwischen der 8. und 9. Lage, in 1 mm Abstand von der Unterseite, sind in jeder Stufe 7 doppelt gelegte Teflonplatten (je 0,1 mm dick) als künstliche Delaminationen eingebracht. Die Plättchen haben eine Größe von 3 x 3 mm² bis 16 x 16 mm². Der Probekörper wurde im Autoklav-Verfahren bei 180 °C und 7 bar Druck gehärtet.

Die anisotrope thermische Diffusivität der Probe wird in den drei Raumrichtungen bestimmt. Das Vorgehen, sowie die verwendeten Geräte, werden in einer weiteren Publikation beschrieben.⁴ An dieser Stelle wird lediglich eine kurze Zusammenfassung gegeben. Die Diffusivität senkrecht zur Oberfläche der Probe wird durch eine Transmissionsmessung nach der Methode von Parker bestimmt^{1, 5}. Die beiden lateralen Diffusivitäten lassen sich durch eine linienförmige Erwärmung der Probe durch einen Laser mit gaussförmigen Strahlprofil bestimmen^{4, 6}. Die Proben wurden dazu mit einem kurzen

Laserimpuls (Dauer 1 ms, Leistungsdichte 720 W / cm^2) erwärmt. Die Verbreiterung des erwärmten Bereiches (quer zu der Linie) wird mit einer MWIR-Kamera aufgezeichnet, der Versuchsaufbau ist ausführlicher in Ref. [4] beschrieben. Die kurze Anregung wird gewählt, damit ein kurzer Beobachtungszeitraum von 0,1 s gewählt werden kann. In dieser Zeit wird die Oberflächentemperatur der Probe im Wesentlichen von den thermischen Eigenschaften der obersten Lage des Laminats bestimmt. Die Breite der Linie b wird durch die Anpassung einer Gauss-Funktion bestimmt, und der Parameter durch $A(t) = \bar{\alpha} \cdot t = b^2/4$. Die Diffusivitäten $\bar{\alpha}$ lassen sich durch die Steigung der jeweiligen Parameter bestimmen. Da CFK ein Zweikomponentenmaterial ist, variiert die gemessene laterale Diffusivität leicht mit dem Ort. Daher wird diese über einen größeren Bereich gemittelt.

Experimentelle Verfahren

Um die Defekte in der Probe zu detektieren wurden zwei unterschiedliche Verfahren verwendet: Lock-in Thermografie und Blitzthermografie. Bei der Lock-in Thermografie wird die Probe über eine Zeitdauer von 1200-3000 s von zwei Halogenlampen (Fa. Hedler, 2 Leuchtmittel à 1000 W) beleuchtet. Vor den Lampen sind zwei 2,9 mm dicke Glasscheiben montiert, zur Minderung des Infrarotanteils der Lampen. Diese beleuchten die Probe in 60 cm Abstand unter einem Winkel von 25° . Die Helligkeit der Lampen wird von einem Dimmer (Fa. Eurolight, LD 6230) über ein Analogsignal von 0-10 V gesteuert. Die Analogspannung wird von einem Arbiträr-Funktionsgenerator erzeugt (Fa. Rohde und Schwarz, HMF 2525). Der Funktionsgenerator wird benutzt, um Sinusspannungen bei Frequenzen von 0,01 bis 0,1 Hz zu erzeugen, mit einer Amplitude (Minimum zu Maximum) von 3 V, mit 0 V als Minimalspannung. Zudem können durch ein Matlab-Programm Textdateien erzeugt werden, welche der Funktionsgenerator in frequenzmodulierte Sinussignale (Chirp-Signale) umsetzt. Dabei wird die Amplitude des Signals gleich gewählt. Die Intensität des Lichts wird neben der Probe durch eine Silizium-Fotodiode (Thorlabs, PDA 36A-EC) in ein Spannungssignal konvertiert. Vor der Fotodiode sind metallische Neutralfilter mit ND 1,6, sowie eine Irisblende montiert. Die Lichtintensität ist ein Maß für die Wärmemenge, welche zu einem Zeitpunkt in den Probekörper eingetragen wird.

Die LWIR-Kamera beobachtet die Oberfläche der Probe in Reflektionsgeometrie. Verwendet wird eine Kamera Image-IR 8800 (Fa. Infratec) mit einem $f = 25 \text{ mm}$ Objektiv ($f / 1,4$, Bildwinkel $23^\circ \times 19^\circ$). Die Kamera ist im Spektralbereich von 8-9,4 μm empfindlich und besitzt einen HgCdTe Focal-Plane-Array-Sensor mit 640×512 Pixeln (Pitch 16 μm), bei einer NETD von 60 mK (bei 30°C) mit einer Integrationszeit von 140 μs (Kalibrationsbereich 0- 60°C). Die Driftkompensation der Kamera war ausgeschaltet, um eine fortlaufende Datenaufnahme zu gewährleisten. Die Spannung des Fotodiodenverstärkers wird synchron zu den aufgenommenen Themogrammen vom Analog-Digital-Wandler der Kamera aufgezeichnet.

Die Eindringtiefe kann abhängig von der Frequenz f der modulierten thermischen Anregung durch die Diffusionslänge

$$\mu = \sqrt{\alpha_z / (\pi f)}$$

abgeschätzt werden.⁷ Diese ist abhängig von der Diffusivität α_z . Durch eine Fouriertransformation (FT) über der zeitlichen Achse kann ein thermisches Signal an der Oberfläche, welches bei einer Frequenz f auftritt, einer Tiefeninformation zugeordnet werden. Wird ein Anregungssignal mit einer festen Frequenz f verwendet, werden Fehlstellen in einer bestimmten Tiefe $z \propto \mu$ in der Oberflächentemperatur der Probe sichtbar. Um die gesamte Probe zu untersuchen, müssen daher Messungen bei mehreren Frequenzen durchgeführt werden. Eine frequenzmodulierte Anregung ermöglicht es, einen bestimmten Tiefenbereich der Probe mit einer Messung zu untersuchen.

Blitzthermografie hingegen regt die Probe nur kurzzeitig an. Verwendet werden vier Blitzlampen (Fa. Hensel Studio Technik, EH Pro 6000) mit einer Energie von 6 kJ. Vor den Lampen ist je eine 8 mm dicke Platte aus Acrylglas montiert, um den IR-Anteil der Strahlung stark zu filtern⁸. Der zeitliche Verlauf des Strahlungsleistung der Blitzlampen lässt sich mit einer mit einem Gauss gefalteten Exponentialfunktion beschreiben, es ergibt sich für die Exponentialfunktion eine Halbwertszeit $\tau_{FWHM} = 2,0 \text{ ms}$.⁴ Messgröße in der Blitzthermografie ist die Abkühlung der Probenoberfläche nach der Blitzanregung. Dabei wird die Wärmebildkamera ImageIR 9830 (Fa. Infratec) mit einem InSb-Sensor mit 1280 x 1024 Pixeln (Focal-Plane-Array, 15 μm Pitch) mit einer spektralen Empfindlichkeit von 3-5 μm verwendet, mit einem Objektiv $f = 100 \text{ mm}$ ($f / 2.0$, Bildwinkel $11^\circ \times 9^\circ$). Es wird der Kalibrationsbereich 0-60°C mit einer Integrationszeit von 640 μs verwendet, bei einer Bildwiederholrate von 100 Hz. Der Zeitpunkt des Blitzes wird vom Aktiv-Steuermodul (Fa. Infratec) gesteuert, welches das Auslösen mit der Aufnahme der Thermogramme synchronisiert. Neben der Probe ist eine geschwärzte Silberplatte montiert. Diese ermöglicht es, den Energiefluss der Blitzanregung zu bestimmen⁹.

Durch die Anregung mit einem kurzen Impuls wird die Antwort der Probe in einem breiten Frequenzbereich mit einer einzelnen Messung abgefragt. Daher bietet sich für die Auswertung an, analog zu der Lock-in-Thermografie, die Fouriertransformierte der zeitabhängigen Oberflächentemperatur zu betrachten, welche für jede Frequenz eine komplexe zweidimensionale Matrix ergibt. Als Auswertungsgröße kann sowohl der Betrag dieser Matrix, als auch die Phase verwendet werden. In der Blitzthermografie, wie äquivalent auch bei der Lock-in-Thermografie, haben sich die Phasenbilder als empfindlicher für kleine Fehlstellen erwiesen. Daher lautet die Bezeichnung für die Mess- und Auswertungsmethode in der Blitzthermografie Puls-Phasen-Thermografie (PPT).¹⁰

Ergebnisse der Messungen und der Simulation

Lock-in Thermografie

Die Helligkeit der Halogenlampen wird durch eine oszillierende Spannung gesteuert, die Intensität des Lichts wird durch die Photodiode gemessen. Die Intensität ist ein Maß für den Wärmeeintrag in die Probe. In Abb. 2 a) ist das Signal der Photodiode für eine Spannung, welche mit $f = 0,05 \text{ Hz}$ durch den Frequenzgenerator moduliert wird, mit einer blauen Linie dargestellt. Damit setzt sich das Signal aus einem oszillierenden und einem konstanten Anteil zusammen. Die Intensität der Halogenlampen folgt der Steuerspannung

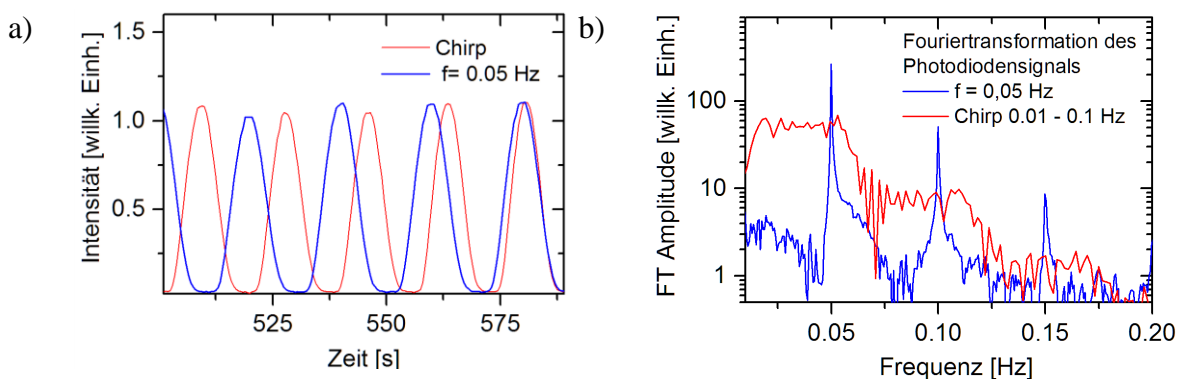


Abb. 2: a) Ausschnitt des Photodiodensignals für eine Messung mit $f = 0,05 \text{ Hz}$ und mit Chirp 0,01 bis 0,1 Hz. Die Photodiode ist im Bereich von 0,35 – 2 μm empfindlich. b) Amplitude der Fouriertransformation der in a) gezeigten Signale.

nicht-linear. In der Teilabbildung b) wird die Amplitude der FT des Signals, ebenfalls mit einer blauen Linie, dargestellt. Neben der Grundfrequenz von 0,05 Hz sind Oberton-Frequenzen vorhanden, dieses ist auf das nicht-lineare Verhalten der Halogenlampen zurückzuführen. Die Amplitude der ersten Obertonschwingung (Frequenz 0,1 Hz) ist um den Faktor 5 geringer als die Amplitude der Grundfrequenz.

Um die Defekte in der Probe zu detektieren, ist eine frequenzmodulierte Anregung von Vorteil, da die Fehlstellen in einem größeren Tiefenbereich mit einer Messung erfasst werden können. In der Teilabbildung a) wird mit roter Farbe das Signal einer Chirpanregung ($f = 0,01-0,1$ Hz, Dauer 1024 s) gezeigt, in b) die FT des Signals.

Die LWIR-Kamera nimmt bei jeder Messung 50 Thermogramme $T_n(x, y)$ auf, bevor die Halogenlampen angeschaltet werden. Das 15. Thermogramm wird für den Hintergrundabzug $T'_n(x, y) := T_n(x, y) - T_{15}(x, y)$ benutzt. Für die weitere Auswertung wird nur ein begrenzter Zeitbereich verwendet, von einem Minimum des Photodiodensignals am Anfang bis zu einem am Ende. Für die Chirpmessung wurde der gesamte Zeitbereich von 1024 s bei einer Bildrate von 2 Hz für die Auswertung benutzt. Zunächst werden in den Thermogrammen auf der Probe Stellen ohne Defekte identifiziert und in diesen eine Region of Interest (ROI) definiert, bei der Stufenprobe auf jeder Stufe eine. Der Mittelwert dieser ROI wird gebildet und von dem Signal der Nulldurchgang der 2. Ableitung (Wendepunkte) durch einen Savitzki-Golay-Differenzierungsfilter bestimmt, die Polynomordnung 3 wurde gewählt bei einer Fenstergröße von $1/3$ der durchschnittlichen Periode. Die gesamten Thermogramme an den Wendepunkten des Signals werden nun benutzt, um durch eine Kurvenanpassung in jedem Pixel der Sequenz den kontinuierlichen Anteil des gemessenen Signals zu bestimmen. Die Anpassung für jeden Pixel ist notwendig, da die Aufheizung aufgrund der ungleichmäßigen Ausleuchtung durch die Halogenlampen auf der Oberfläche der Probe variiert. Die Berücksichtigung nur von ausgewählten Thermogrammen reduziert die Rechenzeit. Durch jeden Bildpunkt der ausgewählten Thermogramme wird ein Polynom 7. Ordnung über die Zeitachse angepasst. Es ergibt sich der Teil des Temperatursignals $P_n(x, y)$, welcher durch den kontinuierlichen Anteil der Anregung und die Abkühlung der Probe durch Konvektion bestimmt wird. Nach Abzug des Polynoms von allen vorhandenen Thermogrammen entsteht die Sequenz $S_n(x, y) = T'_n(x, y) - P_n(x, y)$, welche den oszillierenden Anteil der Temperaturentwicklung enthält. Diese Sequenz $S_n(x, y)$ ist geeigneter als die Thermogramme $T'_n(x, y)$ um die weitere Auswertung durch die FT durchzuführen, da der zeitliche Mittelwert der Pixel nahe null liegt.

Fouriertransformation des gesamten Bereiches: Phasenbilder

Die Sequenz des oszillierenden Anteils $S(x, y)$ wird für alle weiteren Auswertungen verwendet. Zunächst wird die Fouriertransformation von $S(x, y)$ über den gesamten Bereich durchgeführt, es ergibt sich die Sequenz $P_f(x, y)$, mit einem Wertebereich von $-\pi$ bis $+\pi$. Da das zeitliche Rauschen der Messdaten sich in ein Rauschen der Phasen überträgt, besonders bei geringeren Amplituden der Pixel, wird für jedes Phasenbild $P_f(x, y)$ der Median M_f der Pixel eines großen rechteckigen Bereichs innerhalb der Probe gebildet. Das ergibt einen Phasenwert M_f pro Phasenbild, welcher vom Rauschen wenig beeinflusst wird. Es wird die Differenz $\Delta_f(x, y) = P_f(x, y) - M_f$ berechnet. Liegt $\Delta_f(x, y) \notin (-\pi, \pi]$ wird für jeden Pixel 2π addiert bzw. abgezogen, um die Bedingung zu erfüllen. Durch die Verschiebung der Phase um Vielfache von 2π ändert sich das Ergebnis nicht. Somit wird eine Sequenz von Phasenbildern erhalten, die räumlich und zeitlich weitgehend kohärent ist. Da Phasensprünge innerhalb einer ROI vermieden werden, ermöglicht der Bearbeitungsschritt eine kontrastreiche Abbildung und eine korrekte Mittelwertbildung.

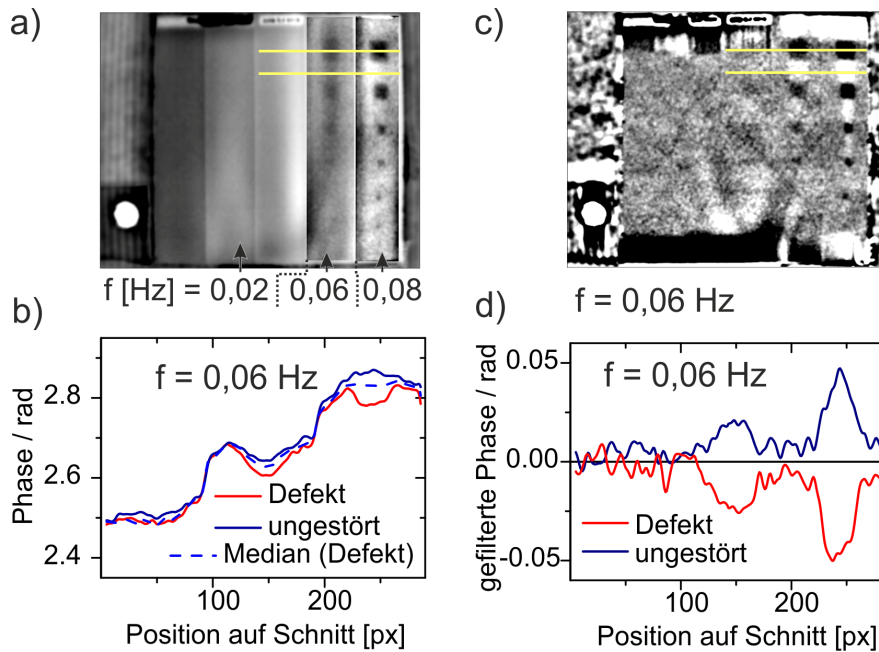


Abb. 3a) Aus Phasenbildern mit optimierten Frequenzen zusammengesetztes Gesamtbild des Stufenprobekörpers. b) Schnitt durch die Defekte mit der Größe $16 \times 16 \text{ mm}^2$, im Phasenbild $f = 0,06$ Hz. Die Schnittlinien sind in Teilabbildungen a) und c) durch eine gelbe Linie gekennzeichnet. c) Mit einem Fensterfunktion gefiltertes Phasenbild, es wird ein Medianfilter verwendet. Die komplette Probe kann kontrastreich abgebildet werden. d) Schnitt durch das gefilterte Phasenbild $f = 0,06$ Hz.

Die Phasenbilder werden, anfangend von den niedrigen Frequenzen, durchgesehen und für die Stufen des Probekörpers die Frequenzen herausgesucht, bei denen die Defekte mit maximalem Kontrast sichtbar sind, sowie eine Frequenz, bei welcher der gesamte Probekörper deutlich abgebildet wird. Aufgrund des in den Thermogrammen vorhandenen Rauschens, werden die Bilder zur Darstellung mit einem 2D-Gaussfilter mit $\sigma = 2$ Pixel geglättet. In Abb. 3 a) werden die optimalen Phasenbilder für die ersten zwei Stufen dargestellt, die Defekte in den dickeren Stufen sind nicht detektierbar. Der Rest des Probekörpers wird mit einem Phasenbild bei einer niedrigeren Frequenz dargestellt. Die Teilabbildung b) zeigt einen Schnitt durch den Phasenverlauf im Stufenprobekörper von der 3. bis 5. Stufe bei $f = 0,06$ Hz. Dargestellt sind mit durchgezogenen Linien Schnitte durch Defekte sowie einen ungestörten Bereich. Deutlich zu erkennen ist der Phasenverlauf, welcher von der Stufenstruktur des Probekörpers hervorgerufen wird. Der Phasenkontrast zwischen zwei Stufen ist wesentlich größer als der Phasenkontrast zwischen Defekt und ungestörtem Bereich. Daher muss, um Defekte hervorzuheben, jede Stufe im Phasenbild einzeln in der Darstellung getrennt angesteuert werden.

Um diesen Prozess für die Defekterkennung zu vereinfachen, wird im Folgenden ausgenutzt, dass der Probekörper vertikal translationssymmetrisch ist. Es wird ein neues Bild erstellt, in dem auf jede vertikale Pixelreihe des Phasenbildes der Frequenz $0,06$ Hz ein 2D-Medianfilter mit einer Fenstergröße von 60 Pixeln angewandt wird, ein Schnitt durch dieses Bild ist in b) mit einer gestrichelten Linie eingezeichnet. Dieses gefilterte Bild wird nun vom ursprünglichen Bild abgezogen, das Ergebnis ist in der Teilabbildung c) dargestellt, die entsprechenden Schnitte analog zu b) in Teilabbildung d). Der Medianfilter hebt die Defekte hervor, so dass diese für die weitere Auswertung klar markiert werden können. In den Schnitten in d) ist zu sehen, dass das gefilterte Signal im ungestörten Bereich der von den großen Defekten beeinflusst wird. Dies schränkt den Kontrast des gefilterten Bildes erfreulicherweise nicht ein. Die Phasendifferenzen, durch die Stufenstruktur des Probekörpers, sowie durch laterale Wärmeflüsse aufgrund der ungleichmäßigen Ausleuchtung der Probe, werden ausgeglichen. An den Rändern wird der Phasenverlauf von

der umgebenden Pappe und dem Probekörper durch den Filter vermischt, daher wären defekte Stellen dort nicht erfassbar. Abhilfe könnte dadurch geschaffen werden, dass der Filter durch eine Maskenfunktion auf die Probe begrenzt wird. Die Berechnung des Medianfilters ist automatisiert möglich. Da Defekte in einem einzigen angesteuerten Phasenbild pro Frequenz erkannt werden können, wird die Defekterkennung einfacher und schneller.

Blitzthermografie

Für die Messungen mit Blitzthermografie wurden bei einer Aufnahmezeit von 100 Hz 3100 Thermogramme aufgenommen. Der Blitz wurde nach 15 Bildern ausgelöst. Das 12. Bild der Sequenz wird für den Hintergrundabzug verwendet, es werden nur die Thermogramme nach dem Blitz betrachtet. Die Thermogrammsequenz wird, ähnlich wie bei dem Lock-in-Verfahren, über jeden Pixel zeitlich Fourier-transformiert, es werden die Phasenbilder betrachtet. In Abb. 4 a) werden für jede Stufe ausgewählte Phasenbilder gezeigt, bei denen der Kontrast der Fehlstellen optimiert ist. Dabei wird ein gaußscher Glättungsfilter mit $\sigma = 2 \text{ px}$ verwendet. Das Phasenbild ist für jede Stufe getrennt angesteuert. Wiederum lässt sich der Medianfilter, mit einem Fenster von $1 \times 120 \text{ px}^2$, verwenden um den Phasenverlauf durch die Geometrie des Stufenprobekörpers abzuschätzen. In Teilabbildung b) ist die Differenz des unbearbeiteten Phasenbildes und des gefilterten dargestellt, für zwei Frequenzen. Damit können in einer Abbildung sowohl die Fehlstellen mit geringeren, als auch mit größeren Überdeckungen dargestellt werden. Diese Abbildung wurde für die Erkennung der Lage der Fehlstellen benutzt.

In der Mitte der erkannten Fehlstellen wird eine ROI F mit den Abmessungen $5 \times 5 \text{ px}^2$ definiert, deren Mittelwert \bar{F} berechnet wird. Senkrecht unter jeden Defekt wird eine ROI U um ungestörten Bereich von $40 \times 50 \text{ px}^2$ ausgewählt. Diese ist größer gewählt, damit zusätzlich zu den Mittelwerten \bar{U} die Standardabweichung s_u bestimmt werden kann.

Simulation der Blitzanregung

Die Kenntnis der Material- und Messparameter ermöglicht es, die Wärmeausbreitung im Probekörper mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) zu simulieren. Dazu wird die Kaskade7-Toolbox verwendet.¹¹⁻¹³ Die Berechnungen sind für die beiden dünnsten Stufen

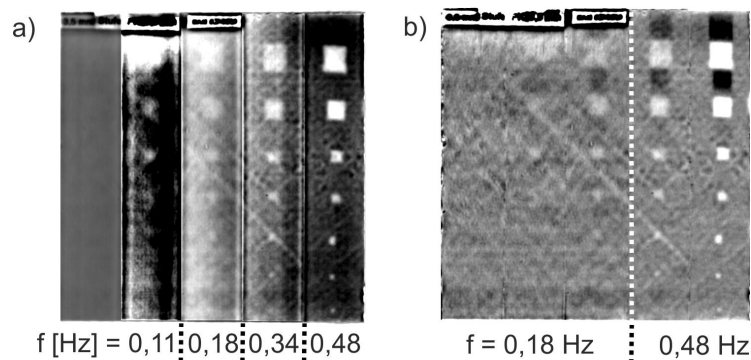


Abb. 4 a) Zusammengesetztes Phasenbild: Für jede Stufe wurde ein Phasenbild bei einer Frequenz f ausgewählt, bei welcher die Fehlstellen mit optimalem Kontrast sichtbar sind. Die Phasenbilder werden getrennt für jede Stufe angesteuert. b) Phasenbild nach Abzug eines mediangefilterten Bildes, analog zum Vorgehen bei den Lock-in-Phasenbildern. Hier wird ein Fenster von $1 \times 120 \text{ px}^2$ verwendet. Dieses Bild wird für die Kennzeichnung der Defekte benutzt. Dieses Bild ist aus zwei Phasenbildern bei den Frequenzen $f = 0,18$ und $0,48 \text{ Hz}$ erstellt worden, um auch die tieferliegenden Defekte darstellen zu können.

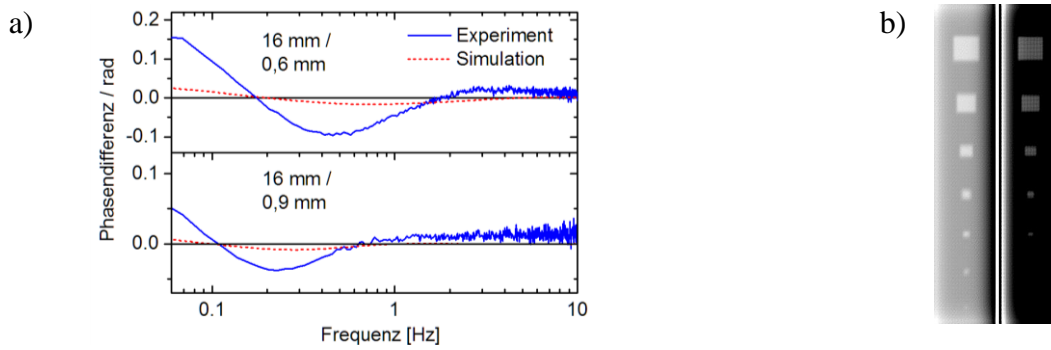


Abb. 5 a) Phasendifferenz zwischen einer Fehlstelle und einem ungestörten Bereich für Experiment und Simulation. Die Defektgröße b und die Überdeckung r sind links oben durch b / r gekennzeichnet. Eine blaue durchgezogene Linie zeigt den Phasenverlauf im Experiment, die gebrochene rote Linie die Simulation. b) Phasenbild der Simulation bei $f = 0,5$ Hz. Die beiden Stufen sind getrennt angesteuert, um die Defekte deutlich sichtbar zu machen.

durchgeführt worden, da alle relevanten Phänomene in dieser Geometrie sichtbar werden. Der Probekörper wurde mit einem anisotropen Gitter aus 614.400 Tetraedern diskretisiert. Die Tetraederelemente sind in z-Richtung (in die Tiefe) um den Faktor 2-30 gestaucht, um die Schichtstruktur der Probe aufzulösen. An der Oberfläche der Probe werden die kleinsten Tetraederelemente verwendet, da dort aufgrund der kurzen Dauer des Heizimpulses die größten Wärmegradienten auftreten. Es wird eine Anregung in Stufenform mit der Dauer von 3 ms simuliert. Die Randbedingungen beinhalten Konvektion und Wärmestrahlung, es wird eine Raumtemperatur von 297 K, sowie eine komplette Absorption der Lichtenergie angenommen.

Die Material- und Messparameter sind in Tab. 1 zusammengefasst. Um die Simulation mit dem Experiment vergleichen zu können, wird die simulierte Thermogrammsequenz fouriertransformiert und die Phasendifferenz $D = \bar{F} - \bar{U}$ für die Fehlstellen berechnet.

Die Ergebnisse sind für die Defekte mit $b = 16$ mm in Abb. 5 a) dargestellt. Der Phasenverlauf zeigt ein Minimum bei niedrigen Frequenzen, nach einem Nulldurchgang steigt der Verlauf zu einem Maximum an. Dieser höherfrequente Anteil entsteht durch die Temperaturentwicklung kurze Zeit nach dem Blitz.

Das Minimum von D liegt für Experiment und Simulation bei ähnlichen Frequenzen. Die Phasenverläufe weichen jedoch voneinander ab. In Teilabbildung b) wird ein Phasenbild der Simulation bei der Frequenz $f = 0,5$ Hz gezeigt, es ist deutlich zu sehen, dass das Gitter die Fehlstellen gut auflöst. Als nächster Schritt wird eine Variation der Simulationsparameter durchgeführt. In bereits durchgeführten Simulationen⁴ ließ sich eine gute Übereinstimmung des experimentellen Signals mit dem simulierten zeigen. Finales Ziel ist es für einen Prüfkörper aus CFK die Geometrie oder die Form eines Schades im Prüfkörper zu rekonstruieren. Das wird durch eine Anpassung der simulierten Geometrie durch Vergleich mit den experimentellen Daten mit den Simulationen erreicht.

Wärmekapazität c [J / kg K] ¹⁴	1200
Diffusivität α_x (Laserlinie) [m ² / s]	1,25
Diffusivität α_y (Laserlinie) [m ² / s]	2,27
Diffusivität α_z (Parker) [m ² / s]	$8,6 \pm 0,4$
Energie-Fluss [kJ / m ²]	4.2 ± 0.8

Tab. 1: Tabelle der verwendeten Simulationsparameter. Die z-Koordinate ist in die Tiefe der Probe, die x-Koordinate horizontal ausgerichtet. Die x und y-Koordinaten rotieren entsprechend dem Lageraufbau.

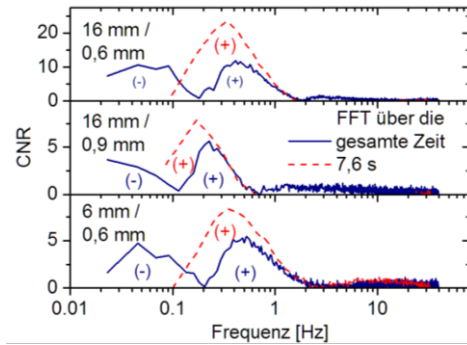


Abb. 6: CNR für drei ausgewählte Fehlstellen (mit b / r gekennzeichnet) der Blitzthermografie-Messung, über der Frequenz aufgetragen. Die Fehlstellen sind durch ihre Breite und Überdeckung entsprechend Abb. 5 gekennzeichnet. Mit der blau durchgezogenen Linie wird das CNR dargestellt, welches nach einer FT über den gesamten Zeitbereich der Messung berechnet wird. Die rot gebrochene Linie zeigt das CNR nach einer FT über die ersten 7,6 s der Thermogrammsequenz. In dem mit (-) gekennzeichneten Frequenzbereichen sind die Phasenbilder invertiert.

Optimierung des Kontrast-Rausch-Verhältnis

Wie gut sich eine Fehlstelle gegenüber dem Hintergrund hervorhebt, lässt sich quantitativ durch das Kontrast-Rausch-Verhältnis (CNR) beschreiben. Das CNR berechnet sich aus den gemittelten Phasen der Fehlstelle \bar{F} und des benachbarten Bereiches ohne Defekt \bar{U} durch

$$CNR = |\bar{F} - \bar{U}| / s_U,$$

wobei s_U die Standardabweichung des Einzelwerts im ungestörten Bereich bezeichnet. In der Abb. 6 sind die CNR für drei Defekte dargestellt. Mit einer durchgezogenen blauen Linie wird das CNR gezeigt, welches durch eine FT über den gesamten Zeitbereich berechnet wird. In den Phasenbildern sind sowohl bei positiver als auch bei negativer Phasendifferenz, mit (-) markiert, Defekte sichtbar. Deshalb lassen sich zwei Frequenzbereiche wählen, in denen kontrastreiche Phasenbilder gefunden werden können. Interessanterweise ist das CNR in beiden Bereichen vergleichbar.

Wird die FT über einen kürzeren Zeitbereich berechnet, in dem die letzten Bilder der Thermogrammsequenz ausgelassen werden, fallen die negativen CNR bei kleinen Frequenzen weg, allerdings erhöht sich das Maximum bei den Frequenzen größer als 0,1 Hz. Somit führt eine gemessene Sequenz von kürzerer Dauer zu einem höheren CNR. Zu beachten ist allerdings, dass der Nulldurchgang im Phasenverlauf, und damit im CNR,

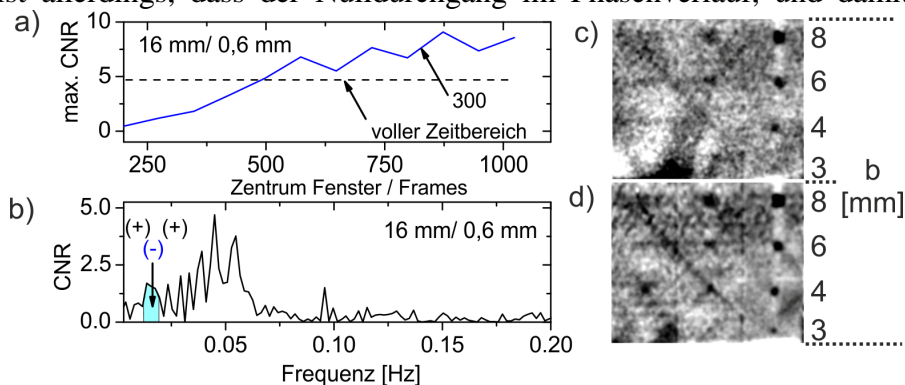


Abb. 7: Kurzzeit FT für Lock-in Messungen a) Maximum des CNR bei einem zeitlich verschobenen Fenster im Vergleich zum CNR bei Fenster über den vollen Zeitbereich. b) CNR über der Phase aufgetragen für FT über den kompletten Zeitbereich. In dem mit (-) gekennzeichneten Bereich ist die Phasendifferenz < 0 . c) Ausschnitt aus dem Phasenbild bei $f = 0,06$ Hz, FT über dem kompletten Zeitbereich. Gekennzeichnet ist die Fehlstellengröße in mm, die Fehlstellen in den drei Stufen haben Überdeckungen von 1,3; 0,9 und 0,6 mm. d) Phasenbild bei FT über 300 Thermogramme, in der Mitte der Messdauer. Eine weitere Fehlstelle wird sichtbar, das Phasenrauschen ist geringer.

wegfällt. Zugleich verschiebt sich die Lage des Maximums, welche für quantitative Tiefenbestimmungen wichtig ist – zusätzlich zur geringeren Frequenzauflösung durch die FT über einen kleineren Zeitbereich.

Analog zum Vorgehen bei der Auswertung der Blitzmessungen kann auch das CNR der frequenzmodulierten Lock-in Messung durch FT über einen begrenzten Bereich ausgewertet werden. Da die Anregung bei dieser Messung kontinuierlich ist, ist es sinnvoll, das Fenster für die FT über den Zeitbereich zu verschieben, und für die Defekte das maximale $CNR_{max} = \max(CNR(f))$ für die Defekte zu bestimmen. In Abb. 7 a) wird das maximale CNR für den größten Defekt auf der ersten Stufe von rechts bestimmt, in Teilabbildung b) ist zum Vergleich das $CNR(f)$ über den vollen Zeitbereich gezeigt. Die Fenstergröße von 300 Frames hat sich als optimal erwiesen. Es ist deutlich zu sehen, das CNR_{max} bei kurzen Zeiten nach Beginn der Messung gering ist, mit der Zeit auf ein kontinuierliches Niveau ansteigt. Als Demonstration für das erhöhte CNR werden in den Teilabbildungen c) und d) Phasenbilder bei vergleichbaren Frequenzen gezeigt – in c) nach FT über den vollen Zeitbereich und in d) durch das Fenster begrenzt. Besonders in der 2. Stufe von rechts ist ein verstärkter Kontrast durch ein geringeres Phasenrauschen zu sehen, durch den ein weiterer Defekt sichtbar wird.

4. Zusammenfassung

Lock-in- und Blitzthermografie lassen sich als komplementäre Verfahren zur Untersuchung von CFK-Probekörpern einsetzen. Mit beiden Verfahren ermöglicht die Fouriertransformation eine Interpretation der Thermogrammsequenzen, die Frequenz mit dem maximalen Kontrast zeigt für beide Verfahren eine deutliche Tiefenabhängigkeit, die optimale Frequenz unterscheidet sich jedoch zwischen Blitz- und der (modulierten) Lock-in Thermografie. Durch eine geeignete Auswahl des Bereiches für die Fourier-Transformation lässt sich eine deutliche Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses erreichen. Dadurch können Fehlstellen ohne eine weitere Messung kontrastreicher abgebildet werden.

Danksagung

J. M. und S. G. möchten dankbar auf die Förderung des Forschungsprojekts „Entwicklung und Validierung echtzeitfähiger Rekonstruktionsverfahren für die quantitative aktive Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung von Faserverbundmaterialien“ durch die DFG, Kennziffer WE 2937/6-1, hinweisen.

Referenzen

- [1] W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler and G. L. Abbott, *J. Appl. Phys.* **32** (9), 1679 (1961).
- [2] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, *J. Appl. Phys.* **71** (8), 3962 (1992).
- [3] D. P. Almond and S. G. Pickering, *J. Appl. Phys.* **111** (9), 093510 (2012).
- [4] J. P. Müller, S. Götschel, C. Maierhofer and W. Martin, in *AIP Conf. Proc., 43rd Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (Atlanta, GA, USA, 2017), Vol. 1806, pp. 100006.
- [5] ASTM International, (West Conshohocken, PA, 2013), Vol. E1461.
- [6] C. S. Welch, D. M. Heath and W. P. Winfree, *J. Appl. Phys.* **61** (3), 895 (1987).
- [7] H. S. Carslaw and Jaeger, J.C., *Conduction of Heat in Solids*, 2nd, reprint 2001 ed. (Oxford Science Publications, 2001).
- [8] P. Boulet, J. Gérardin, Z. Acem, G. Parent, A. Collin, Y. Pizzo and B. Porterie, *Int. J. Therm. Sci.* **82**, 1 (2014).
- [9] R. Krankenhagen and C. Maierhofer, *Infrared Phys. Techn.* **67**, 363 (2014).
- [10] X. Maldague and S. Marinetti, *J. Appl. Phys.* **79** (5), 2694 (1996).

- [11] S. Götschel, C. Maierhofer, J. P. Müller, N. Rothbart and M. Weiser, in *19th World Conference on Non-Destructive Testing* (DGZfP, Munich, 2016).
- [12] S. Götschel, M. Weiser and A. Schiela, in *Advances in DUNE* (Springer, 2012), pp. 101.
- [13] M. Weiser, M. Röllig, R. Arndt and B. Erdmann, *Heat. Mass. Transf.* **46** (11), 1419 (2010).
- [14] X. Maldague, *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. (Wiley Interscience, 2001).