

# Automatische Erkennung und Charakterisierung von Defekten in CFK- Werkstücken unter Verwendung thermischer Aufnahmen

Christine ZÖCKE, Rainer STÖSSEL, Andreas LANGMEIER, EADS Innovation Works,  
München

Walter ARNOLD, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

**Kurzfassung:** In der vorliegenden Arbeit werden Untersuchungen zu einem Verfahren vorgestellt, das basierend auf der Analyse von Lock-In-Thermographieaufnahmen die Bestimmung der wahren Größe von Fehlstellen in Kohlefaser verstärktem Kunststoff ermöglicht. Es werden Methoden der Bildverarbeitung und Photogrammetrie angewandt. Es wird ein Bereichsbild (AOI; für „area of interest“) auf den Probanden mittels Marken definiert, die thermographischen Aufnahmen entzerrt und ausgerichtet, Fehlstellen detektiert und deren geometrische Parameter ermittelt.

**Résumé:** Dans ce travail sont présentées des travaux de recherche sur une procédure d'analyse d'images thermographiques enregistrées selon la méthode Lock-In permettant la détermination de la vraie taille de défauts dans des pièces en carbone renforcé. Des méthodes de traitement d'images et de photogrammétrie sont mises en œuvre pour ce faire. La zone d'intérêt est définie à l'aide de marques, les images thermographiques sont rectifiées et alignées, les défauts détectés puis les paramètres géométriques déterminés.

**Summary:** In this work, studies of an analysis procedure of Lock-In thermographic images are presented, which should determine the real size of defects in carbon reinforced material. Methods of image processing and photogrammetry are utilized. An area of interest (AOI) is defined on the test object with markers, the thermographic phase images rectified and shifted, the defects detected and the geometry of the defects determined.

## 1. Einführung

Verbundwerkstoffe werden in den letzten Jahren in einer ständig wachsenden Anzahl von Anwendungen im Flugzeug-, Automobil- und Schiffsbau eingesetzt. Wegen der Sicherheitsvorschriften in diesen Gebieten und der komplexen inneren Struktur nehmen die Ansprüche an die Qualität der Bauteile ständig zu. Kontrollen in Produktion sowie in der Wartung müssen diesen Anforderungen gerecht werden. Zur zerstörungsfreien Werkstoff- und Bauteilprüfung werden heute verschiedene Verfahren wie Ultraschalltechnik, Röntgenstrahlung, Computertomographie oder aktive Thermographie eingesetzt. Zunehmend an Bedeutung gewinnt dabei die Optische Lock-In Thermographie (OLT), mit deren Hilfe unter der Oberfläche liegende Fehlstellen in Bauteilen erkannt werden können. Die Vorteile liegen bei dieser Methode in dem Umstand, dass kontaktfrei aus der Entfernung und bildgebend gemessen werden kann. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist dazu sehr gut. Es gibt zahlreiche Untersuchungen zur Abbildung von Fehlstellen in

thermographischen IR Bildsequenzen, jedoch gab es bisher kein hinreichendes Verfahren, die wahre Fehlergröße zu bestimmen. Eine stringente Behandlung der Abbildung unter Berücksichtigung der tiefenabhängigen Punktbildfunktion (PSF), der Kameraperspektive und der Lock-In Frequenz steht aus. Die abgebildeten Defekte sind durch den thermischen Diffusionsprozess verschwommen und durch die Kamerastellung verzerrt.

Im Folgenden werden Arbeiten zur Etablierung eines Verfahrens zur autonomen Klassifizierung von Defekten und Bestimmung ihrer geometrischen Parameter mittels der Analyse von Phasen- und Amplitudenbildern vorgestellt. Das Verfahren soll die Analyse von Phasen- und Amplitudenbildern aus der OLT stützen und vereinfachen. Es ist als Ergänzung und Erweiterung der OLT zu sehen.

Die Gruppe von Defekten, die analysiert werden können, umfasst allgemein gesprochen flächige Features wie Delaminationen oder Einschlüsse.

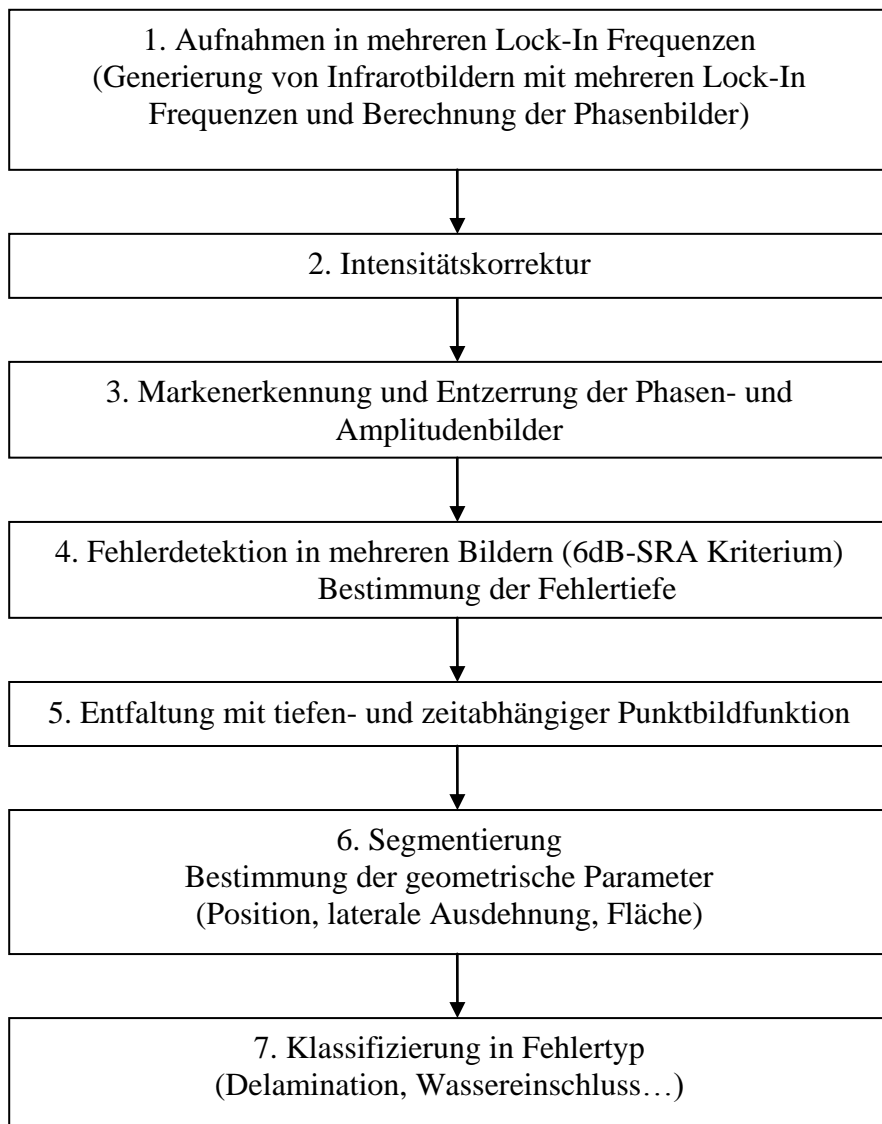


Abbildung 1: Reihenfolge der angewandten Verfahren

## 2. Optische Lock-In Thermographie (OLT)

Mit Hilfe einer Thermografie-Kamera (hier Thermosensorik CMT 384 M, 384x288 Pixel) kann eine thermische Welle detektiert werden [1]. 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 (hier OLT-Modul der Firma EDEVIS und Signalgenerator) an 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 einer Wärmebildkamera aufgezeichnet. Durch Fourier Analyse der Bildsequenzen werden Amplituden- und Phasenbilder berechnet. Dadurch können Fehlstellen im Inneren sichtbar gemacht werden [1]-[9].

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

### 3. Verfahren

Die Reihenfolge der Verfahren ist in Abbildung 1 skizziert. Nach dem Anbringen der Marken und der Vermessung ihrer Abstände werden die thermographischen Bildsequenzen erstellt und die Phasenbilder errechnet.

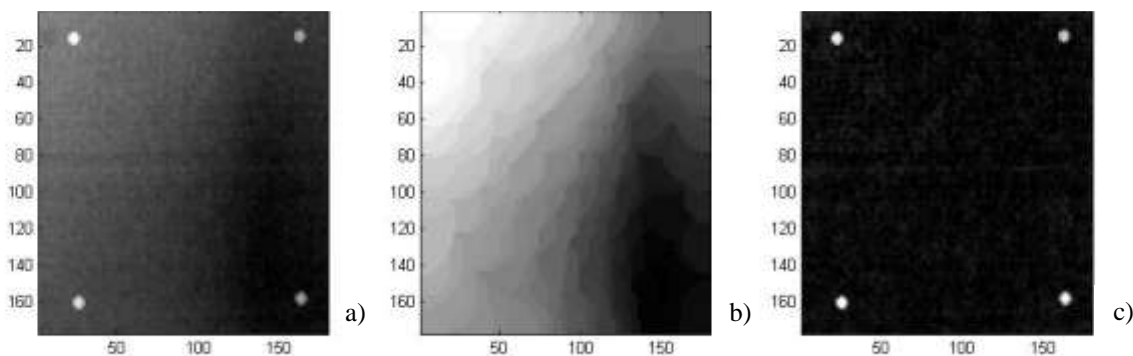
#### a. Retrospektive Bildfeldkorrektur

Die Phasenbilder zeigen niederfrequente, ortsabhängige Phasenverschiebungen, die durch eine Intensitätsverteilungen dargestellt werden. Es erweist sich als vorteilhaft für die nachfolgenden Verfahrensschritte diese Intensitätsschwankungen 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 modelliert werden:

$$I_{inh} = I \cdot S_M + S_A$$

wo  $I$  das ungestörte Bild,  $I_{inh}$  das in der Intensität inhomogene 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 [10], [11].



**Abbildung 2:** a) Ausgangsbild, b) Modellierung des Hintergrundes, c) Korrigiertes Bild.

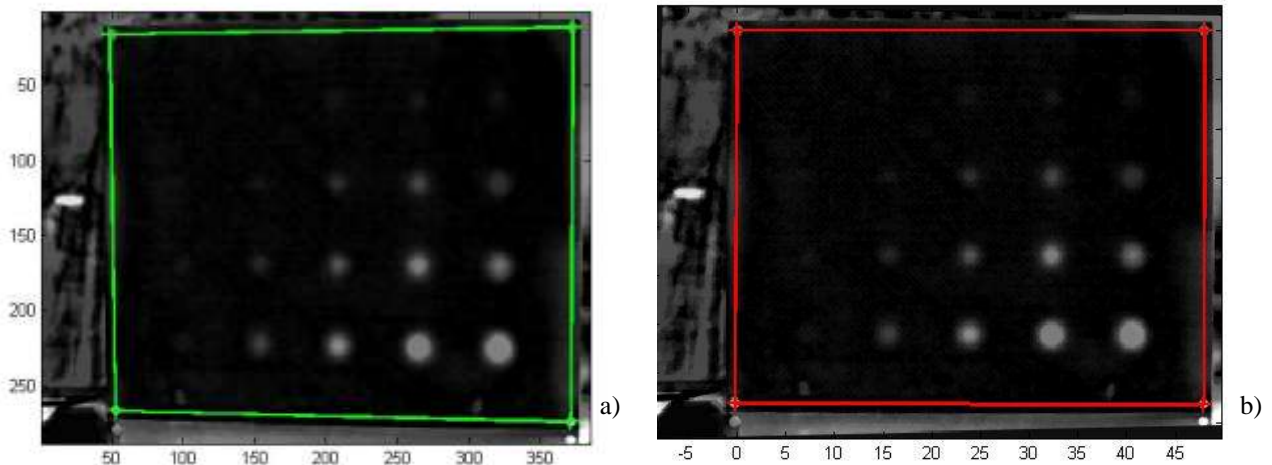
Es gibt mehrere Verfahren um diese Korrektur durchzuführen: Lineares Filtern, morphologisches Filtern oder Entropie Minimierung. Bei den ersten beiden Verfahren wird nur einer Komponente ( $S_M$  oder  $S_A$ ) berechnet während beim letzten Verfahren beide Komponenten ermittelt werden. In unserer Arbeit wird Morphologisches Filtern eingesetzt. Dieses Verfahren berechnet eine Abschätzung von  $S_A$ . Abbildung 2 veranschaulicht die Prozedur. Deutlich ist links die ortsabhängige Intensitätsverteilung zu erkennen. Die Marken treten deutlich als weiße Kreise nach der Korrektur mit dem asymmetrischen Hintergrund hervor.

*b. Markenbestimmung, Entzerrung und Überlagerung der Bilder*

Der nächste Schritt ist die Ortsbestimmung der Marken. Wir verwendeten spezielle Marken der Fa. Aicon, die im Infraroten reflektieren und somit im Livebild, während des Messvorganges, sehr gut erkennbar sind. Die Marken sind zu dem in den Ultraschall B- und C-Bildern als auch in optischen Aufnahmen sichtbar. Die Marken sollen später auch dazu dienen andere Messungen (US und EO) mit den thermograpischen Messungen zu koppeln. Nachdem wie oben beschrieben die inhomogene Intensitätsverteilung korrigiert wurde, werden die Marken automatisch im Bild durch ein Segmentierungsverfahren (Schwellwertverfahren, Clustern mit kmeans [12]) detektiert. Der Mittelpunkt der Marken wird ermittelt. Nachfolgend werden die Bilder entzerrt und ausgerichtet. Mit diesem Schritt können Verschiebungen des Messobjekts während der Einzelmessungen in den unterschiedlichen Wellenlängen korrigiert werden.

Der Vergleich mit den an dem Probekörper bestimmten Markenabständen ermöglicht die Übertragung der wahren Maße in den Pixelmaßstab der Bilder.

Bei der Entzerrung von Bildern wird die relative Kippung der Bilder zum Koordinatensystem der Kamera berechnet. Es werden dabei die Parameter der projektiven-Transformation (Helmert Transformation) berechnet [13].



**Abbildung 3:** Entzerrung durch Photogrammetrie. a) Originalbild (OLT, Phasenbild, Intensitätskorrektur, 0.01Hz) b) Entzerrtes Bild.

Wenn die radiale Verzeichnung nicht berücksichtigt wird, erhält man folgendes System:

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

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.

Die acht Parameter  $a_i, i \in \{1...8\}$  erhält man durch Lösung des Gleichungssystems, bei der die Kenntnis der Position von vier Referenzpunkten im Ausgangssystem  $S_{cm}$  notwendig ist. Abbildung 3 zeigt die Entzerrung eines Phasenbildes der Probenplatte.

### c. Schwellwertverfahren zur Defektdetektion

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

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

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

Das Rauschen  $N(i, j)$  in dem Bild wird berechnet, 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.

### d. Punktbildfunktion und Entfaltung

Das gemessene Bild kann beschrieben werden als die Faltung zwischen der Punktbildfunktion (*PSF*) und dem Bild, das man aufnehmen würde, wenn keine laterale Diffusion und Verzerrungen entstehen würden:

$$I = I_o \circ P \quad (3)$$

wo  $I$  das aufgenommene unscharfe Bild,  $I_o$  das scharfe Bild und  $P$  die Punktbildfunktion ist ( $\circ$  bezeichnet die Faltung).

Die Diffusion der eingestrahnten und reflektierten Wärmewellen im Material wird durch

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \Delta T \quad (4)$$

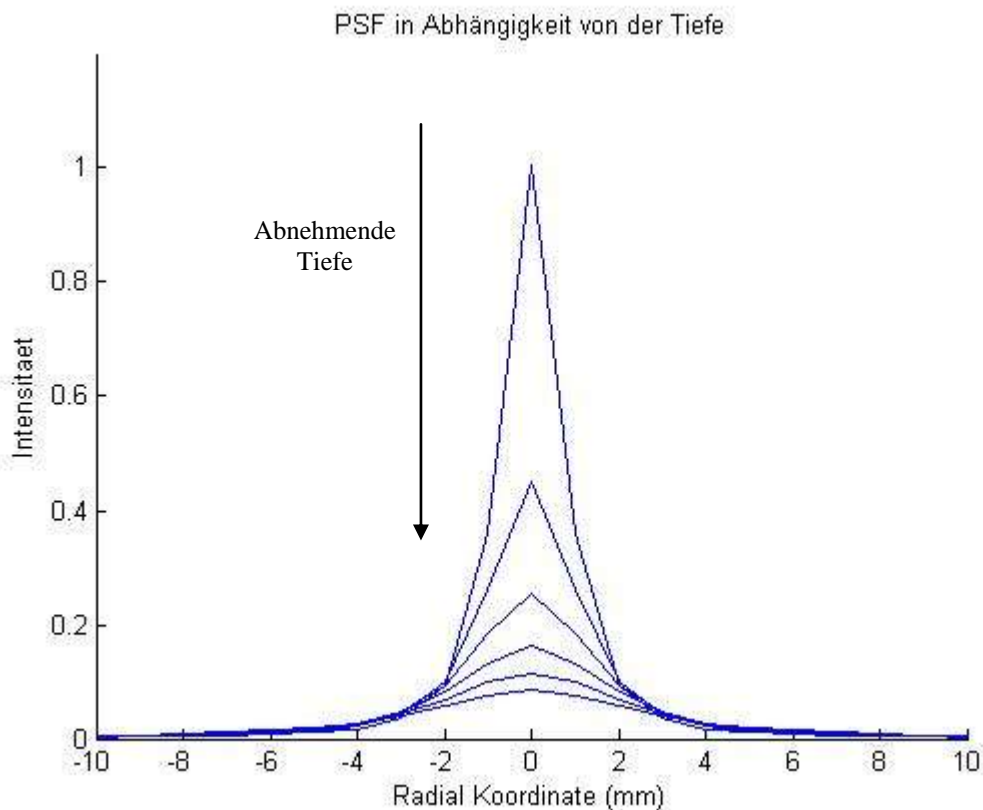
Beschrieben, wobei  $T$  die Temperatur,  $t$  [s] die Zeit,  $\alpha = \lambda / \rho c_p$  [ $m^2 / s$ ] die Temperaturleitfähigkeit,  $\lambda$  [ $W / m \cdot K$ ] die Wärmeleitfähigkeit,  $\rho$  [ $kg / m^3$ ] die Dichte des Materials und  $c_p$  [ $J / kg \cdot K$ ] die spezifische Wärmekapazität ist.

Die Temperaturverteilung, welche sich durch die Reflektion der eingestrahnten Welle an einem punktförmigen Hindernis an der planen Oberfläche ergibt, kann durch folgende Greenesche Funktionen beschrieben werden [14]:

$$h(x, y) = -\frac{A}{2\pi} \left( \frac{1}{\pi\alpha t} \right)^{1/2} \frac{\partial}{\partial l} e^{-\frac{[(x^2+y^2+l^2)^{1/2}+l]^2}{4\alpha t}}}{[(x^2+y^2+l^2)^{1/2}]^2} \quad (5)$$

Hier sind  $(x, y)$  die kartesischen Koordinaten der Probandenoberfläche und  $l$  ist die Tiefe der punktförmigen Störung. Diese Abhängigkeit der Darstellung mit der Tiefe wird in Abbildung 4 veranschaulicht. Für die Simulation wurde für die Temperaturleitfähigkeit der Wert  $\alpha = 2 \cdot 10^{-6} m^2 / s$  genommen (was dem Wert von CFK//, d.h. wenn die Verbreitung der Wärme in Faserrichtung erfolgt, entspricht).

Zur Entfaltung verwenden wir den Ansatz nach Richardson-Lucy ([16], [17]) in Kombination mit einem vorgeschalteten Wiener Filter zur Rauschreduzierung. Mit diesem Ansatz wurden gute Ergebnisse erzielt.

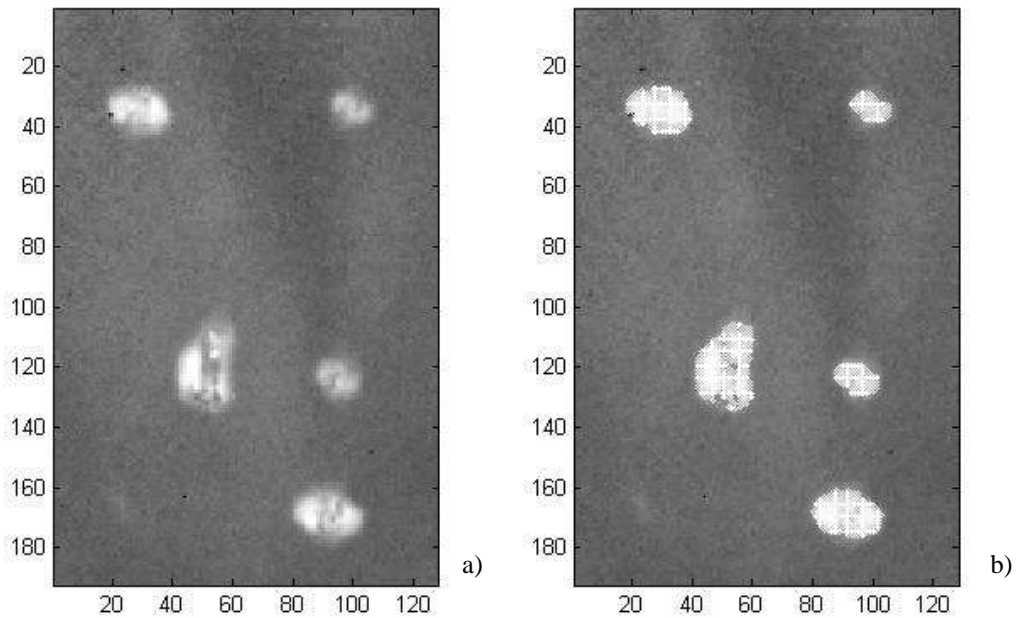


**Abbildung 4:** Kurvenschar: Radialfunktion in Abhängigkeit von der Tiefe ( $\alpha = 2 \cdot 10^{-6} m / s$ ,  $t = 50s$ , Tiefen von 1 bis 3.5mm)

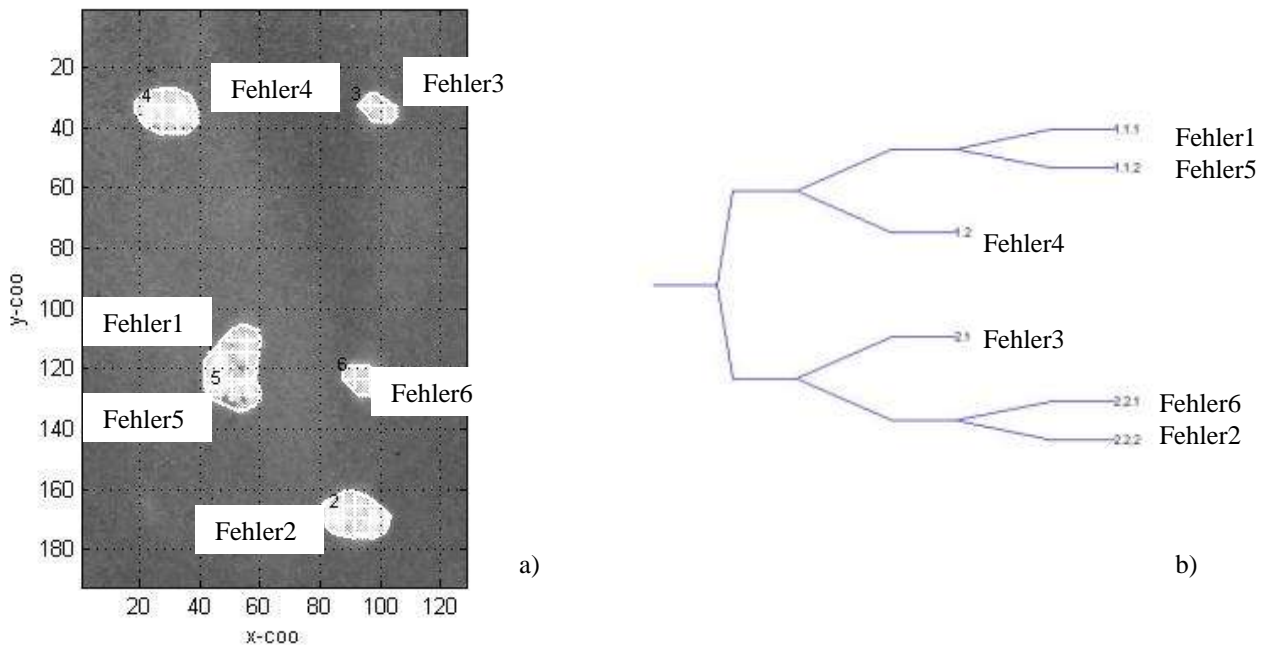
#### e. Segmentierung

Die Segmentierung, also die Zuordnung einzelner Pixel zu diskreten Fehlergebieten und deren Vermessung und Lokalisierung wurde mit einem Bi-Partitionsalgorithmus durchgeführt. Die Segmentierung ist wesentlich für eine automatische Fehlererkennung. Die Fehlergebiete werden so lange in jeweils zwei weitere Gebiete unterteilt, bis eine endgültige Segmentierung vorliegt. Die Segmentierung liefert dann einzelne Fehlergebiete, deren Umrandung und Fläche, Position und je nach Zugehörigkeit zu einem bestimmten Phasenbild die Tiefe des Schadens. Wegen der eingesetzten Marken und durch die Entzerrung der Bilder entsprechen die dabei gewonnenen Werte einem realen Maßstab und

keinen Pixelwerten mehr. In Abbildung 5 wird das Ergebnis der Klassifizierung gezeigt. Dabei sind die Pixel noch nicht in Fehlergebieten (Fehler 1, Fehler 2...) zugeordnet. In Abbildung 6 sind die segmentierten Bereiche und der Segmentierungsbaum abgebildet, der die Arbeitsweise des Algorithmus, der die Fehlerpunkte in immer kleinere Gebiete unterteilt, zeigt.



**Abbildung 5:** Exemplarisches Fehlergebiet und Fehlerklassifikation nach Schwellwert:  
a) Originalbild b) klassifizierte Bereiche.



**Abbildung 6:** a) Segmentierung mit konvexer Hülle und b) Segmentierungsbaum.

## Ausblick

In dieser Arbeit wurden Verfahren diskutiert, mit deren Hilfe man (halb-) automatisch Phasenbilder analysieren, Defekte detektieren und vermessen kann.

Unsere weitere Arbeit wird sich zunächst auf drei Punkte konzentrieren:

(a) Ableitung von Eigenschaften (*features*), die zum verbesserten Nachweis von Defekten führen, wie Analyse der Textur und räumlichem Zusammenhang von Defektgebieten. Die Fehlerklassifikation der Eigenschaftsvektoren mit statistischen Verfahren (Support Vektor Maschinen, Neuronale Netze)

(b) Die empirische Bestimmung der *PSF*, die von Defekttiefe und Materialeigenschaften abhängt, und dem Vergleich mit den theoretischen Vorgaben. Die Entfaltung der Phasenbilder, besonders von tiefliegenden Defekten, sollte eine Verbesserung der Bestimmung der räumlichen Ausdehnung ermöglichen.

(c) Tiefenbestimmung des Defekts durch die Auswertung der Phasenbildsequenzen. Es ist daran gedacht sämtliche Verfahren in ein GUI zu integrieren, das als Werkzeug zur Analyse von Phasenbildern dienen kann.

## 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] Busse, G., "Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal", *Appl. Phys. Lett.*, (1979), 35, 759-760.
- [2] 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.
- [3] Lehto, A., Jaarinen, J., Tiusanen, T., Jokinen, M., Luukkala, M., "Amplitude and phase in thermal wave imaging", *Electr. Lett.*, (1981), 17, 364-365.
- [4] Bennett, C. A. Jr., Patty, R. R., "Thermal wave interferometry: A potential application of the photoacoustic effect", *Appl. Opt.*, (1982), 21, 49-54.
- [5] 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.
- [6] Rosencwaig, A., "Photoacoustic microscopy", *American Lab*, (1979), 11, 725-727.
- [7] 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
- [8] 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.
- [9] Busse, G., Wu, D., Karpen, W., "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography", *J. Appl. Phys.*, (1992), 71, 3962-3965.
- [10] Tomazevic, D.; Likar, B. & Pernus, F., "A comparison of retrospective shading correction techniques", *15th International Conference On Pattern Recognition - ICPR 2000*, 3-7 Sep, Barcelona, Spain, Sanfeliu (Ed.), (2000), 3, 568-571
- [11] Likar, B., Maintz, J., Viergever, M., Pernus, F., "Retrospective shading correction based on entropy minimization", *Journal of Microscopy*, 197, (2000), 285-295
- [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



- [15] Thomas, R., Favro, L., Crowther, D. , Kuo, P., "Inversion of thermal wave infrared images", Quantitative infrared thermography QIRT 92, Balageas, Busse and Carlomagno (Ed.), (1992)
- [16] Richardson, "W.H. Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration", J. Opt. Soc. Am., (1972) 62, 55
- [17] Lucy, L., "An iterative technique for the rectification of observed distributions", Astron. J., (1974), 79, 745