

Schock Response Spectrum (SRS) Analyse als alternative Methode zur Auswertung von Infrarot-Thermografie (IRT) Daten

Harutyun YAGDJIAN¹, Martin GURKA¹

¹ Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern

Kontakt E-Mail: harutyun.yagdjian@ivw.uni-kl.de

Kurzfassung. In diesem Beitrag schlagen wir eine alternative Methode zur Auswertung von Impuls-Thermografiedaten (IRT) vor, die auf einer Analogie zur Schock Response Spectrum (SRS) Analyse (ISO 18431) für mechanische Systeme basiert. Vorteil dieser Methode ist, dass im Vergleich zu weitverbreiteten IRT-Datenverarbeitungsmethoden bei denen nur das Abkühlverhalten betrachtet wird, indem das Thermogramm vor der maximalen Temperatur abgeschnitten wird, wie z.B. Pulse-Phase Thermographie (PPT) oder Thermal Signal Reconstruction (TSR) und damit die Pulsform nicht mitberücksichtigt wird, das gesamte Signal, inklusiver der Erwärmungsphase untersucht wird. Ferner kann das auch im Gegensatz zu den Methoden wie Modified Differential Absolute Contrast (MDAC), bei denen die 1D analytischen Lösungen eine Dirac impulsförmige Erwärmung annehmen, vorteilhaft sein, weil es keine Impulsform explizit angenommen werden muss. Darüber hinaus kann man die Ergebnisse als Source Distribution Image (SDI) Methode interpretieren, die eine ungleichmäßige Verteilung der Anregungsquelle an der Oberfläche des Prüfkörpers aufzeigt. Eine so erhaltene SDI ist physikalisch begründet und benötigt keine manuelle Angabe der Anzahl von iso-levels. Für den ersten Test dieser Methode Thermal Shock Response Spectrum (TSRS), verwenden wir die Analogie zu einem single-degree-of-freedom (SDOF) mechanischen System. Wir betrachten ein eindimensionales thermisches Einschicht Model, dessen Lösung im Frequenzbereich bei Anwendung der Green'schen Funktion detailliert beschrieben ist.

1. Einführung

Lösungen der Wärmeübertragungsgleichung

$$\nabla^2 T(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial t} T(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{\lambda} q(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

mit der Temperaturleitfähigkeit α , der Wärmeleitfähigkeit λ , der Zeit t , der Temperatur T , dem Quellenterm q und dem Ortsvektor \mathbf{r} finden sich in [1], [2]

Zwei weitverbreitete Methoden zur Beschreibung der Wärmeübertragung in mehrschichtigen Verbundwerkstoffen sind der sogenannte thermische Quadrupol Ansatz, bei dem die Laplace-Transformation auf die Zeitvariable angewendet wird und damit das Problem der Suche nach einer Lösung der Differentialgleichung auf die Lösung einfacher linearer algebraischer Gleichungen vereinfacht wird [3]. Ein Beispiel hierfür ist die Methode



Differential Absolute Contrast (DAC) und deren Modifikationen [4]. Die zweite Methode basiert auf der Separation der Variablen Zeit und Raum und der Anwendung von Greens Funktion mit anschließender Fourier Transformation [5]. Damit kann die thermische Übertragungsfunktion zwischen der Vorder- und Rückseite eines einschichtigen thermischen Modells eines Verbundwerkstoffs im Frequenzraum berechnet und anschließend in den z-Raum überführt werden, der ähnlich wie die Laplace-Transformation bei kontinuierlichen Systemen eine leistungsfähige Methode zur Beschreibung und Lösung diskreter Signale und Systemen bietet. [6].

2. Methodologie und Prüfkörpern

2.1 Shock Response Spectrum (SRS)

Die Ermittlung des Shock Response Spectrum (SRS) einer Struktur wurde in den frühen 1960er Jahren entwickelt und galt als Standard-Signalverarbeitungsverfahren [7], standardisiert durch die ISO 18431-4 [8]. Es findet Anwendung in verschiedenen Bereichen (Luftfahrt, Verteidigung, Erbebenuntersuchungen etc.) [9]. Die Grundidee dabei ist die Untersuchung der mechanischen Antwort eines Systems auf einen äußeren Shock. Die Struktur wird dabei durch eine Anzahl von SDOF Oszillatoren mit verschiedenen Eigenfrequenzen, die alle an einer gemeinsamen Basis befestigt sind abgebildet (Abb.1).

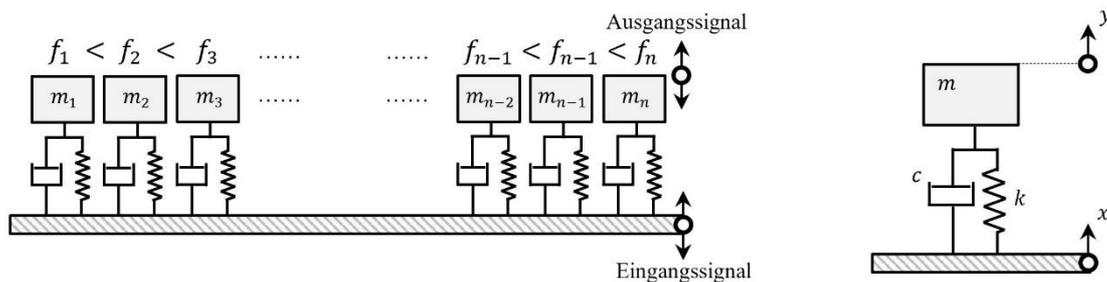


Abb. 1. System von SDOF Oszillatoren mit gemeinsamer Basis (links) und ein einzelner SDOF Oszillator (rechts)

Jeder SDOF-Oszillator wird durch seine Eigenfrequenz (f_{n_i}) und sein Dämpfungsmaß charakterisiert. Dieses wird durch die Resonanzschärfe (Q) oder den Dämpfungsfaktor (ξ) beschrieben, die über die Formel $Q = 1/(2\xi)$ zusammen hängen. Für mechanische Systeme wird in der ISO 18431-4 empfohlen, die Resonanzschärfe für alle SDOF-s konstant auf 10 einzustellen, was einem Dämpfungsfaktor 5% bzw. einer Resonanzverstärkung eines leicht gedämpften Systems entspricht. Die Antwort eines solchen Systems auf einen äußeren Schock wird in Form eines Diagramms dargestellt und wird als Shock Response Spektrum bezeichnet. Sehr oft untersucht man diese SRS-Kurve auf max. oder min Werte welche zum Vergleich oder für Beschreibung der untersuchten Strukturen herangezogen werden. Formel (3) ist die Bewegungsgleichung eines einzelnen SDOF Oszillators aus Abb.1

$$m\ddot{y} = -c(\dot{y} - \dot{x}) - k(y - x) \quad (2)$$

Die entsprechende Übertragungsfunktion im der Laplace Raum kann wie folgt geschrieben werden [8]

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{\omega_n s}{Q} + \omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n s}{Q} + \omega_n^2} \quad (3)$$

mit der Eigenkreisfrequenz $\omega_n = 2\pi f_n$. Zu beachten ist, dass die Signale immer diskret abgetastet werden und deswegen eine kontinuierliche Lösung in eine diskrete transformiert und gelöst werden muss. Dabei können Verzerrungen der Frequenzachse stattfinden, weil dieser Übergang nichtlinear ist [10]. Es existieren verschiedene Methoden die SRS-Kurve zu berechnen [9], [11]. Weitverbreitet ist es, die entsprechende kontinuierliche Übertragungsfunktion durch einen diskreten rekursiven digitalen Filter bzw. einen Infinite Impulse Response Filter (IIR-Filter) anzunähern [7], [12]. Kurz zusammengefasst: SRS beschreibt die zu untersuchende Struktur durch eine Menge von SDOF Systemen mit unterschiedlicher Eigenfrequenz und gleichem Dämpfungs-faktor. Die SRS Kurve setzt sich aus den Maximalwerten der Reaktionen der SDOFs auf das aufgezeichnete Signal beim Versuch als Eingangssignal zusammen. Verglichen zu andern Methoden, welche die Impulsform bei der Berechnung bzw. Reproduktion mitberücksichtigen, stellt SRS eine allgemeinere Betrachtungsweise dar, auch wenn im Vergleich zur Fouriertransformation ein Informationsverlust auftreten kann [13] und liefert bessere Ergebnisse beim Vergleich verschiedener Schockarten auf das System [8].

2.2 Infinite Impulse Response Filter (IIR-Filter)

IIR-Filter sind rekursive Filter in der Signalbearbeitung. Allgemein können verschiedenste Übertragungsfunktionen in IIR-Filterstrukturen realisiert werden. Die Übertragungsfunktion eines diskreten linearen zeitinvarianten Systems (LTI-System) erhält man wie folgt durch die z-Transformation [6]

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{m=0}^M b_m z^{-m}}{\sum_{n=0}^N a_n z^{-n}} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_N z^{-N}} \quad (4)$$

wobei $M, N \in \mathbb{N}$. Die Ordnung des Filters wird durch die Rückführungsterme M bestimmt und darf für kausale, diskrete LTI-Systeme höchstens gleich dem Nennergrad N sein ($M \leq N$). Sehr oft werden bei der Realisierung von IIR-Filtern die Koeffizienten a_n normiert, so dass $a_0 = 1$.

2.3 Source Distribution Image (SDI)

Als Alternative zur Auswahl von defektfreien Referenzbereichen zur Kontrastberechnung kann die Source Distribution Image Methode (SDI) angewendet werden [14], um eine ungleichmäßige Erwärmung der Prüfkörperoberfläche zu identifizieren und bei der weiteren Datenbearbeitung zu berücksichtigen. Um die Probenoberfläche in Bereiche einzuteilen, die einen annäherungsweise gleichen thermischen Schock von der Wärmequelle erfahren haben, werden die ersten drei Thermogramme nach der Sättigungsphase betrachtet. Dabei werden pixelweise Temperaturmittelwerte berechnet. Die dabei erhaltene gesamte Spanne von SDI-Werten wird nach benötigtem Genauigkeitsgrad in Bereiche aufgeteilt.

2.4 Specimens und Prüfstand

Zwei verschiedene Prüfkörper wurden untersucht. Eine homogene Platte aus ca. 4 mm dickem PVC mit sechs Sacklochbohrungen mit 15mm Durchmesser und verschiedenen Tiefen (s. Abb.2 (rechts)). Die glänzende Oberfläche wurde auf der zu prüfenden Seite mit

schwarzem Kreidespray dünn beschichtet, um die Absorption zu erhöhen und gleichzeitig die Reflektionen zu verringern. Die zweite Probe war eine CFK-Platte aus Preprag (CYCOM 977-2 (Solvay)) mit, für die Luftfahrt typischer [15] multidirektionaler Anordnung von 13 Lagen $(45/-45/45/-45/90/0/90)_s$ und einer Dicke von 1,7 mm. Als künstliche Defekte wurden kreis- und quadratförmige Folienstücke aus Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen Copolymer (FEP) mit mit nominaler Dicke von 20 μm und unterschiedlicher Größen zwischen den Schichten eingebracht. Anordnung und Position sind in Abb. 2 (links) dargestellt [16].

Die IRT Versuche wurden mit einer IR-Kamera IR 9410 BIS (InfraTec GmbH, Dresden, Germany) und Xenon Blitzlampe (Hensel VH3-6000) mit max. 6kJ elektrischer Energie durchgeführt. Der Pre-Trigger wurde auf 0,1 s und die Abtastrate der Kamera auf $f_s = 180 \text{ Hz}$ bei der CFK-Platte und auf $f_s = 90 \text{ Hz}$ bei der PVC-Platte eingestellt. Um die Überlagerung von Störstrahlung und dadurch eine Verfälschung des Phasengangs zu verringern, wurde ein 9,27mm dicker PMMA (Polymethylmethacrylat)-Filter vor der Blitzlampe befestigt [17].

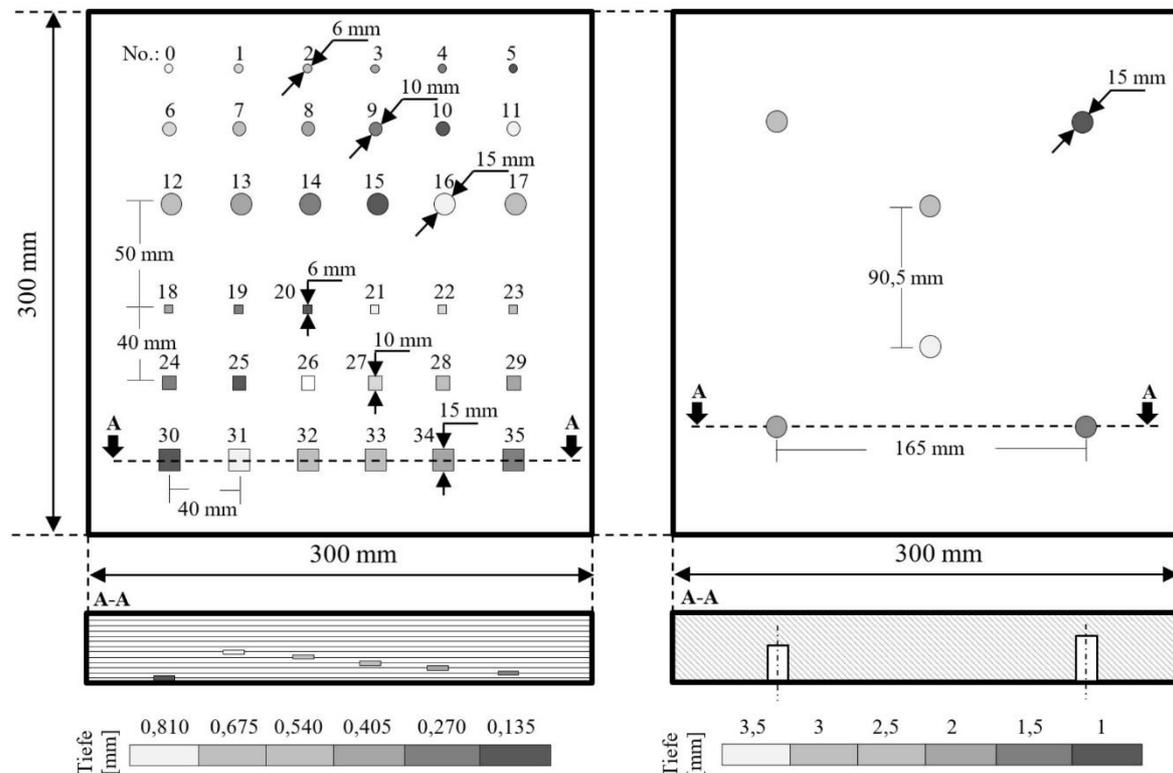


Abb. 2. Grafische Darstellung der Proben (CFK-Platte links und PVC-Platte rechts) mit entsprechenden Tiefen-, Größen-, Formangaben und Nummerierung der künstlichen Defekte und ROI (Region Of Interest).

2.5 Thermal Shock Response Spectrum (TSRS)

Zur Verdeutlichung der Analogie zwischen mechanischer und thermischer Shock Response Spectrum Methode sind in (Tabelle. 1) die einander entsprechenden mechanischen und thermischen Größen wiedergegeben. Eine weitere wichtige Größe ist die Analogie für den Dämpfungs- bzw. Q-Faktor. Für mechanische Systeme bzw. Resonatoren werden zwei weitverbreitete Definitionen benutzt, um den Q-Faktor zu definieren. Einmal über die gespeicherte Energie oder zum anderen über die Bandbreite der Resonanz. Im ersten Fall wird Verhältnis der im System gespeicherten Energie zum Verlust pro Schwingungsperiode

betrachtet. Im zweiten Fall das Verhältnis der Resonanzfrequenz des Systems zur Halbwertsbreite (Full Width at Half Maximum (FWHM)).

Tab. 1. Analogien zwischen mechanischen und thermischen Größen linearer zeitinvarianter Systeme

System	Potenzial (-abfall)	Strom	Widerstand	Energie Speicher
Mechanische (linear)	Kraft F	Geschwindigkeit $\frac{dx}{dt}$	Dämpfungsparameter c	Steifigkeit k
Thermische	Temperaturdifferenz ΔT	Wärmestrom $\frac{dQ}{dt}$	Wärmewiderstand $\frac{\Delta T}{\dot{Q}}$	Wärmekapazität C

Das in Abbildung 3 dargestellte thermische 1-Schicht Model dient als Analogiemodel zum mechanischen SDOF Oszillator. Die eindimensionale Lösung für einen thermisch opaken Verbundwerkstoffs mit dem Wärmefluss $\frac{1}{2}Q_0(1 + e^{i\omega t})$ an der Oberfläche ($x = 0$) und Annahme von Randbedingungen der dritten Art an den äußeren zwei Grenzen (Kontaktfläche zwischen Solid und Fluid) ist im Frequenzbereich durch $\Theta(x, \omega)$, als Fouriertransformierte von $T(x, t)$ gegeben [5].

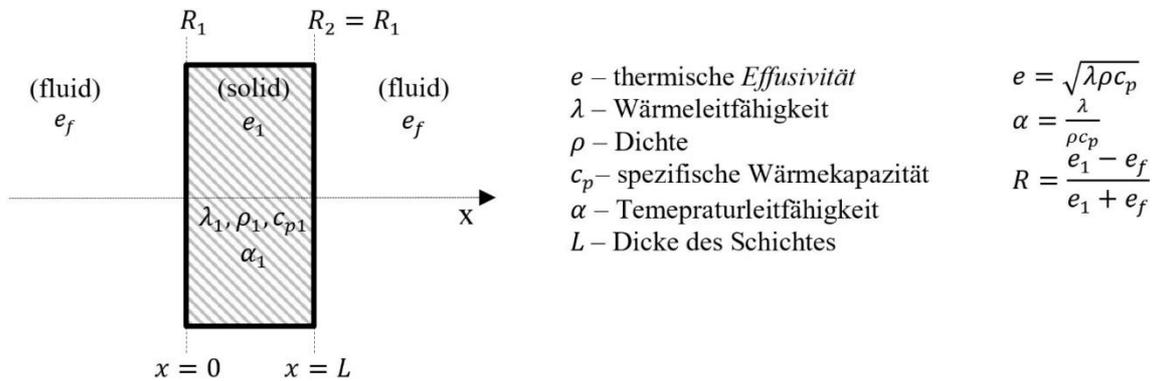


Abb. 3. Thermisches 1-Schicht Model mit relevanten physikalischen Größen

Mit Hilfe dieser Lösung kann man die Transferfunktion $H(\omega)$ im Frequenzbereich berechnen. Die Übertragungsfunktion $H(z)$ in der z -Ebene erhält man durch mathematische Umformung und Substitution von $\omega \rightarrow \Omega$, unter Beibehaltung der nichtlinearen Beziehung zwischen diesen zwei Variablen (6) [10].

$$\Omega = 2 \arctan\left(\frac{\omega T_s}{2}\right) \quad (5)$$

Die Übertragungsfunktion $H(z)$ lässt sich für das 1-Schicht Model wie folgt ausdrücken

$$H(z) = \frac{B \cdot z^{-M}}{1 + A \cdot z^{-2M}} \quad (6)$$

$$\text{mit } B := (1 + R_1)e^{-Q} \quad A := R_1e^{-2Q} \quad M := \frac{Q}{\Omega} \quad (7)$$

Dabei muss M immer ganzzahlig sein, damit die Übertragungsfunktion, wie oben gezeigt durch ein IIR-Filter dargestellt werden kann. Dies führt zu diskreten Wertepaaren von (Q, ω) bzw. (Q, Ω) . Im Vergleich zum mechanischen System sind alle Filterkoeffizienten b_0, \dots, b_{M-1} und a_1, \dots, a_{2M-1} gleich Null. Der Wärmeübertragungskoeffizient der thermischen Welle an beiden Oberflächen zwischen Probe und Umgebungsfluid kann für polymere Verbundwerkstoffe und Luft kann mit $R_1 = 0.98$ angenommen werden. Damit wird die Transferfunktion unabhängig von Materialparametern.

Für die Einführung eines thermischen Q-Faktors kann die thermische Diffusionslänge μ herangezogen werden. Aus der analytischen Lösung des eindimensionalen Fourier Wärmeleitungsgesetz folgt

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (8)$$

Die Diffusionslänge beschreibt mathematisch die Tiefe, in der die Anfangsamplitude der thermischen Welle um das e -fache abgenommen hat. Anders formuliert: die Tiefe, in der noch spürbare Energieübertragung stattfindet. Für das oben dargestellte 1-Schicht-Modell kann somit ein Q-Faktor

$$\frac{L}{\mu} := Q \quad (9)$$

definiert werden. Da bei typischen IRT Versuchen die Information über die innere Struktur des Bauteils durch die Detektion von Kontrasten der Änderungen der Oberflächentemperatur zwischen defekt-behafteten und defektfreien Bereichen stattfindet, muss der Q-Faktor so gewählt werden, dass die, an etwaigen Defekten reflektierte thermische Welle an der Bauteiloberfläche noch ausreichend detektiert werden kann. Durch Variation der Kreisfrequenz ω bei konstantem Q-Faktor ist es theoretisch immer möglich ein passendes 1-Schicht Model zu finden, welches die Probe an der untersuchten Stelle repräsentiert. An dieser Stelle tritt ein weiterer Unterschied auf: Der Verlauf des Temperatursignals ist nach dem Versuch für jeden Pixel unterschiedlich. Mit der passenden Auswahl eines (Q, ω) - bzw. (Q, Ω) -Paares kann bereits der der gesuchte Kontrast zwischen Defekt- und Referenzbereich detektiert werden, ohne die Frequenz zu variieren. Durch die Anwendung eines kaskadierten Butterworth-Bandpassfilters zweiter Ordnung konnte die Empfindlichkeit der Methode deutlich gesteigert werden. Eine weitere Steigerung der Kontraste kann erreicht werden, wenn als Input Signal für jeden Pixel an Stelle des Temperaturverlaufs analog zum mech. SRS Verfahren die Geschwindigkeit oder die Beschleunigung der Temperaturänderung verwendet wird.

Der Auswertalgorithmus wurde in einer Python-Umgebung realisiert und durch Variation von (Q, Ω) -Paaren der Einfluss auf das Ergebnis untersucht. Der Verlauf der Oberflächentemperatur der Proben wurde pixelweise analysiert und das resultierende max-SRS, min-SRS Bild und deren Differenz aufgetragen.

3. Ergebnisse und Diskussion

Wie erwartet bei der Auswahl von Q-Faktor soll man genug klein eingeben, um die Reflektionen und damit genüge Einwirkung am Oberfläche bei der 1-Schicht-Modelle zu gewährleisten. Erfahrungsgemäß wurde die Methodologie bzw. Filter zusätzlich erweitert, indem eine Kaskade-Anwendung von eingeführte und Butterworth-Bandpassfilter zweiter Ordnung realisiert wurde. Als Input Signal bei jedem Pixel kann man statt den Temperaturverlauf analog zu mech. SRS Verfahren die Geschwindigkeit oder Beschleunigung der Temperaturänderung angeben. Solche Vorgehensweise verschärft die Kontraste in den Ergebnissen. In Abbildung 4 sind zwei repräsentative Ergebnisse je Prüfkörper gezeigt.

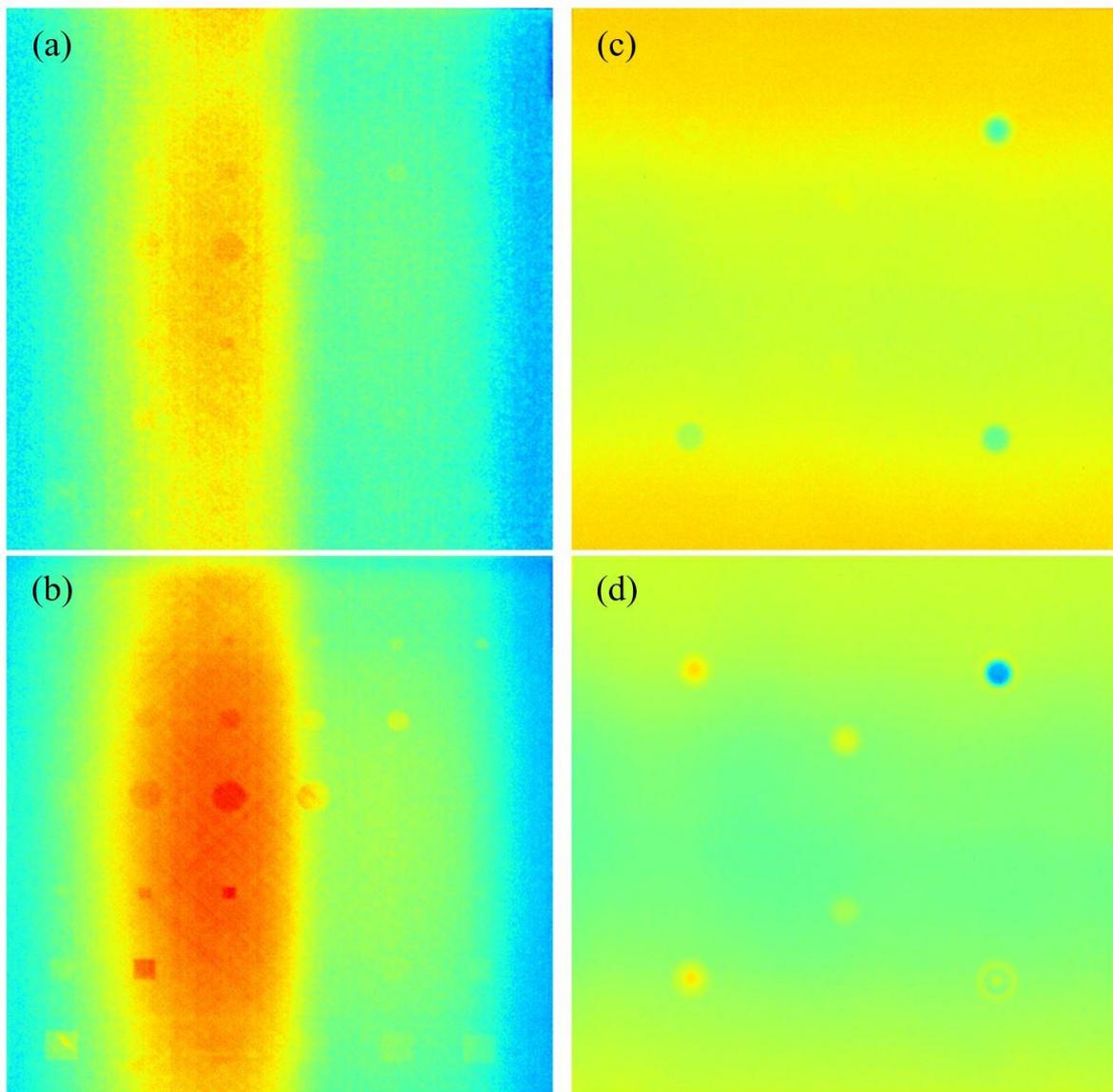


Abb. 4. Links (a) und (b) sind max. von thermischen Shock Response von CFK-Platte und auf rechte Seite (c) und (d) absolute Differenz zwischen max. und min. für CFK-Platte dargestellt. Dabei eingestellte (Q, ω) -Paare sind: (a) - (0.2,0.01) ; (b) - (0.05,0.01) ; (c) - (0.2,0.005) ; (d) - (0.5,0.005)

4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf Basis der analytischen Lösung eines thermischen 1-Schicht Modells ein Verfahren zur Auswertung von IRT-Versuchen analog zur mechanischen Sock Response Spectrum Methode aufgebaut und an IRT Versuchsdaten angewendet. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die vorgeschlagene Methode als alternative zur Verarbeitung von IRT angewendet werden kann. Es wurde dabei ein, zu mechanischen Dämpfungsfaktor bzw. Q -Faktor ein thermischer Q -Faktor eingeführt. Zum mechanischen SRS Verfahren wurde ein Unterschied identifiziert. Durch die (Q, ω) -Kopplung, können nur diskrete Paare untersucht werden. Nichtsdestotrotz kann für bestimmte Prüfkörper sehr schnell ein passendes Paar gefunden und damit die Kontraste zwischen defektbehafteten und defektfreien erzeugt werden. Zukünftig sollen weitere Untersuchungen vorgenommen werden, um die Methode zu verbessern bzw. zu erweitern. Zum Beispiel soll der thermische Q -Faktor von der Frequenz entkoppelt werden oder als Grundlage ein mehrschichtiges thermisches Model verwendet werden.

Referenzen

- [1] B. Straughan, Heat Waves, Applied Mathematical Sciences 177, DOI 10.1007/978-1-4614-0493-4_1, Springer Science+Business Media, LLC 2011
- [2] Ernesto Marin Moares, Thermal Wave Physics and Related Photothermal Techniques: Basic Principles and Recent Developments, 1-27 ISBN: 978-81-7895-401-1, 2009
- [3] Mailliet, Denis & André, Stéphane & Batsale, Jean-Christophe & Degiovanni, Alain & Moyne, Christian. (2000). Thermal Quadrupoles, Solving the heat equation through integral transforms.
- [4] Benitez, Hernan & Maldague, Xavier & Ibarra-Castanedo, Clemente & Loaiza-Correa, Humberto & Bendada, Abdelhakim & Caicedo Bravo, Eduardo. (2006). Modified Differential Absolute Contrast using Thermal Quadrupoles for the Nondestructive Testing of Finite Thickness Specimens by Infrared Thermography. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 1039 - 1042. 10.1109/CCECE.2006.277741.
- [5] Mandelis, Andreas. (2001). Diffusion-Wave Fields. 10.1007/978-1-4757-3548-2.
- [6] Ulrich, Helmut & Ulrich, Stephan. (2022) Laplace-Transformation, Diskrete Fourier-Transformation und z-Transformation: Grundlagen und Anwendungen zu Elektrotechnik, Informatik, Kommunikations- und Regelungstechnik. Springer Vieweg Wiesbaden. ISBN 978-3-658-31876-5
- [7] Tůma, Jiří & Koci, Petr. (2011). Calculation of a Shock Response Spectra. Acta Montanistica Slovaca. 16. 10.1109/CarpathianCC.2011.5945889.
- [8] ISO 18431-4 Mechanical vibration and shock — Signal processing — Part 4: Shock response spectrum analysis
- [9] Wenjuan, Sun & Su, Qiaoping & Yuan, Hongli & Liu, Liqin. (2020). Calculation and Characteristic Analysis on Different Types of Shock Response Spectrum. Journal of Physics: Conference Series. 1676. 012236. 10.1088/1742-6596/1676/1/012236.
- [10] Oppenheim, Alen & Schafer, Ronald. (1999) Zeitdiskrete Signalverarbeitung. R. Oldenbourg Verlag München Wien.
- [11] Smallwood, David O. An improved recursive formula for calculating shock response spectra. Shock and vibration bulletin 51.2 (1981): 211-217
- [12] Brandt, Anders. (2010) Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-74644-8
- [13] Zola, Maurizio. The relationship between shock response spectrum and fast Fourier transform. IAEA: N. p., 2001. Web.
- [14] Susa, Mirela & Maldague, X. & Boras, Ivanka. (2010). Improved method for absolute thermal contrast evaluation using Source Distribution Image (SDI). Infrared Physics & Technology. 53. 197-203. 10.1016/j.infrared.2009.11.008.
- [15] Hannemann B. Multifunctional metal-carbon-fibre composites for damage tolerant and electrically conductive lightweight structures, In: IVW-Schriftenreihe, Als Manuskript gedruckt ed.. (Band 128). Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH; 2018.
- [16] Popow, Vitalij & Gurka, Martin. (2020). Full factorial analysis of the accuracy of automated quantification of hidden defects in an anisotropic carbon fibre reinforced composite shell using pulse phase thermography ☆. NDT & E International. 116. 102359. 10.1016/j.ndteint.2020.102359.

- [17] Philipp Myrach, Christiane Maierhofer, Mercedes Reischel, Markus Rahammer, Niels Holtmann. Untersuchung der Auflösungsgrenzen der Lockin-Thermografie zur Prüfung von Faserverbundwerkstoffen. DGZfP-Jahrestagung 2014 – Di.3.C.3