

Standardisierung der Lockin-Thermografie: Vorstellung des TNS-Projektes und Auswahl der Probekörper

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

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

** IKT Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart

Kurzfassung. Ziel des Verbundprojektes zwischen der BAM und dem IKT der Universität Stuttgart ist die Festlegung einer einheitlichen Vorgehensweise für die Auswahl der Gerätekomponenten und für die Durchführung von Prüfungen mit der Lockin-Thermografie. Daraus soll ein Standard abgeleitet werden, der die Prüfung unterschiedlicher Materialsysteme auf Fehlstellen mittels Lockin-Thermografie unter Berücksichtigung verschiedener Anregungsquellen ermöglicht. In diesem Beitrag wird die Entwicklung der Probekörper vorgestellt, die in diesem Projekt untersucht und später als Referenzprobekörper verwendet werden können.

Einführung

Bei der Lockin-Thermografie wird das zu untersuchende Bauteil periodisch moduliert erwärmt und die resultierende zeitabhängige Oberflächentemperatur mit einer Infrarot(IR)-Kamera erfasst. Schon während der Messung (Online Lockin) oder im Anschluss (Offline Lockin) wird das Messsignal der Oberflächentemperatur mit dem Anregungssignal korreliert. Beim Offline Lockin werden die Messdaten der IR-Kamera über mehrere Anregungsperioden erfasst und anschließend mit Hilfe der Fouriertransformation (Fast Fourier Transformation FFT) in ein Amplituden- und ein Phasenbild bei der Anregungsfrequenz umgerechnet.

Bereits in den 1970iger Jahre erfolgten, noch entkoppelt von der Thermografie, photothermische Untersuchungen, bei denen der Prüfkörper punktuell moduliert beleuchtet und die resultierende lokale Temperaturmodulation rasternd in Form ihrer Amplitude und Phase untersucht wurde [1]. Bei diesen Untersuchungen, die theoretisch über das Modell der thermischen Wellen beschrieben werden können, hängt die Tiefenreichweite von der Modulationsfrequenz der optischen Anregung ab [2], wobei die Phase eine höhere Tiefenreichweite als die Amplitude hat [3]. Thermische Wellen zeigen Interferenzeigenschaften durch Überlagerung der an der Oberfläche erzeugten Wellen mit den an inneren Strukturen reflektierten Anteilen. Der an der Oberfläche gemessene resultierende

Phasenwinkel hängt dabei mindestens von der Dicke und dem thermischen Reflexionskoeffizienten ab [4]. Dies wird zur photothermischen Schichtdickenmessung mittels thermischer Wellen ausgenutzt und ist in der DIN EN 15042-2, die 2006 vom Technischen Komitee CEN/TC 262 „Metallische und andere anorganische Überzüge“ basierend auf der DIN 50992-2 erarbeitet wurde, festgelegt. Das zuständige Gremium im DIN ist der Arbeitsausschuss NA 062-01-61 AA Mess- und Prüfverfahren für metallische und andere anorganische Überzüge im Normenausschuss Materialprüfung (NMP). Hier wird als Anwendungsgebiet jedoch nur auf die Schichtdickenmessung eingegangen. Bildgebende Systeme zur Erfassung der IR-Strahlung werden nicht berücksichtigt.

Abweichungen vom eindimensionalen Modellfall lassen sich z. B. auf laterale Wärmeflüsse zurückführen, die Rückschlüsse auf Strukturen erlauben, die senkrecht zur Oberfläche orientiert sind [5]. Punktweise rasternde photothermische Abbildungsverfahren sind prinzipiell langsam, da nacheinander an jedem Punkt der Probe gemessen werden muss. Eine flächige Erfassung der modulierten Wärmestrahlung mit Thermografiekameras wurde daher schon relativ früh angedacht [6] und dann später als Lockin-Thermografie innerhalb verschiedener Konzepte verwirklicht [7, 8, 9].

Durch die thermische Anregung der ganzen Probenoberfläche beispielsweise mit Halogenlampen und der flächigen Erfassung der Wärmestrahlungsmodulation mit einer Thermografiekamera lassen sich Messungen in einem Bruchteil der für photothermische Messungen erforderlichen Zeit durchführen, wodurch die heutigen industriellen Anwendungen in der zerstörungsfreien Prüfung erst möglich wurden. Die Lockin-Thermografie wird mittlerweile in der Automobil- und Luftfahrtindustrie zur Untersuchung moderner Verbundwerkstoffe eingesetzt.

Ziel des Verbundprojektes der Fördermaßnahme „Transfer von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen (FuE) durch Normung und Standardisierung“ zwischen der BAM und dem IKT der Universität Stuttgart ist die Festlegung einer einheitlichen Vorgehensweise für die Auswahl der Gerätekomponenten und für die Durchführung von Prüfungen mit der Lockin-Thermografie. Daraus soll ein Standard abgeleitet werden, der die Prüfung unterschiedlicher Materialsysteme auf Fehlstellen mittels Lockin-Thermografie unter Berücksichtigung verschiedener Anregungsquellen ermöglicht. Dies ist für den sicheren und zuverlässigen Einsatz des Verfahrens in der Industrie dringend erforderlich. Im Dezember 2012 fand beim DIN ein gemeinsam vom DIN, der DGZfP, dem IKT und der BAM organisierter Workshop statt, in dem Prüfaufgabenbereiche für die Lockin-Thermografie zusammengestellt und Anforderungen an Referenzprobekörper erarbeitet wurden. Diese Ergebnisse wurden beim Entwurf der nachfolgend beschriebenen Probekörper berücksichtigt. Erste Untersuchungen zur Lockin-Thermografie, auch im Vergleich zur Blitzthermografie, werden vorgestellt.

2 Probekörper

2.1 Probekörper aus Metall

Die Lockin-Thermografie eignet sich insbesondere zur Prüfung dünnerer metallischer Strukturen. Je nach Material, Anregungsintensität und Oberflächenbeschaffenheit (Emissivität) und Absorption können Tiefenreichweiten bis zu mehreren Millimetern erreicht werden. Effusivität und Temperaturleitfähigkeit variieren bei den Metallen je nach Werkstoff über mehrere Größenordnungen. Es können z. B. dünnere Bleche auf Einschlüsse und Dickenänderungen, dünnwandige Rohre auf Korrosionsschäden und die Haftung metallischer Beschichtungen geprüft werden. Es wurden daher die folgenden Probekörper ausgewählt und teilweise für das Projekt neu hergestellt:

- Stufenkeile aus Metallen mit niedrigen und hohen Temperaturleitfähigkeiten
- Metallische Probekörper mit Querbohrungen (in Anlehnung an Referenzprobekörper bei der Ultraschallprüfung)
- Probekörper mit sich kreuzenden und parallelen Nuten in unterschiedlicher Tiefe zur Bestimmung der lateralen Auflösung
- Probekörper mit unterschiedlichen Wanddicken (künstlich) und Korrosionsschäden für die Rohrprüfung

Stufenkeile wurden aus Aluminium, Kupfer, Messing und V2A Stahl mit Materialdicken zwischen 0,5 und 3 mm hergestellt.

Probekörper mit Querlochbohrungen wurden aus Messing und V2A Stahl nach der in Abb. 1 dargestellten Zeichnung gefertigt. Die Durchmesser der Bohrungen variieren zwischen 1 und 4 mm, die Überdeckung zwischen 0,5 und 4 mm und die Abstände (Materialdicke zwischen den Bohrungen) ebenfalls zwischen 0,5 und 4 mm. Ziel der Untersuchungen an diesen Probekörpern ist die Bestimmung der Nachweisempfindlichkeit für Einschlüsse.

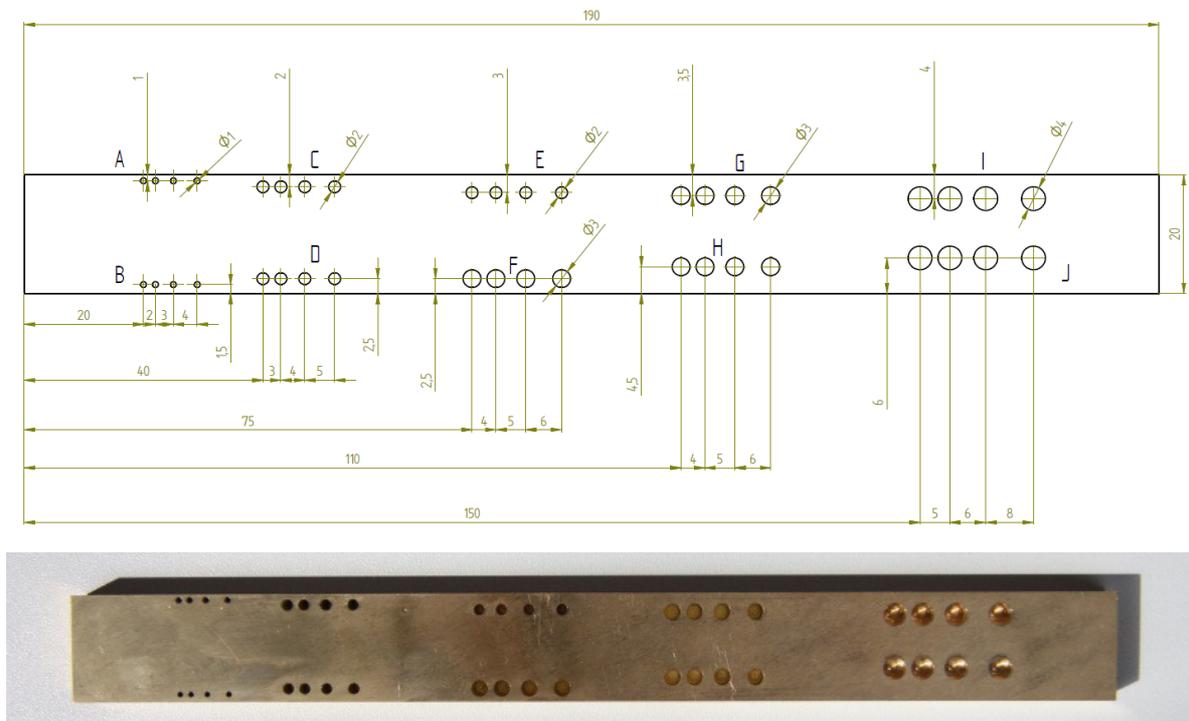


Abb. 1. Probekörper mit Querlochbohrungen (als Flachbodenbohrung) aus Messing und aus V2A, Zahlenangaben in mm. Unten ist ein Foto des Messing-Probekörpers dargestellt.

Für die Untersuchung der Ortsauflösung wurden zwei Probekörper aus V2A Stahl und aus Kupfer entsprechend der Abb. 2 hergestellt. Dazu wurden von der Unterseite aus drei Nuten mit einer Breite von jeweils 3 mm eingefräst. Zwei dieser Nuten kreuzen sich, so dass die Ortsauflösung in der Nähe des Kreuzungsbereiches ermittelt werden kann. Die eine Hälfte des Nutenkreuzes hat eine Tiefe von 2 mm, die andere von 3 mm (Plattendicke ca. 5 mm). Die Einzelnut wurde als schräge Rampe mit Tiefen von 1 bis 4 mm gefertigt.

Zur Ortung und quantitativen Untersuchung von Wanddickenänderungen wurden ein Probekörper mit einer künstlich hergestellten nierenförmigen Vertiefung mit flach ansteigenden Defekträndern und Dickenänderungen von 1 mm bis 6 mm und ein korrodiertes Stahlrohr verwendet, s. Abb. 3.

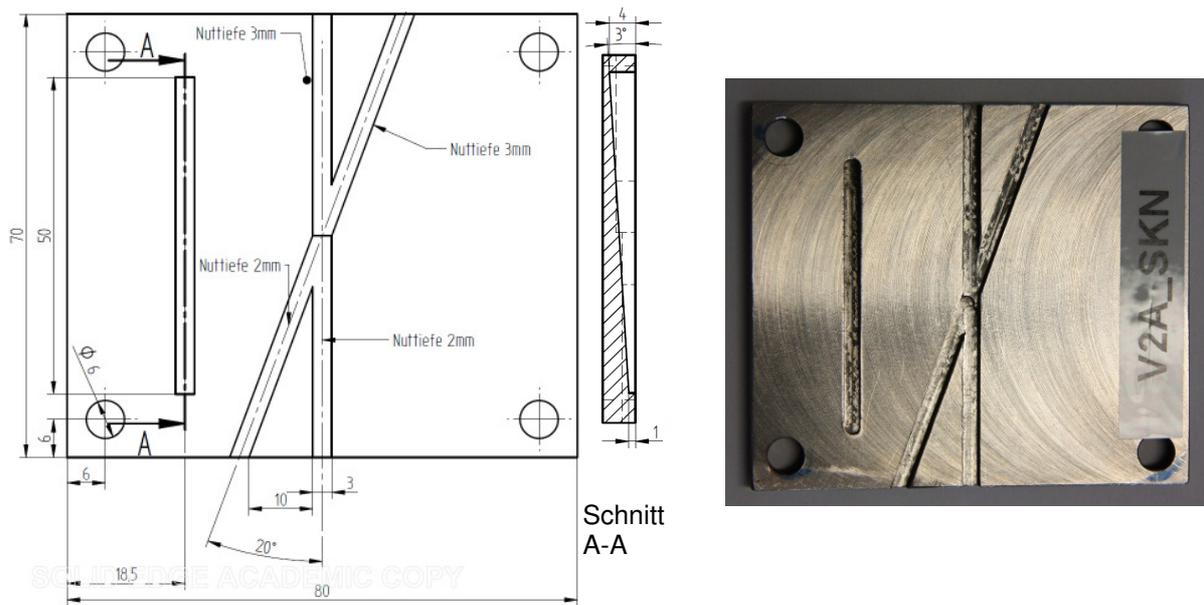


Abb. 2. Probekörper mit Nutkreuz und Nutrampe aus V2A Stahl und Kupfer, Zahlenangaben in mm.

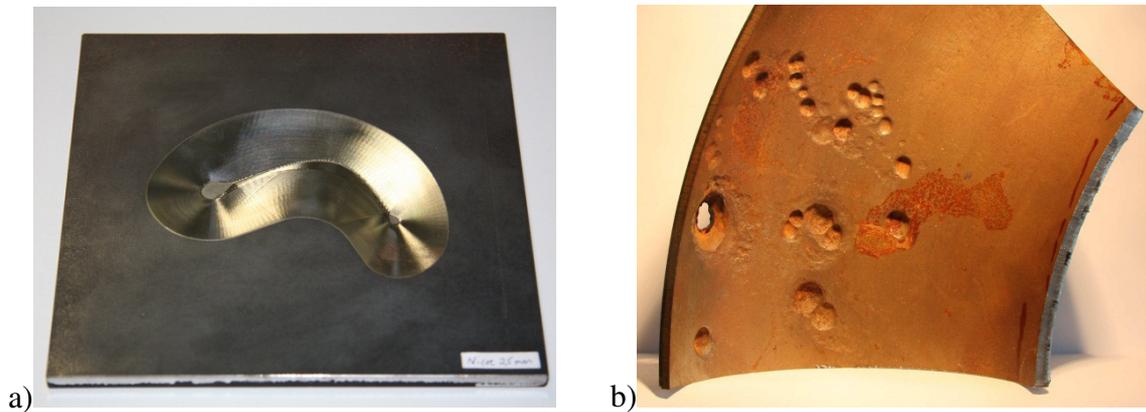


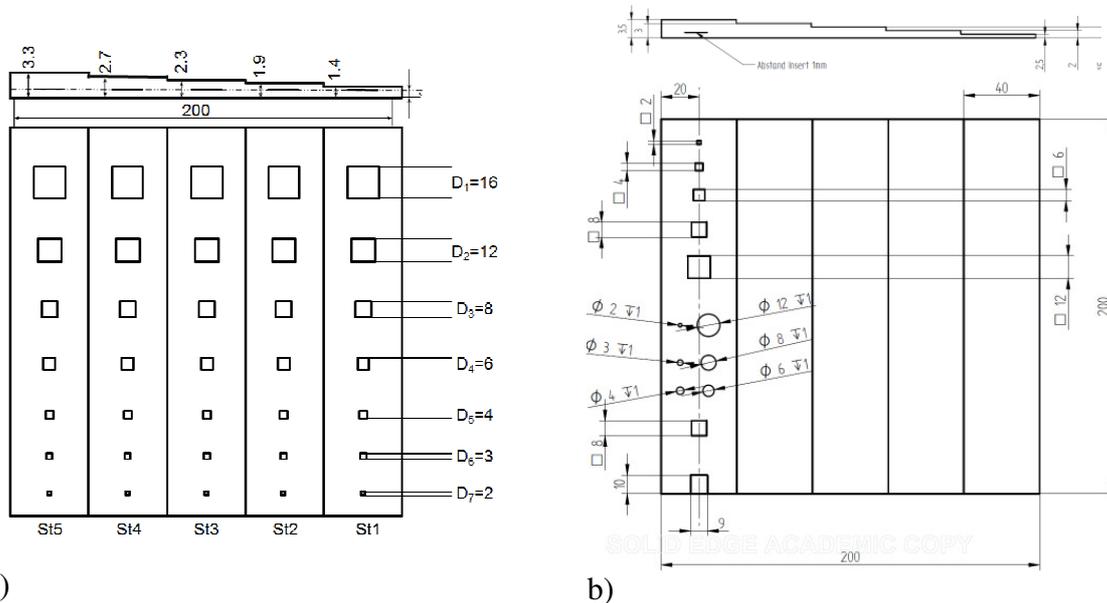
Abb. 3. Probekörper mit künstlichen (a) und natürlichen (b, Korrosion) Wanddickenänderungen aus Stahl. a) Abmessung $150 \times 150 \times 6 \text{ mm}^3$, Größe der Wanddickenminderung ca. $100 \times 50 \text{ mm}^2$. b) Abmessung ca. $160 \times 110 \text{ mm}^2$, Wanddicke 3,6 mm.

2.2 Probekörper aus Faserverbundwerkstoffen

Faserverbundwerkstoffe weisen aufgrund ihrer Zusammensetzung stark anisotrope Materialeigenschaften auf. Bei den thermophysikalischen Eigenschaften wirkt sich dies insbesondere bei kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen aus, da Kohlenstofffasern in Faserrichtung eine wesentlich größere Wärmeleitfähigkeit haben als das umgebende Matrixmaterial (typischerweise Epoxid). Es wurden daher sowohl Probekörper aus reinem Matrixmaterial (Epoxid und PVC) als auch aus unterschiedlichen Volumenanteilen, Anordnungen und Orientierungen der einzelnen Faserlagen hergestellt:

- Probekörper aus einfachen Kunststoffen (Epoxidharz, PVC) als Stufenkeile und als Platten mit Flachbodenbohrungen
- Probekörper aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK):
 - Platten mit unterschiedlichen Laminataufbauten mit Flachbodenbohrungen
 - Stufenprobekörper mit unterschiedlichen künstlichen Defektarten (Flachbodenbohrung, doppelt gelegte PTFE-Folie, Folie aus porösem Polypropylen, herausziehbares Band aus Stahl)

- Platten mit horizontalen und vertikalen Ondulationen
- Platten mit *barely visible* Impacts
- Probekörper aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK)
 - Stufenprobekörper
 - Probekörper mit Impact-Schäden



a) b)

Abb. 4. Stufenprobekörper mit a) Fehlstellen aus doppelt gelegten Teflonplättchen (3x) und b) Kombination aus unterschiedlichen Fehlstellen (diese wiederholen sich in den angrenzenden Stufen).

Zur Simulation von Delaminationen in unterschiedlichen Tiefen wurden zwei neue Stufenprobekörper hergestellt und zwei bereits vorhandene in das Untersuchungsprogramm eingebunden. Zwei der Stufenprobekörper wurden aus quasiisotropem CFK-Laminat aus UD-Prepregs wie in Abb. 4 a gezeigt hergestellt. Dabei wurde bei dem neu herzustellenden Probekörper poröses Polypropylen in den markierten Bereichen für die Delaminationen eingelegt. Bei dem bereits bestehenden Probekörper wurden diese mit doppelt gelegten Teflonplättchen realisiert. Ein weiterer Probekörper mit Teflonplättchen mit Stufenhöhen von 4 bis 6 mm stand ebenfalls zur Verfügung. Im vierten Probekörper wurden in einer Stufe jeweils unterschiedliche künstliche Defekte eingearbeitet, s. Abb. 5 b. Diese Defekte sind (von oben nach unten in Abb. 4 b): doppelt gelegte Teflonplättchen, Flachbodenbohrungen, poröses Polypropylen und ein Metallband, das nach der Herstellung aus dem Probekörper herausgezogen wurde.

3 Experimentelles

Die nachfolgend beschriebenen Lockin-Messungen wurden nach zwei unterschiedlichen Aufnahmeverfahren durchgeführt:

- Online Lockin: Das Amplituden- und Phasenbild bei der Anregungsfrequenz wurden bereits während der Messung in Korrelation zur Anregung erfasst. Als Messparameter wurden die Anregungsfrequenz, die Anzahl der pro Periode in die Berechnung einfließenden Thermogramme und die Anzahl der Perioden, über die das Amplituden- und Phasenbild gemittelt wird, vorgegeben. Die Messdatenerfassung erfolgte mit einer InSb-Quantendetektor FPA IR-Kamera mit einer Detektorgröße von 640x512 Pixeln.
- Offline Lockin: Die optische Anregung und die Erfassung der Thermogramme erfolgten unabhängig voneinander, d. h. es wurde keine Korrelation durch die IR-Kamera

vorgegeben. Anschließend wurde die abgespeicherte Thermografiesequenz mit Hilfe einer FFT bei der Anregungsfrequenz in ein Amplituden- und ein Phasenbild umgerechnet. Hier wurden die IR-Messdaten mit einer MCT-Quantendetektor FPA IR-Kamera mit einer Detektorgröße von 640x512 Pixeln aufgenommen.

Für die optische Anregung wurden zwei Halogenlampen mit einer Eingangsleistung von jeweils 500 W eingesetzt.

4 Ergebnisse

4.1 Untersuchungen zum lateralen Auflösungsvermögen am V2A Nutprobekörper

Der V2A Stahl Probekörper mit dem Nutkreuz wurde vor den Untersuchungen mit Graphit beschichtet. Die Messungen erfolgten in der Offline Konfiguration mit Anregung durch die Halogenlampen bei insgesamt sieben unterschiedlichen Frequenzen zwischen 0,01 und 2 Hz. Die mithilfe der FFT berechneten Amplituden- und Phasenbilder sind in Abb. 5 zu sehen. Da in den Phasenbildern für die flachere Nut in den mittleren Frequenzbereichen zwischen 0,5 und 0,05 Hz keine eindeutigen Unterschiede in der Ortsauflösung zu erkennen waren, wurde in der Nähe des Schnittpunktes in jedem Phasenbild eine Profillinie (rote Linie in Abb. 5) ausgewertet, s. Abb. 6 a. Hier ist der größte Phasenkontrast über die Doppelnut bei 0,25 Hz zu erkennen, eine Auflösung der beiden Einzelnuten wird jedoch nur für 0,1 Hz und 0,5 Hz erreicht. Abb. 6 b zeigt die sich aus dem eindimensionalen Modell der thermischen Wellen berechneten Phasenwerte an der Oberfläche für unterschiedliche Wandstärken und unterschiedliche Anregungsfrequenzen, die Restwanddicke des Nutkreuzes (1,7 mm) und die Gesamtdicke der Platte (5 mm) sind mit grauen Linien markiert. Die Berechnung erfolgte nach [4] mit einer Temperaturleitfähigkeit für V2A Stahl von $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Nach diesen Kurven müsste sich für eine Anregungsfrequenz von 0,1 Hz ein optimaler Phasenkontrast für die Nut auf der Oberfläche ergeben. Die Abweichung vom Experiment lässt sich möglicherweise durch eine andere Temperaturleitfähigkeit und durch laterale Wärmetransporteinflüsse erklären. Einen Einfluss auf den absoluten Phasenwert hat auch die Beschichtung zur Erhöhung der Emissivität.

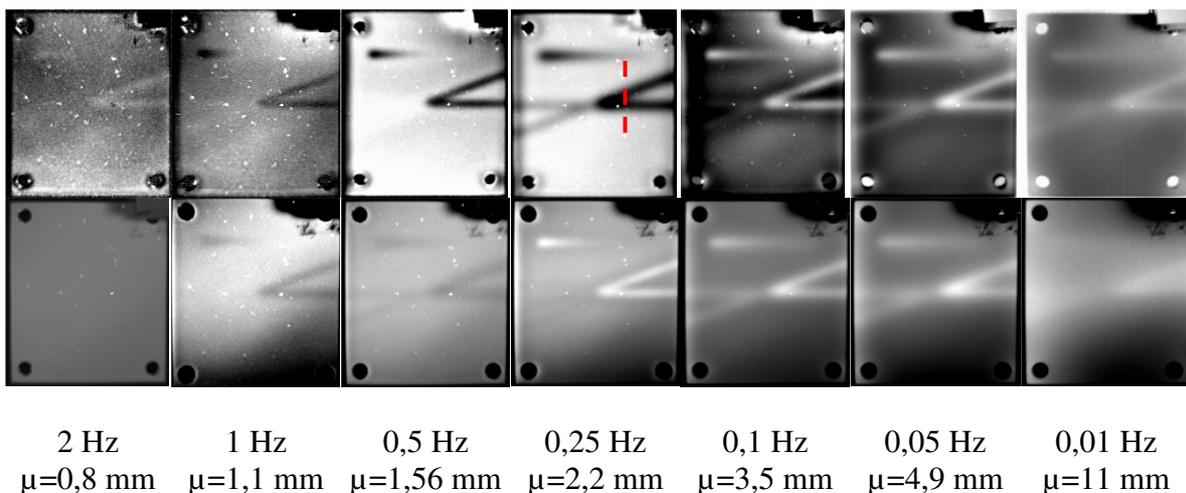


Abb. 5. Ergebnisse der Lockin-Messungen am V2A Stahl Nutkreuz Probekörper. Oben: Phasenbilder, Unten: Amplitudenbilder. Die Eindringtiefe wurde für die Temperaturleitfähigkeit für V2A Stahl nach dem Modell der thermischen Wellen berechnet. Die Überdeckung der Nut beträgt 1,7 mm, die Dicke der Platte 5 mm.

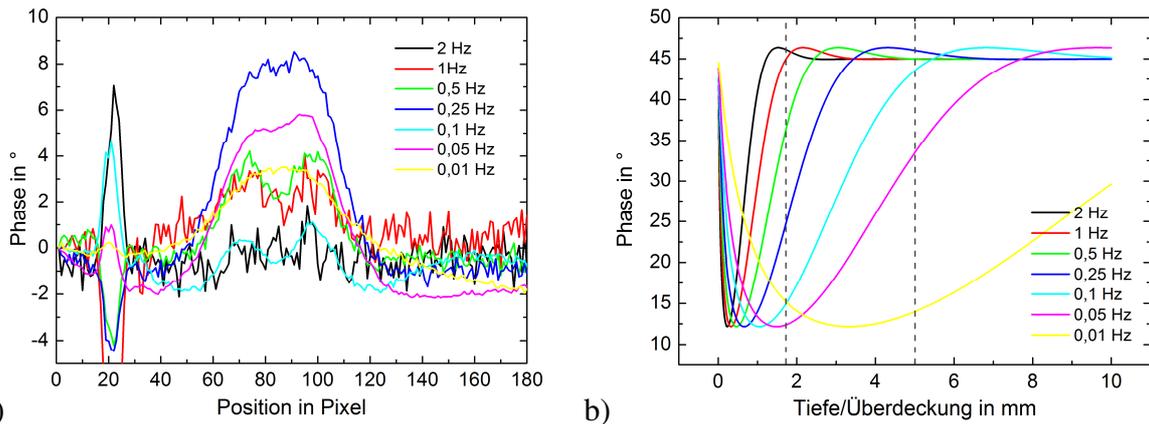


Abb. 6. a) Phasenprofil senkrecht zum Nutkreuz für verschiedene Anregungsfrequenzen. b) Berechnete Phase auf der Oberfläche für unterschiedliche Materialdicken und Frequenzen.

4.3 Vergleich Lockin-Thermografie und Blitzanregung am CFK-Stufenprobekörper

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit Lockin- und Blitzlichtanregung des CFK-Stufenprobekörpers aus Abb. 4 a mit den doppelt gelegten Teflonplättchen zeigt die Abb. 7. Dargestellt sind jeweils die Phasenbilder bei unterschiedlichen Frequenzen. Diese wurden bei der Lockin-Anregung mittels Online Lockin und bei der Blitzlichtanregung über die Puls-Phasen-Thermografie erstellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit der Blitzanregung auch die Defekte in der 3. und 4. Stufe erkannt werden können, was mit der Lockin-Anregung nicht möglich war. Mit beiden Verfahren konnten die verschiedenen Stufendicken aufgelöst werden, was im Profildiagramm in Abb. 8 a zu erkennen ist. Auch die Ortsauflösung für die Defekte der ersten Stufe ist für beide Verfahren ähnlich, s. Profildiagramm in Abb. 8 b.

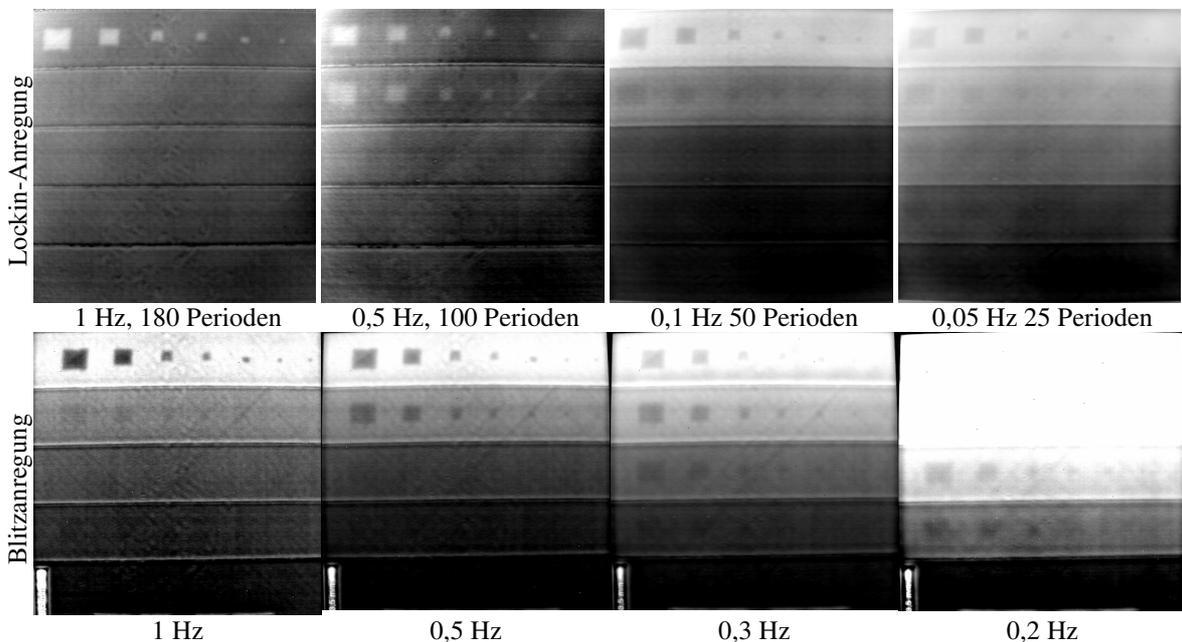
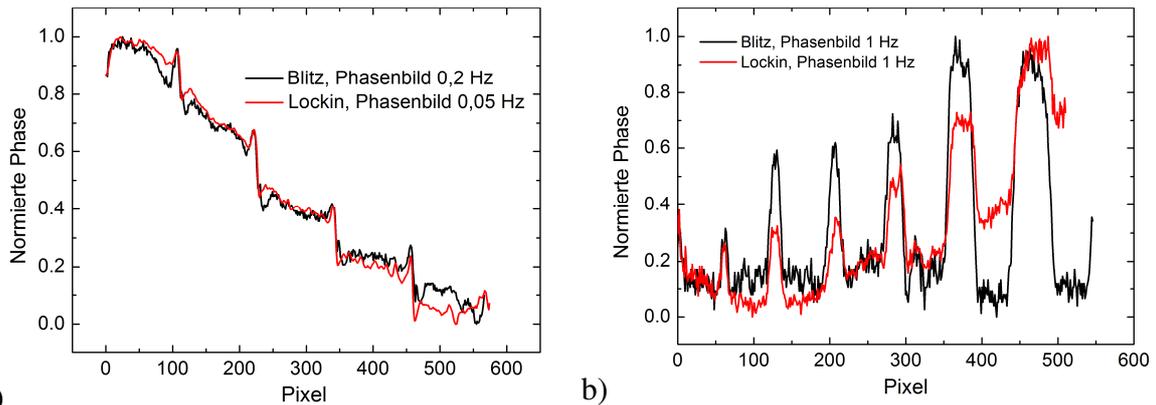


Abb. 7. Phasenbilder des CFK-Stufenprobekörpers mit Stufendicken von 1,4 bis 3,3 mm und doppelt gelegten Teflonplättchen als Defekte. Oben: Ergebnisse der Lockin-Anregung. Unten: Ergebnisse der Blitzanregung nach der Auswertung über die Puls-Phasen-Thermografie.



a) **Abb. 8.** Vergleich einzelner Profillinien bei Blitzlicht- und Lockin-Anregung. a) Profillinien über die Stufen unterschiedlicher Dicke. b) Profillinie über die Fehlstellen in der ersten Stufe. Die jeweiligen Anregungsfrequenzen sind angegeben.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die für die Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der Lockin-Thermografie hergestellten und zu untersuchenden Probekörper vorgestellt. Diese konzentrieren sich auf metallische Probekörper und Probekörper aus faserverstärkten Kunststoffen. Die Probekörper werden zukünftig mit verschiedenen Methoden der Lockin-Thermografie untersucht und zum Teil mit der Blitzthermografie verglichen. Neben der Auswahl der optimalen Anregungsfrequenz hinsichtlich der Eindringtiefe wird auch die laterale Auflösung bewertet.

Danksagung

Die Untersuchungen zu den Grenzen der Lockin-Thermografie werden über die Fördermaßnahme „Transfer von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen (FuE) durch Normung und Standardisierung“ im Projekt „Entwicklung von Normen und Standards für die aktive Thermografie mit Lockin-Anregung“ vom BMWi gefördert.

Referenzen

- [1] Nordal, P.-E.; Kanstad, S. O.: Photothermal radiometry. *Physics Scripta* 20 (1979), pp. 659-662
- [2] Rosencwaig, A.; Gersho, A.: Theory of the photoacoustic effect with solids. *J. Appl. Phys.* 47 (1976), pp. 64-69
- [3] Busse, G.: Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal. *Appl. Phys. Lett.* 35 (1979), pp. 759-760
- [4] Bennett, C.A.; Patty, R.R.: Thermal wave interferometry: A potential application of the photoacoustic effect. *Appl. Opt.* 21 (1982), pp. 49-54.
- [5] Aamodt, L.C.; Murphy, J.C.: Effect of 3-D heat flow near edges in photothermal measurements. *Appl. Opt.* 21 (1982), pp.111-115
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Busse, G.; Wu, D.; Karpen, W.: Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography. *J. Appl. Phys.* 71 8 (1992), pp. 3962-3965