

# Quantitative Auswertung von Fehlstellen an Bauteilen aus Faserverbundwerkstoff mit Lock-In Thermographie

C. ZÖCKE, A. LANGMEIER, R. STÖSSEL, EADS Innovation Works, München  
W. ARNOLD, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

**Kurzfassung:** Diese Arbeit befasst sich mit der quantitativen Auswertung optischer Lock-In Thermographie Messungen von CFK-Werkstoffen. Es werden Verfahren entwickelt, mit denen Defekte detektiert und ihre Tiefenlage auf halb-automatische Weise bestimmt werden kann. Dabei werden Verfahren der Bildverarbeitung angewendet.

Merkmalsbeschreibungen von Defekten sollen eine sichere Erkennung ermöglichen. Die Bestimmung des wichtigsten Defektmerkmals, des Signal-Rausch-Abstands erfolgt automatisch. Eine Stelle wird als Defekt qualifiziert, wenn der SRA gegenüber dem Hintergrund die 6 dB Grenze überschreitet. Über Kalibrierkurven wird eine Karte der Defekttiefen errechnet.

## 1. Einleitung

Heutzutage steigen die Ansprüche an die Qualität von Bauteilen in der Luft- und Raumfahrtindustrie. Defekte wie z.B. Delaminationen, Impaktschäden oder Wassereinschlüsse müssen bei der Fertigungskontrolle und bei Service-Inspektionen dieser Bauteile gefunden werden. Es wird ständig nach neuen, schnelleren und sicheren Prüfverfahren gesucht, die Defekte detektieren und charakterisieren können.

Die Vorteile der Optischen Lock-In Thermographie liegen darin, dass großflächig und bildgebend gemessen werden kann. Die aus den IR-Bildsequenzen abgeleiteten Phasenbilder sind unempfindlich gegenüber inhomogener Beleuchtung und Artefakten und weisen außerdem einen hohen Signal-Rausch-Abstand (SRA) auf.

Die vorliegende Arbeit befasst sich damit, Verfahren im Bereich der Bildverarbeitung zu entwickeln, um dem Prüfer in der Produktion und in der Wartung Unterstützung bei der Auswertung der Messungen zu bieten.

Unser Ziel ist es Phasenbilder anhand mehrerer Bildverarbeitungsverfahren zu verbessern und nachfolgend zu analysieren. Eine Verfahrenskette wurde bereits in [1] vorgestellt. Zunächst wird die inhomogene Intensitätsverteilung korrigiert und die Bilder entzerrt. Ein kritischer Aspekt bei der Lokalisierung von Defekten ist die Bewertung, ab welcher Grenze detektierte Stellen in die Kategorie „Defekt“ zuzuordnen sind. Eine automatische Berechnung des Signal-Rausch-Abstandes und eine Merkmalsbeschreibung sollen dazu beitragen, Defekte sicher zu erkennen.

Weiter untersuchten wir zwei Verfahren (global, lokal) zur Bestimmung von Defekttiefen.

## 2. Theorie

### 2.1 Optische Lock-In Thermographie (OLT)

Mit Hilfe einer Thermografie-Kamera kann eine thermische Welle detektiert werden [2]. Diese Welle, beschrieben durch eine örtliche und zeitliche Temperaturmodulation, verhält sich wie z.B. eine akustische Welle und wird an (thermischen) Grenzflächen reflektiert und transmittiert. Eine thermische Welle kann beispielsweise durch sinusförmig modulierte Lampen auf der Oberfläche eines Bauteils erzeugt werden. Die thermische Welle wird absorbiert und läuft ins Innere des Bauteils. Nach Reflektion an der Grenzfläche eines Defekts interferiert die rücklaufende Welle mit der einfallenden und erzeugt eine messbare Temperaturmodulation auf der Bauteiloberfläche. Diese Temperaturverteilung wird mit der Wärmebildkamera aufgezeichnet. Durch Fourier Analyse der Bildsequenzen werden Amplituden- und Phasenbilder berechnet. Dadurch können Fehlstellen im Inneren detektiert werden [2]-[10].

Die maximale Tiefe der Defekte, die mit Hilfe der OLT detektiert werden kann, wird durch die thermische Eindringtiefe

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f}} \quad (1)$$

bestimmt, wobei  $\alpha$  die Temperaturleitfähigkeit und  $f$  die Frequenz der sinusförmigen Lampenmodulation sind. OLT ist ein tiefenaufgelöstes Messverfahren. Mit niedrigen Frequenzen können tiefere Defekte erkannt werden.

### 2.2 Retrospektive Bildfeldkorrektur

Die Phasenbilder zeigen niederfrequente, ortsabhängige Phasenverschiebungen, die durch eine Intensitätsverteilung dargestellt werden können. Es erweist sich als vorteilhaft für die nachfolgenden Verfahrensschritte, diese Intensitätsinhomogenitäten zu beseitigen. Die Korrektur ist sowohl für die Lokalisierung der Marken als auch für die Bestimmung des SRA (Signal-Rausch-Abstand) und des Detektionsschwellwertes wichtig.

Die inhomogene Intensitätsverteilung kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$I_{inh} = I \cdot S_M + S_A \quad (2)$$

wobei  $I_{inh}$  das in der Intensität inhomogene Bild,  $I$  das ungestörte Bild,  $S_M$  die multiplikative Komponente und  $S_A$  die additive Komponente sind. Das Ziel der retrospektiven Intensitätskorrektur besteht darin, die multiplikative und/oder additive Komponenten automatisch mit der im Bild enthaltenen Information zu berechnen.

In unserer Arbeit wird die Korrektur nach [11] benutzt, welche die additive Komponente entfernt. Dieses Verfahren beruht darauf, eine Abschätzung von  $S_A$  zu berechnen, wobei  $S_M$  vernachlässigt wird. Dazu wird jedem Pixelwert  $T_{pix}(i, j, t)$  der Mittelwert  $T_{umg(i,j)}(t)$  einer definierten Umgebung abgezogen:

$$T(i, j, t) = T_{pix}(i, j, t) - T_{umg(i,j)}(t) \quad (3)$$

### 2.3 Markenbestimmung, Entzerrung und Überlagerung der Bilder

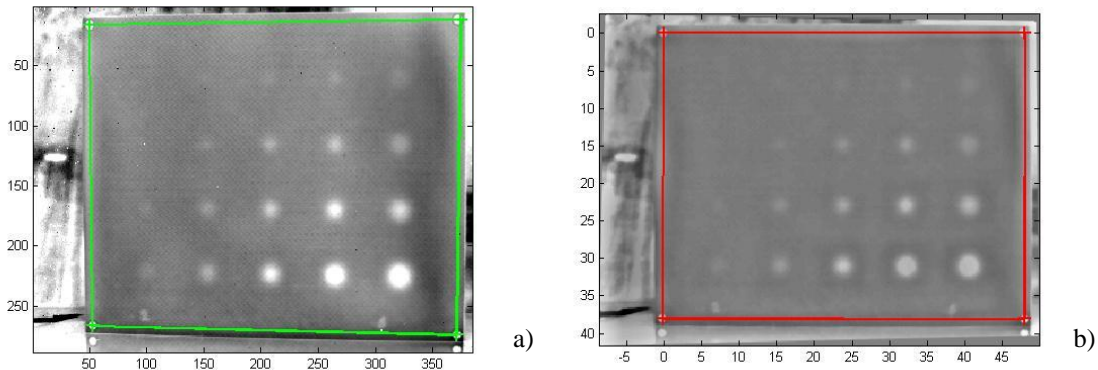
Mit diesem Verfahren werden Verschiebungen des Messobjekts während der Einzelmessungen in den unterschiedlichen Wellenlängen korrigiert. Dazu ermöglicht der Vergleich mit den an dem Probekörper bestimmten Markenabständen die Übertragung der wahren Maße in den Pixelmaßstab der Bilder.

Zur Entzerrung der Bilder verwenden wir spezielle Marken, die im Infraroten reflektieren und somit im Livebild, während des Messvorganges, sehr gut erkennbar sind. Die Position der Marken wird automatisch im Bild durch ein Segmentierungsverfahren (Schwellwertverfahren, Clustern mit kmeans [12]) detektiert und ihre Position bestimmt. Die relative Kippung der Bilder zum Koordinatensystem der Kamera wird anhand der projektiven-Transformation (Helmert Transformation) berechnet [13]

$$X = \frac{a_1x + b_1y + c_1}{a_3x + b_3y + 1}, \quad Y = \frac{a_2x + b_2y + c_2}{a_3x + b_3y + 1} \quad (4)$$

wo  $X, Y$  die Koordinaten der Punkte im Ausgangssystem  $S_{cm}$  (in cm),  $x, y$  die Koordinaten der Punkte im Eingangssystem  $S_p$  (in Pixel) und  $a_i, i \in \{1...8\}$  die Parameter der Transformation sind.

In Abbildung 1 wird der Unterschied zwischen den Ausgangsphasenbildern und den bearbeiteten Bildern gezeigt. Dabei ist der Effekt der Intensitätskorrektur und der Entzerrung der Bilder erkennbar.



**Abbildung 1:** a) Ausgangsphasenbild (0,01Hz) b) Bearbeitetes Bild nach Intensitätskorrektur und Entzerrung.

### 2.4 Schwellwertverfahren zur Defektdetektion

Eine Stelle wird als Defekt bezeichnet, wenn der Signal-Rausch-Abstand die Schwelle von 6 dB überschreitet. Zur Bestimmung des SRA wird ein automatisches Verfahren nach [14] implementiert:

$$SRA = 10 \times \log_{10} \left( \frac{\sum_i \sum_j [\text{Therm}(i, j)^2] / (ncol \times nrow)}{1/2 [\sigma(N(i))]^2} \right) \quad (5)$$

wobei der Nenner den Mittelwert des Signals,  $(i, j)$  die Pixelkoordinaten und  $ncol, nrow$  die Anzahl von Zeilen und Spalten darstellt. Der Zähler stellt die mittlere Rauschleistung und  $\sigma$  die Standardabweichung des Rauschens  $N(i, j)$  dar.

Das Rauschen wird abgeschätzt, indem zwei hintereinander folgende Zeilen voneinander subtrahiert werden. Die Detektion von Defekten basierend auf der Analyse einzelner Pixel ist sehr anfällig für statistische Ausreißer. Ein Ziel unserer Arbeit wird es

sein, weitere *features* - z.B. aus der Analyse der Textur, der Umgebung und dem räumlichen Zusammenhang von Defekten - abzuleiten.

### 3. Versuch

#### 3.1 Aufbau

Für unsere Versuche wurde die Thermografie-Kamera CMT 384 M (384x288 Pixel) der Firma Thermosensorik benutzt. Die Intensität der Lampen (hier OLT-Modul der Firma EDEVIS) wird durch einen Signalgenerator sinusförmig moduliert.

Die Bildsequenzen werden anhand der Software MPS von Thermosensorik erfasst und die Amplituden- und Phasenbilder anschließend berechnet.

#### 3.2 Probeplatte

Wir verwendeten als Probekörper eine Platte aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK), in der flache Bohrungen (Sacklöcher) in verschiedenen Größen und Tiefen eingebracht wurden.

Die benutzte Probeplatte ist in Abbildung 2 skizziert. Sie wurde aus dem Material Prepreg HexPly M18/1 der Firma Hexcel gefertigt. Der Aufbau ist ein quasiisotroper Sandwich-Aufbau, d.h. die verschiedenen Lagen sind abwechseln in  $0^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $45^\circ$  Faserrichtung überlagert.

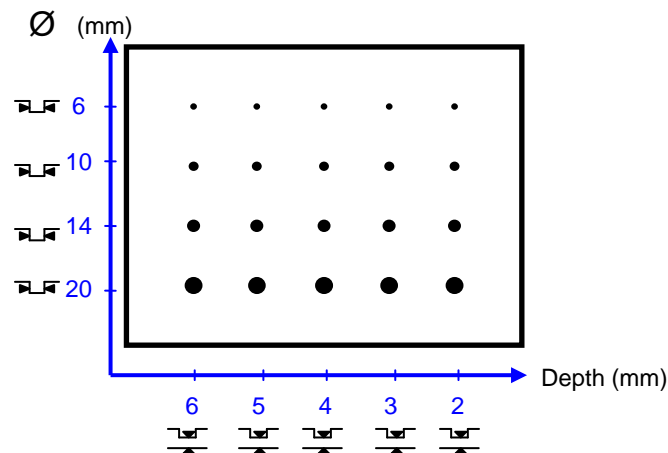
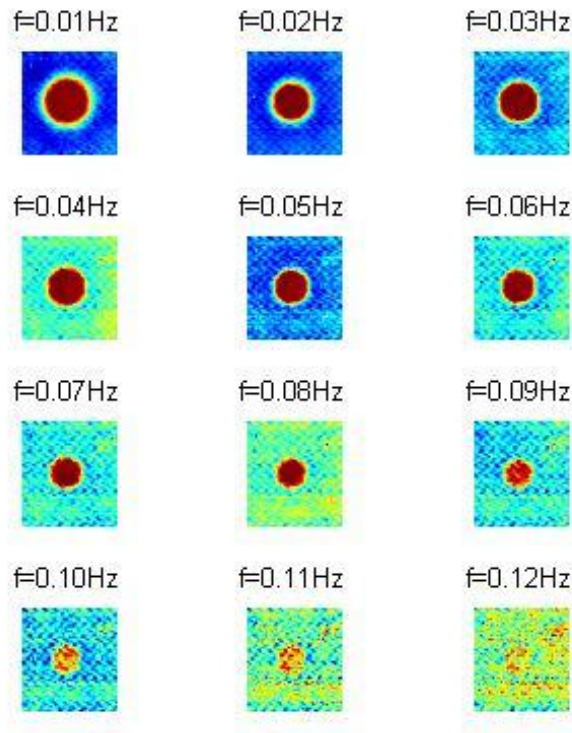


Abbildung 2: Skizze der Probeplatte

### 4. Lokales Verfahren zur Bestimmung der Fehlertiefe

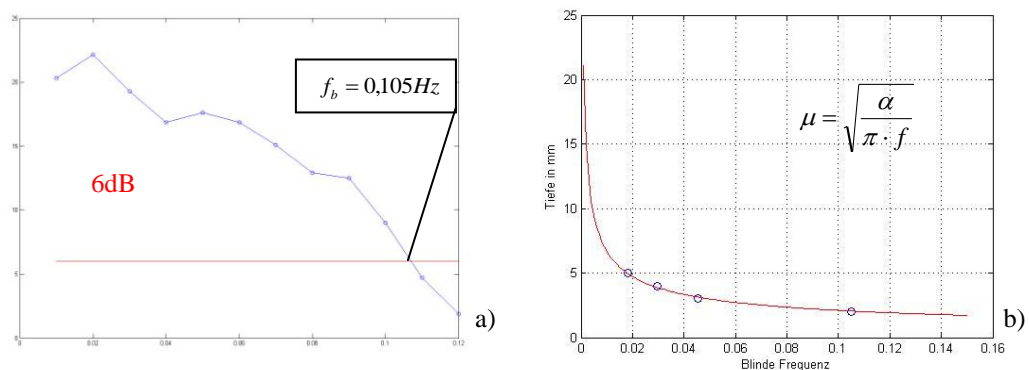
Zur Bestimmung der Tiefen-Kalibrierkurve werden Thermographie-Aufnahmen bei mehreren Lock-In Frequenzen verwendet. Die Frequenzen variieren zwischen 0.01 Hz bis 0.12 Hz in einem Abstand von 0.01 Hz. Bei diesem lokalen Verfahren muss die AOI (*area of interest*) manuell ausgewählt werden. In jeder AOI wird der SRA anhand des Verfahrens, das in §2.3 beschrieben ist, in jedem Phasenbild ermittelt. Abbildung 3 zeigt die Phasenbilder eines künstlichen Defekts (2 mm Tiefe, 20 mm Durchmesser) mit verschiedenen Lock-In Frequenzen. Die Kurve des SRA in Bezug auf die Lock-In Frequenz für diesen Defekt ist in Abbildung 4a aufgetragen.



**Abbildung 3:** Bildausschnitt des Defektes in 2mm Tiefe und 20mm Durchmesser in mehreren Lock-In Frequenzen

Wir ermitteln für jeden Defekt die Blindfrequenz  $f_b$ , d.h. die Frequenz, ab der der Defekt nicht mehr sichtbar ist. Dafür verwenden wir folgendes Kriterium: eine Stelle wird als Defekt bezeichnet, wenn der SRA dieser Stelle gegenüber dem Hintergrund über 6dB liegt.

Die Blindfrequenz wurde für mehrere Defekttiefen ermittelt (siehe Tabelle 1). Die Funktion der thermischen Eindringtiefe wurde den Messwerten angefitet (Abbildung 4b). Der Fit ergab einen Wert für die Temperaturleitfähigkeit von  $1,4 \cdot 10^{-6} m^2 / s$ .



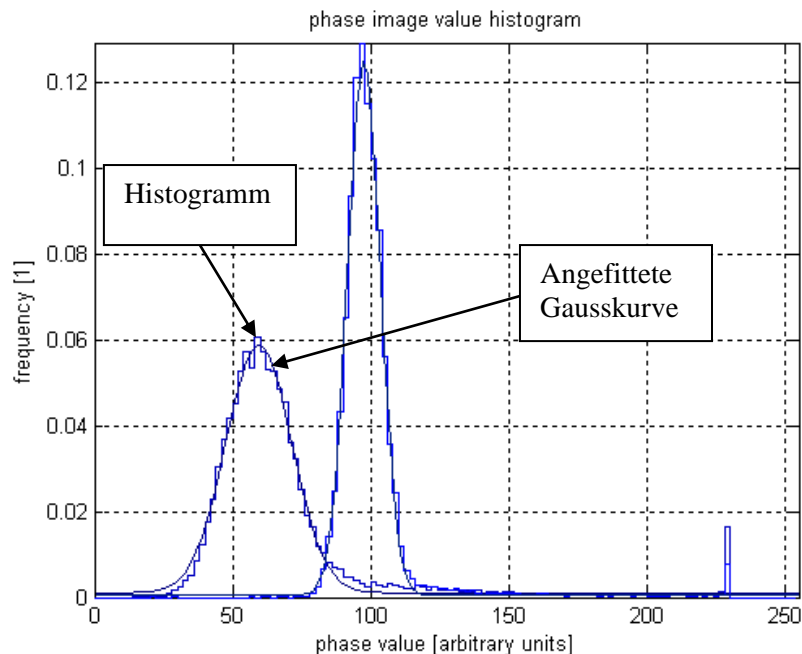
**Abbildung 4:** a) SRA in Bezug auf die Lock-In Frequenz b) Kalibrierkurve

**Tabelle 1:** Blindfrequenz für verschiedene Defektgrößen und Tiefen

Tiefe (mm) \ Durchmesser (mm)	5	4	3	2
6	-	-	0,037	0,11
10	0,014	0,026	0,043	0,10
14	0,017	0,029	0,045	0,10
20	0,018	0,030	0,045	0,11

## 5. Globales Verfahren zur Bestimmung der Fehlertiefe

Das in §4 vorgestellte Verfahren arbeitet lokal und benötigt die Vorselektion einer AOI. Hier wird ein globales Verfahren vorgestellt, das die gesamte Phasenbildinformation verwendet. Über die Analyse der Histogramme wird für jedes Phasenbild eine obere Schranke bestimmt, mit der die Defektdetektion durchgeführt wird.

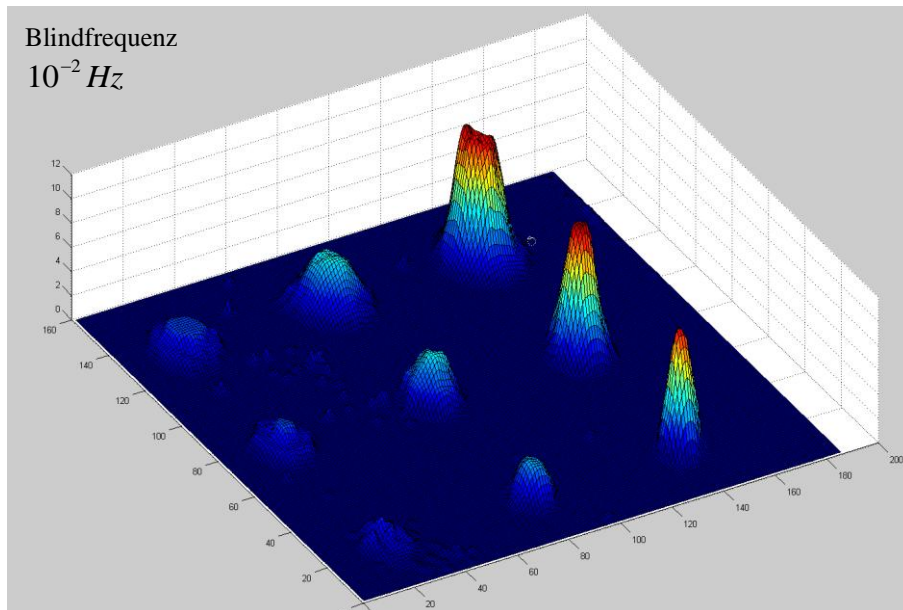


**Abbildung 5:** Histogramme zweier Phasenbildern und angepasste Gaussfunktionen.

An die Histogramme der Phasenbildwerte wird jeweils eine Gaussfunktion angepasst (Abbildung 5) und über Mittelwert und Breite der Gaussfunktion die Detektionsgrenze (6dB) für das jeweilige Phasenbild bestimmt. Zu beachten ist, dass die zur Verfügung stehenden Phasenbilder die Phaseninformation nur noch in umskalierter Form enthalten. Für jeden Pixel wurde ein 12-elementiger Detektionsvektor  $d_i$  aufgebaut, mit dessen Hilfe die Blindfrequenz diskret bestimmt wird. Ist in dem i-ten Phasenbild der Pixelwert über der Detektionsschwelle, wird  $d_i = 1$  gesetzt. Die Detektionsvektoren enthalten damit indirekt die Tiefenlage der künstlichen Defekte. Der Index der Blindfrequenz entspricht dem letzten gesetzten Wert im Vektor. Die zwei-dimensionale Karte der Blindfrequenz für jeden Pixel in einem Ausschnitt des Phasenbildes wird in Abbildung 6 gezeigt.

Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist an die Schrittweite der Lock-In Frequenzen gekoppelt. Ziel ist es, die Lock-In Frequenzen so zu wählen, dass die Tiefenauflösung äquidistant und der erforderlichen (oder machbaren) Genauigkeit entsprechen.

Nachbarschaftsbeziehungen unter den Vektoren und die Verteilung des gesetzten Vektorelements erlauben eine effektive Rauschunterdrückung und Defektdetektion.



**Abbildung 6:** Detektionsvektoren, welche indirekt die Tiefeninformation der Defekte enthalten.

## 6. Ausblick

Es wurden zwei Verfahren zur automatischen Bestimmung der Defekttiefe aus Phasenbildern vorgestellt. Das Problem, dass Defektstellen mit zunehmender Tiefe durch Wärmediffusion verschwommener und schwieriger zu detektieren sind, ist noch nicht behandelt. Ein nächster Schritt wird darin bestehen, diesen Prozess zu berücksichtigen und die Bilder zu entfalten, damit auch kleinere und tiefere Defekte mit größerer Sicherheit detektiert werden. Dabei kann auch die reale Größe der Defekte ermittelt werden.

## Danksagung

Die Autoren möchten sich ganz herzlich bei Herrn R. Oster und Herrn M. Hauf (Eurocopter Deutschland) für die Bereitstellung der Probeplatte aus CFK bedanken.

## Referenzen

- [1] Zöcke, C., Stößel, R., Langmeier, A. & Arnold, W., "Automatische Erkennung und Charakterisierung von Defekten in CFK-Werkstücken unter Verwendung thermischer Aufnahmen", DGZfP, Fürth, 2007.
- [2] Busse, G., "Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal", *Appl. Phys. Lett.*, (1979), 35, 759-760.
- [3] Thomas, R. L., Pouch, J. J., Wong, Y. H., Favro, L. D., Kuo P. K., Rosencwaig, A., "Subsurface flaw detection in metals by photoacoustic microscopy", *J. Appl. Phys.*, (1980), 51, 1152-1156.
- [4] Lehto, A., Jaarinen, J., Tiisanen, T., Jokinen, M., Luukkala, M., "Amplitude and phase in thermal wave imaging", *Electr. Lett.*, (1981), 17, 364-365.
- [5] Bennett, C. A. Jr., Patty, R. R., "Thermal wave interferometry: A potential application of the photoacoustic effect", *Appl. Opt.*, (1982), 21, 49-54.

- [6] Beaudoin, J. L., Mérienne, E., Danjoux, R. & Egée, M., “Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photothermal radiometry”, *Infrared technology and applications SPIE*, (1985), 590, 287-292.
- [7] Rosencwaig, A., “Photoacoustic microscopy”, *American Lab*, (1979), 11, 725-727.
- [8] Carlomagno, G.M. & Berardi, P.G., “Unsteady thermotopography in non-destructive testing”, *Proc. 3rd Biannual Information Exchange, Aug. 24-26. St. Louis, USA, C. Warren (Ed.)*, (1976), 33-39.
- [9] Kuo, P. K., Feng, Z. J., Ahmed T., Favro, L. D., Thomas, R. L., Hartikainen, J., “Parallel thermal wave imaging using a vector lock-in videotechnique”, *Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Heidelberg, Hess, P., Pelzl, J. (Eds.)*, Springer Verlag, (1987), 415-418.
- [10] Busse, G., Wu, D., Karpen, W., “Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography”, *J. Appl. Phys*, (1992), 71, 3962-3965.
- [11] Omar, M., Hassan, M., Saito, K. & Alloo, R., “IR self-referencing thermography for detection”, *Infrared Physics & Technology*, 2005, 46, 283-289.
- [12] Duda, R.O.; Hart, P.E. & Stork, D.G., “Pattern Classification”, *John Wiley & Sons, I. (Ed.)*, Wiley-Interscience Publication, (2000).
- [13] Luhmann, T., “Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendung“, *Wichmann*, (2003).
- [14] Omar, M., Hassan, M., Saito, K., “Optimizing thermography depth probing with dynamic thermal point spread function”, *Infrared Physics & Technology*, (2005), 46, 506-514.