

# Zerstörungsfreie Prüfung von faserverstärkten Kunststoffen mittels Impuls-Thermographie – Gegenüberstellung und Bewertung verschiedener Auswertelgorithmen

Vitalij POPOV<sup>1</sup>, Lars BUDESHEIM<sup>1</sup>, Martin GURKA<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern

Kontakt E-Mail: vitalij.popow@ivw.uni-kl.de

**Kurzfassung.** Faserverstärkte Verbundwerkstoffe entstehen erst während der Bauteilherstellung, sodass geeignete Prüfverfahren zur Prozessüberwachung und Qualitätskontrolle jedes hergestellten Bauteils unabdingbar sind. Neben der weitverbreiteten Ultraschallprüfung bietet sich hierfür die Impulsthermographie als großflächig einsetzbare Prüfmethode an. Diese ist allerdings zum einen in der Tiefenreichweite stark beschränkt, zum anderen nehmen der Kontrast und die laterale Größe der zu detektierenden Fehlstelle mit zunehmender Tiefenlage ab.

Zur Aufweitung der gegebenen Grenzen und zur Verbesserung des Kontrastverhältnisses bei tieferliegender Fehlstellen werden in diesem Beitrag verschiedene Auswerteverfahren (1) Differential Absolute Contrast, (2) Thermographic Signal Reconstruction, (3) Pulse Phase Thermography, (4) Principle Component Thermography und (5) High Order Statistics gegenübergestellt und auf ihre Eignung zur Detektion von Fehlstellen, insbesondere von Delaminationen in unterschiedlichen Tiefenlagen, untersucht. Dabei werden die Grenzen der Detektierbarkeit aufgezeigt und Ansätze für die weiterführende Analyse und Kombination der Methoden untereinander sowie mit Methoden geometrischer Bewertung vorgestellt. Als Probekörper kommt ein multiaxiales Verbundlaminat mit generischen Fehlstellen zum Einsatz. Die Bewertung der Messergebnisse erfolgt durch die Bestimmung des Kontrasts anhand des Signal-Rausch-Verhältnisses.

## 1 Einführung

Meist wird für die Prüfung von Bauteilen aus faserverstärkten Verbundwerkstoffen der klassische wassergekoppelte Ultraschall eingesetzt. Dieser liefert hoch auflösende Messwerte, ist aber trotz eines hohen Automatisierungsgrades aufwändig und zeitraubend. Dem gegenüber stehen die berührungsfreien und großflächig einsetzbaren Thermographieverfahren, bspw. die Impulsthermographie. Diese bieten zum heutigen Zeitpunkt eine vergleichsweise schlechtere Auflösung, insbesondere in Tiefenrichtung, eignen sich aber aufgrund der einfachen Adaption und kurzen Prüfzeiten als eine vorangeschaltete Methode für eine automatisierte Messumgebung mit kombinierten und aufeinander aufbauenden Verfahren welche die Stärken einzelner Verfahren gewinnbringend zusammenführen und Schwächen kompensieren.



Mittels Thermographie lassen sich Fehler innerhalb eines Bauteils nur bei ausreichendem thermischem Kontrast zur intakten Umgebung identifizieren. Da dieser häufig sehr schwach ist, werden einerseits Veränderungen am Equipment vorgenommen [1], andererseits werden kontraststeigernde Auswertemethoden eingesetzt. Dazu steht eine Vielzahl an Methoden zur Verfügung, was den Anwender vor die Entscheidung stellt, welches Verfahren für die Problemstellung geeignet ist und welche Auswerteparameter unter den gegebenen Rahmenbedingungen, z.B. Prozesszeit, Materialkombination, Prüfaufgabe etc., zu wählen sind. Für eine maschinelle Auswertung und eine quantitative Bestimmung der Fehlergröße ist es erforderlich eine lokale Kontrastoptimierung vorzunehmen.

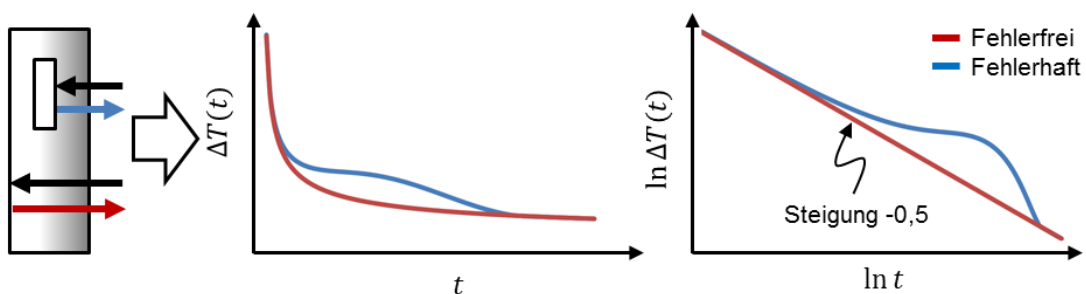
Vor diesem Hintergrund wird in diesem Beitrag eine mit Flachbodenbohrungen in unterschiedlichen Tiefenlagen versehene CFK Probe als Referenzbauteil untersucht und dabei die Auswerteparameter für die Verfahren (1) Differential Absolute Contrast, (2) Thermographic Signal Reconstruction, (3) Pulse Phase Thermography, (4) Principle Component Thermography und (5) High Order Statistics hinsichtlich Fehlstellenkontrast durch Bestimmung des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) für jede Fehlertiefe optimiert. Zuletzt werden die auf diese Weise generierten Ergebnisse für jede Methode dargestellt und anschließend anhand des SNR miteinander verglichen und diskutiert.

## 2 Funktionsprinzip der Impulsthermographie

Bei der Impulsthermographie wird die Oberfläche des zu prüfenden Bauteils durch einem sehr kurzen Blitzimpuls thermisch angeregt. Die absorbierte Energie des Lichtimpulses diffundiert durch Wärmeleitungsprozesse ins Bauteilinnere und wird an Defekten an der fortlaufenden Ausbreitung gehindert. Infolgedessen bildet sich auf der Bauteiloberfläche ein Temperaturkontrast zwischen fehlerhaften und intakten Bereichen aus. Durch die Erfassung des zeitlichen und räumlichen Abkühlungsverhaltens der Probe durch Messen der von der Oberfläche abgestrahlten Wärmestrahlung mit einer Infrarot(IR)-Kamera kann auf verborgene Schäden geschlossen werden [2]. Analytisch kann das Abkühlverhalten durch die Lösung der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung nach Anregung durch einen Dirac-Impuls angenähert werden. Es gilt [3]:

$$\Delta T(t) = \frac{Q}{\sqrt{k\rho c\pi t}}$$

wobei  $\Delta T$  die Temperaturdifferenz,  $Q$  die von der Oberfläche absorbierte Energie,  $k$  die Wärmeleitfähigkeit,  $\rho$  die Dichte,  $c$  die spezifische Wärmekapazität und  $t$  die Zeit ist. Abbildung 1 zeigt schematisch das Abkühlverhalten für einen fehlerfreien und einen fehlerhaften Bildpunkt.



**Abb. 1.** Abkühlungsverhalten der Probenoberfläche nach Blitzanregung im Zeitbereich und in doppelt-logarithmischer Darstellung.

### 3 Methoden zur Auswertung und Bewertungsschema

#### 3.1 Differential Absolute Contrast (DAC)

Die Idee des Differential Absolute Contrast (DAC) [4] ist es, ab dem Zeitpunkt, an dem sich im Thermogramm ein Fehler bemerkbar macht, einen lokalen Temperaturverlauf zu berechnen, der sich einstellen würde, wenn kein Fehler vorliegen würde. Dazu wird zunächst ein Zeitpunkt  $t'$  als Ausgangspunkt festgelegt, an dem noch kein Fehler im Thermogramm erkennbar ist, und davon ausgehend der weitere hypothetische Temperaturverlauf anhand des Wärmeleitungsmodells berechnet. Der DAC ergibt sich schließlich aus der Differenz zwischen tatsächlichem und lokal berechnetem Temperaturverlauf:

$$C_{(x,y)}^{DAC}(t) = \Delta T_{(x,y)}(t) - \sqrt{\frac{t'}{t}} \cdot \Delta T_{(x,y)}(t')$$

Dabei ist  $\Delta T_{(x,y)}(t) = T_{(x,y)}(t) - T_{0,(x,y)}(t)$  die momentane Temperaturdifferenz,  $\Delta T_{S(x,y)}(t')$  die Temperaturdifferenz zum Zeitpunkt  $t'$  und  $T_{0,(x,y)}(t)$  die Temperatur vor dem Blitzimpuls für Pixel  $x, y$ .

#### 3.2 Puls-Phasen-Thermographie (PPT)

Bei der Puls-Phasen-Thermographie (PPT) [5,6] wird das gemessene Temperatursignal im Frequenzraum ausgewertet. Ein idealisierter Blitzimpuls wird im Frequenzraum durch die Überlagerung unendlich vieler Frequenzen repräsentiert. Zur Extraktion der unterschiedlichen Frequenzen aus dem Temperatur-Zeit-Signal wird die diskrete Fouriertransformation (DFT) eingesetzt

$$\mathcal{F}_n = \sum_{k=0}^{N-1} T(k) \cdot e^{-2\pi i \frac{nk}{N}} = Re_n + Im_n$$

wobei  $n$  ( $n = 0, \dots, N - 1$ ) das Frequenzinkrement und  $N$  die Anzahl der Temperaturwerte der Sequenz ist. Aus der komplexen Exponentialfunktion wird schließlich Amplitude  $A_n$  und Phase  $\phi_n$  berechnet.

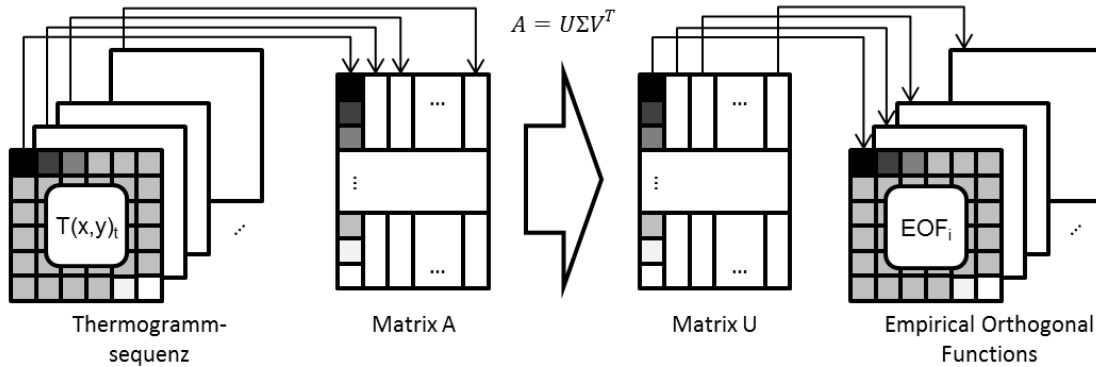
#### 3.3 Principle Component Thermographie (PCT)

Die Principle Component Thermographie (PCT) [7] baut auf dem mathematischen Konzept der Hauptkomponentenanalyse auf und wendet eine Singulärwertzerlegung (SVD) auf die Thermogrammsequenz an:

$$A = U\Sigma V^T$$

$U$  beschreibt dabei eine orthonormale  $M \times N$  Matrix,  $\Sigma$  eine  $N \times N$  Diagonalmatrix mit den Singulärwerten und  $V^T$  eine transponierte orthonormale  $N \times N$  Matrix.

Zur Anwendung der SVD auf eine Thermogrammsequenz muss diese in die Matrix  $A$  überführt werden. Dies geschieht durch eine rasterweise Umformung der einzelnen Thermogramme als Spalteneinträge in Matrix  $A$ , wie in Abbildung 2 gezeigt.



**Abb. 2.** Umformung der Thermogrammsequenz in Matrix A und Rücktransformation der Matrix U. Angelehnt an [8]

Die Spalten der berechneten Matrix  $U$  enthalten die Empirical Orthogonal Functions (EOF), welche die räumlichen Variationen innerhalb der Daten (Fehler) mit abnehmender Relevanz wiedergeben. Durch analoges Rückformen werden die EOFs wieder in ein Bild zurücküberführt.

### 3.4 Thermographic Signal Reconstruction (TSR)

Die Thermographic Signal Reconstruction (TSR) [9,10] betrachtet Abweichungen vom idealen Abkühlverhalten einer intakten Probe. In doppelt-logarithmischer Darstellung entspricht der ideale Temperatur-Zeit-Verlauf annähernd einer Geraden mit Steigung  $-0,5$  und weicht von diesem Verlauf ab, wenn das Bauteil verborgene Fehlstellen enthält. Der gemessene Temperaturverlauf wird durch ein Polynom  $n$ -ten Grades approximiert:

$$\ln(\Delta T(t)) = \sum_{n=0}^N a_n \cdot \ln(t)^n$$

Dadurch lässt sich auf einfache Weise die erste und zweite Ableitung des Signals bilden. Diese reagieren sehr sensibel auf Temperaturabweichungen und ermöglichen es Fehler frühzeitig zu identifizieren.

### 3.5 Higher Order Statistics (HOS)

Ausgangspunkt der Higher Order Statistics (HOS) [11] ist ebenfalls die Tatsache, dass sich in Abhängigkeit von Fehlern innerhalb des Bauteils unterschiedliche Temperaturverläufe an der Oberfläche einstellen. Bei HOS wird der Temperaturverlauf jedes Pixels mit statistischen Lageparametern höherer Ordnung beschrieben. Zur Charakterisierung werden als Kenngrößen die standardisierten zentralen Momente  $M_I$  der 3.-5. Ordnung verwendet

$$M_I = \frac{E[(X - E[X])^I]}{\sigma^I} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^I}{\sigma^I} \quad \text{mit } I = 3,4,5$$

wobei  $I = 3$  die Schiefe und  $I = 4$  die Wölbung beschreibt.

### 3.6 Bewertung des Fehlstellensignals mittels Signal-to-Noise Ratio

Zur objektiven, quantitativen Bewertung der gemessenen, orts aufgelösten Thermogramme eignet sich die Analyse des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) [12]. Zur Berechnung des

SNR muss ein Defektbereich und ein Referenzbereich definiert werden. Der Defektbereich umfasst Bildpixel, in denen sich eine Fehlstelle äußert, und wird als Signal betrachtet. Als Referenzbereich wird ein fehlerfreier Bereich in der Nähe des Defektes festgelegt, der das Rauschen charakterisiert. Das SNR berechnet sich dann gemäß:

$$SNR_1 = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{|S_{Def} - S_{Ref}|}{\sigma_{Ref}} \right) \text{ [dB]}$$

Um einen Fehler erkennen zu können, muss das SNR größer als 0 dB sein [13].

## 4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

### 4.1 Probekörper mit definieren Fehlstellen

Untersucht wurde eine im Prepreg-Autoklavverfahren hergestellte CFK-Probe mit dem Lagenaufbau (0/90)<sub>5S</sub> und den Abmessungen 60x150x3,75 mm<sup>3</sup>. Zur Modellierung von Delaminationen wurden Flachbodenbohrungen mit definierter Tiefenlage eingearbeitet, sodass für die Untersuchungen insgesamt 18 unterschiedliche Restwandstärken zur Verfügung stehen. Auf diese Weise kann die maximal erreichbare Tiefenreichweite in einfacher Weise aus den Ergebnisbildern bestimmt und für die Kalibrierung der Mess- und Auswerteparameter verwendet werden. Der schematische Aufbau des Probekörpers, die jeweiligen Restwandstärken sowie der für die SNR Berechnung verwendete Defekt- und Referenzbereich sind in Abbildung 3 gezeigt.

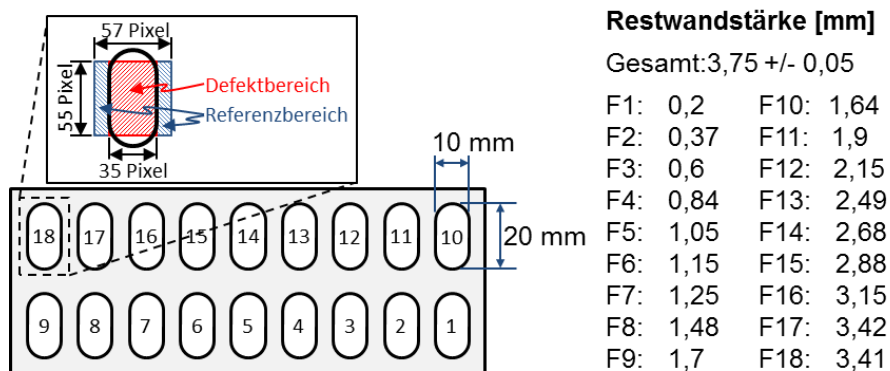


Abb. 3. Schemazeichnung der verwendeten CFK Probe mit rückseitigen Vertiefungen laut Tabelle.

### 4.2 Equipment

Als thermische Anregungsquelle wurde eine Xenonblitzlampe (Hensel VH3-6000 Linear Head) mit einer Leistung von 6 kJ verwendet. Zur Aufnahme der Thermogrammsequenz wurde eine gekühlte InSb-IR-Kamera mit einer maximalen Bildwiederholrate von 300 FPS bei einer Auflösung von 640x512 Pixeln (InfraTec ImageIR 8320HP) eingesetzt. Die Verarbeitung und Auswertung der Thermogrammsequenzen erfolgte in LabView.

### 4.3 Methodik

Für alle o.g. Auswertemethoden sind folgende drei Versuchsparameter für das erzielbare SNR aber auch für den erforderlichen Aufwand von entscheidender Bedeutung (s. Abb. 4):

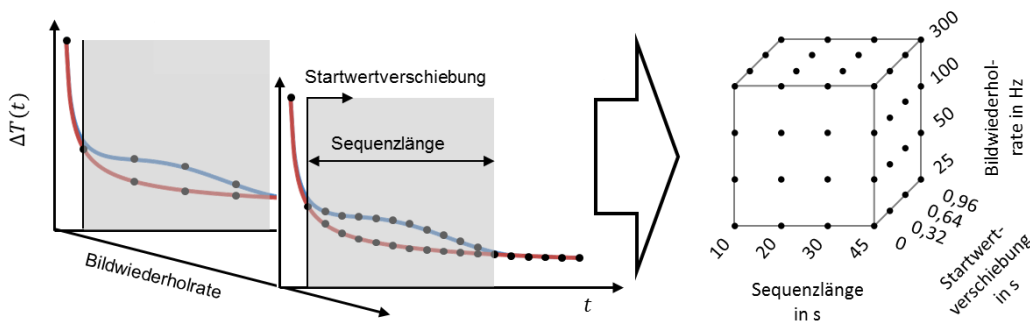
- (1) Bildwiederholrate: Anzahl der Thermogramme pro Zeiteinheit
- (2) Sequenzlänge: zeitliches Auswertefenster (nur für PPT, PCT und HOS relevant)

(3) Startwertverschiebung: Zeitpunkt, ab dem das Verfahren angewendet wird

Bei DAC und TSR ist eine Startwertverschiebung prinzipiell möglich, allerdings war der oberflächennächste Fehler bereits nach wenigen Thermogrammen erkennbar, weshalb keine Startwertverschiebung vorgenommen wurde. Auch eine Reduktion der Bildwiederholrate wurde als nicht sinnvoll angesehen, da diese bei der SNR Berechnung lediglich ein anderes, in der Nähe liegendes und sich nur wenig unterscheidendes Bild als neues Optimum zur Folge hätte.

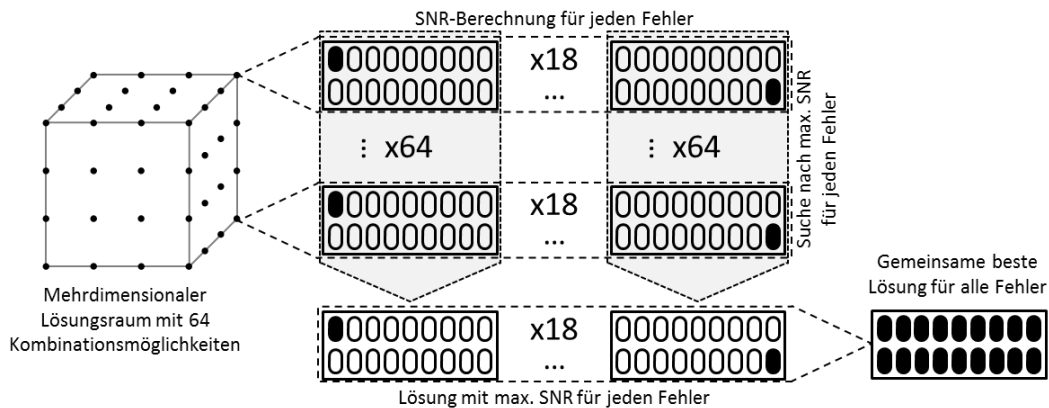
Bei PPT, PCT und HOS können alle drei Versuchssparameter variiert werden. Zur Identifikation der optimalen Parameter wurde daher für die Messung eine möglichst große Spanne gewählt und eine 46 s lange Sequenz mit einer Bildwiederholrate von 300 FPS aufgezeichnet.

Die drei o.g. Parameter wurden in 4 Schritten angepasst, sodass sich eine dreidimensionale Versuchsmatrix mit insgesamt 64 möglichen Kombinationen ergab (4x4x4). Die Anpassung der Bildwiederholrate erfolgte durch Löschen entsprechender Thermogramme im Datensatz. Anschließend wurden für jede Kombinationsmöglichkeit die Verfahren PPT, PCT und HOS angewandt. Dabei wurden bei PPT die 20 niedrigsten Frequenzen, bei PCT die 10 größten EOFs und bei HOS die Momente 3.-5. Ordnung ausgewertet. Auf diese Weise entstand ein dreidimensionaler Lösungsraum, in dem jeder Punkt wiederum eine Sequenz aus Ergebnisbildern darstellt (s. Abbildung 4).



**Abb. 4.** Erstellung einer dreidimensionalen Versuchsmatrix mit 64 Kombinationsmöglichkeiten für die Verfahren PPT, PCT und HOS durch Variation von Sequenzlänge, Startwertverschiebung und Bildwiederholrate.

Für jedes Ergebnisbild jeder Sequenz des Lösungsraumes (64) wurde anschließend für jeden Fehlerbereich auf der Probe (18) das SNR berechnet und das Ergebnisbild mit dem maximalen SNR ausgewählt. Je Verfahren entstanden daraus 64x18 Optimalkombinationen. Zuletzt wurden die jeweils besten Ergebnisse zu einem Gesamtbild zusammengesetzt und miteinander verglichen, vgl. Abbildung 5.

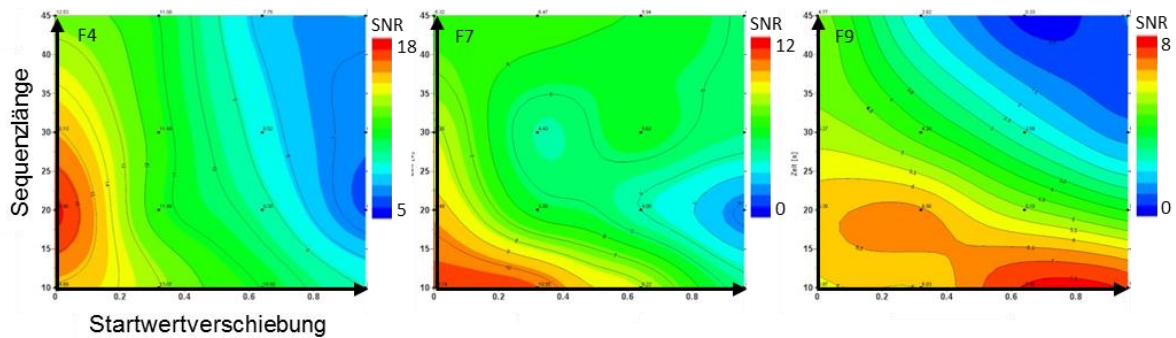


**Abb. 5.** Mehrdimensionaler Lösungsraum für die Verfahren PPT, PCT und HOS. Es wird für jede Kombination und jeden Fehlerbereich das Ergebnisbild mit dem höchsten SNR Wert bestimmt, eine lokale Kontrastoptimierung durchgeführt und die Ergebnisse anschließend zu einem Gesamtbild zusammengesetzt.

## 5 Ergebnisse & Diskussion

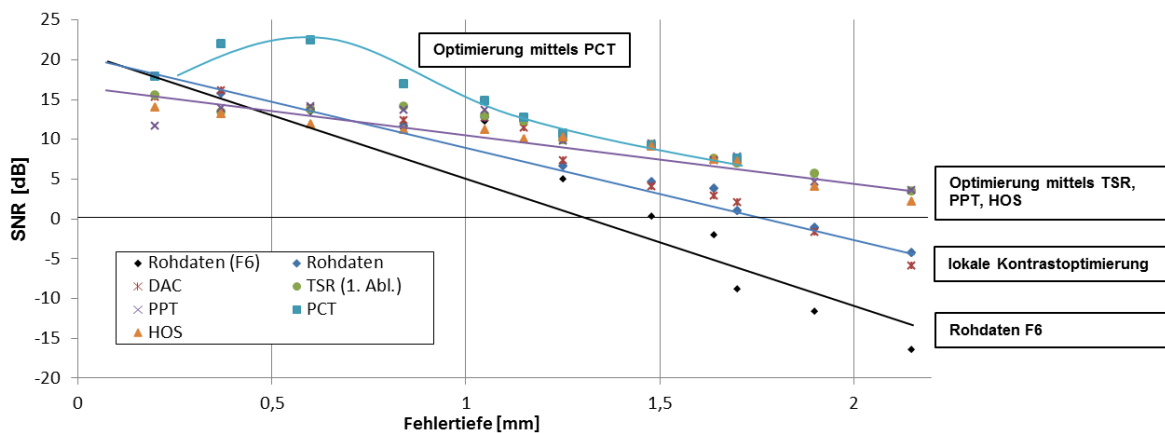
Die Ergebnisse zeigen, dass die Verfahren PPT, PCT und HOS relativ robust gegenüber einer Reduzierung der Bildwiederholrate sind. Selbst bei einer Reduzierung auf 25 FPS ergeben sich nur geringfügig kleinere SNR Werte als bei 300 FPS. Daher wird auf die weitere Variation der Bildwiederholrate verzichtet. Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich auf 300 FPS.

Für die Verfahren PPT, PCT und HOS bleibt daher die Variation der Startwertverschiebung und Sequenzlänge, was in Abbildung 6 beispielhaft gezeigt wird. Der optimale Arbeitspunkt wird anhand des maximalen SNR identifiziert und verändert sich in Abhängigkeit der betrachteten Fehlertiefe. Für einige Tiefenlagen ist das SNR für mehrere Parameterkombinationen nahezu identisch, was dem Anwender mehr Flexibilität gewährleistet. Insgesamt lässt sich sagen, dass für oberflächennahe Defekte eine Startwertverschiebung zu vermeiden ist und diese auch mit der kleinsten gewählten Sequenzlänge sichtbar sind (F1-F5). Erst für tiefere Defekte sind eine größere Sequenzlänge und eine Startwertverschiebung erforderlich. Für HOS und PCT ist eine kurze Sequenz (10-20 s) in den meisten Fällen ausreichend, stattdessen ist die Startwertverschiebung der wichtigere Einflussparameter. Bei PPT hingegen sind beide Parameter für die Detektion tieferliegender Fehlstellen von Bedeutung.



**Abb. 6.** Optimaler Arbeitspunkt (roter Bereich) anhand des SNR in Abhängigkeit von Startwertverschiebung und Sequenzlänge bei 100 FPS am Beispiel PCT für drei Fehler (links F4, mitte F7, rechts F9)

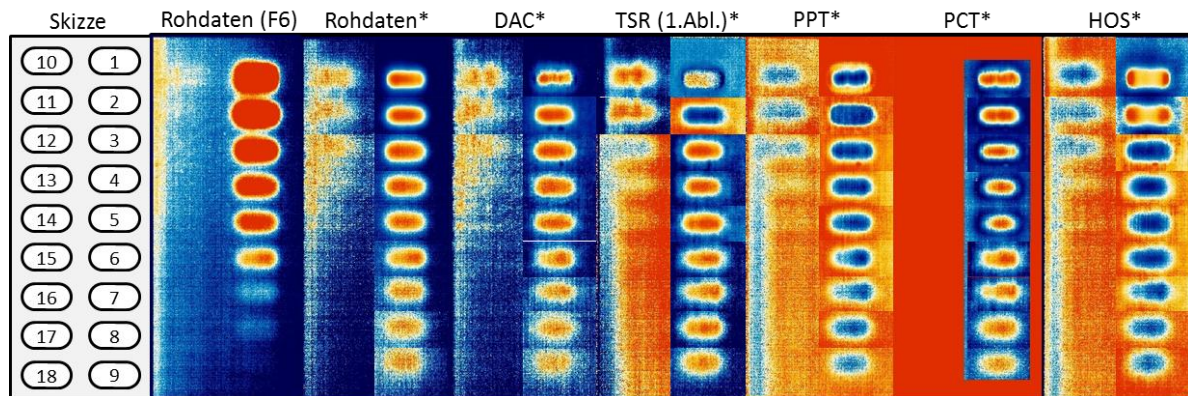
Beim Vergleich der SNR Werte für die angewandten Verfahren lässt sich bis F7 das PCT Verfahren als optimale Methode identifizieren, vgl. Abbildung 7. Erst bei tieferen Fehlstellen F8-F12 liegt das Optimum bei PPT bzw. TSR.



**Abb. 7.** SNR Werte in dB der optimalen Parameterkonfiguration im Vergleich für Rohdaten (Skalierung auf F6), Rohdaten, DAC, PPT, HOS, TSR und PCT. Tieferliegende Defekte ab F13 haben einen SNR unter 0 dB.

Anders als die Ergebnisse aus Abbildung 7 vermuten lassen, sind die Unterschiede zwischen den Methoden in der visuellen Darstellung für die oberflächennahen Fehler F1-

F10 nicht immer eindeutig festzustellen. Die Fehler sind bei allen Verfahren (auch den Rohdaten) sichtbar, vgl. Abbildung 8. Erst bei tieferliegenden Defekten ab F11 sind die beschriebenen Methoden erforderlich und erlauben eine klare Detektierbarkeit bis F12, was einer Tiefe von 2,15 mm entspricht.



**Abb. 8.** Gegenüberstellung der jeweils besten Ergebnisse für die Rohdaten (Skalierung auf F6), Rohdaten, DAC, PPT, HOS, TSR und PCT. Bei PCT wurde nur der Bereich F1 - F9 betrachtet. \*Die dargestellten Bilder wurden zusammengesetzt aus jeweils lokal kontrastoptimierten Teilergebnissen, sodass eine Skalierung nicht dargestellt werden kann.

Für die Detektion oberflächennaher Defekte kann auf die Rohdaten zurückgegriffen werden, welche einen hinreichend guten SNR aufweisen und den Einsatz der Methoden nicht unbedingt erforderlich machen. Bei Defekten mit schwachem Kontrast sowie bei tieferliegenden Defekten eignen sich besonders die Verfahren TSR, PPT und HOS.

Der wichtigste Einflussparameter für alle Methoden ist die Startwertverschiebung. Bei Wahl einer günstigen Hardware mit geringer Bildwiederholrate hat dies zur Folge, dass der optimale Startzeitpunkt verpasst werden kann und ein schlechterer SNR die Folge ist. Dies ist vor allen Dingen bei PCT und HOS der Fall, wohingegen PPT weniger sensibel auf eine Startwertverschiebung reagiert und sich daher in solcher Fällen eher eignet.

Für eine automatisierte Auswertung ist neben dem Defektkontrast auch die Berechnungsdauer ein wichtiger Faktor. Hier zeichnen sich vor allem die Verfahren DAC, PPT und HOS durch relativ kurze Berechnungszeit aus.

Die weitere Optimierung der Ergebnisse und die Visualisierung tieferliegender Defekte könnte durch eine Verfahrenskombination realisiert werden, bspw. durch den Einsatz von DAC oder TSR als Preprocessor und die anschließende Anwendung eines Transformationsverfahrens (PPT, PCT) oder eines statistischen Verfahrens (HOS). Eine weitere Verbesserung des Kontrasts könnte außerdem durch Zuhilfenahme geometrischer Filter unmittelbar vor der Bildbewertung oder durch hardwareseitige Erhöhung der Blitzleistung realisiert werden.

## 6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die optimale Parameterkombination aller untersuchten Methoden stark tiefenabhängig ist. Ein Vergleich der Ergebnisse anhand des SNR zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Verfahren, auch wenn diese Differenzen in der direkten Gegenüberstellung der Ergebnisbilder kaum zu erkennen sind. Nur bei tieferliegenden Defekten sind visuelle Unterschiede feststellbar. Andere Bild- und Kontrastbewertungsmethoden könnten anstelle des SNR eindeutigere Ergebnisse liefern, was sich v.a. vor dem Hintergrund der Automatisierbarkeit in kombinierten Messumgebungen als vorteilhaft herausstellen könnte. Die hier gewonnenen Erkenntnisse



können vor allem bei der Bestimmung der lateralen Fehlergröße und Fehlertiefe hilfreich sein.

## Referenzen

- [1] Maierhofer, C.; Myrach, P.; Steinfurth, H.: Einfluss von Material, Messparametern und Umgebungsbedingungen auf die Nachweisempfindlichkeit der Blitzthermographie. In: Berichtsband der DGZfP-Jahrestagung 2013, Dresden, 6.-8. Mai 2013
- [2] Maldague, X.P.V.: Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. New York: John Wiley & Sons, 2001
- [3] Carslaw, H.S.; Jaeger, J.C.: Conduction of Heat in Solids. 2nd Ed., Oxford: Clarendon Press, 1959
- [4] Pilla, M.; Klein, M.; Maldague, X.; Salerno, A.: New Absolute Contrast for Pulsed Thermography. In: Balageas, D.; Busse, G.; Carlomango, G. (Eds.): QIRT 2002, Proceedings of QIRT. Zagreb: FSB, 2002, pp. 53-58
- [5] Maldague, X.; Marinetti, S.: Pulse Phase Infrared Thermography. Journal of Applied Physics, Vol. 79, Issue 5 (1996), pp. 2694-2698
- [6] Maldague, X.; Galmiche, F.; Ziadi, A.: Advances in Pulsed Phase Thermography. Infrared Physics & Technology, Vol. 43, Issue 3-5 (2002), pp. 175-181
- [7] Rajic, N.: Principal Component Thermography for Flaw Contrast Enhancement and Flaw Depth Characterisation in Composite Structures. Composite Structures, Vol. 58, Issue 4 (2002), pp. 521-528
- [8] Ibarra-Castanedo, C.; González, D.; Galmiche, F.; Maldague, X.P.; Bendada, A.: Discrete Signal Transforms as a Tool for Processing and Analyzing Pulsed Thermographic Data. In: Miles, J.J.; Peacock, R.; Knettel, K.M. (Eds.): Thermosense XXVIII, Proceedings of SPIE. Vol. 6205, Bellingham: SPIE Press, 2006, 620514
- [9] Shepard, S.M.: Advances in Pulsed Thermography. In: Rozlosnik, A.E.; Dinwiddie, R.B.: Thermosense XXIII, Proceedings of SPIE. Vol 4360, Bellingham: SPIE Press, 2001, pp. 511-515
- [10] Shepard, S.M.; Lhota, J.R.; Rubadeux, B.A.; Wang, D.; Ahmed, T.: Reconstruction and Enhancement of Active Thermographic Image Sequences. Optical Engineering, Vol. 42, Issue 5 (2003), pp. 1337-1342
- [11] Madruga, F.J.; Ibarra-Castanedo, C.; Conde, O.M.; López-Higuera, J.M.; Maldague, X.: Infrared Thermography Processing Based on Higher-Order Statistics. NDT & E International, Vol. 43, Issue 8 (2010), pp. 661-666
- [12] Usamentiaga, R.; Venegas, P.; Guerediaga, J.; Vega, L.; Molleda, J.; Bulnes, F.G.: Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. Sensors, Vol. 14, Issue 7 (2014), pp. 12305-12348
- [13] Albendea, P.; Madruga, F.J.; Cobo, A.; López-Higuera, J.M.: Signal to Noise Ratio (SNR) Comparison for Pulsed Thermographic Data Processing Methods Applied to Welding Defect Detection. In: QIRT 2010, 10th International Conference on Quantitative Infra-Red Thermography, Québec (Canada), July 27-30, 2010