

PoD der Resonanten Frequenzsweep Thermografie für Flachbodenbohrungen und Impact-Schäden

Markus RAHAMMER¹, Marc KREUTZBRUCK¹

¹ Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart

Kontakt E-Mail: markus.rahammer@ikt.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. Die Resonante Frequenzsweep Thermografie (RFST) basiert auf dem Prinzip der lokalen Defektresonanz (LDR) in Verbindung mit der bekannten Ultraschall-angeregten Thermografie. Lokale Defektresonanzen treten immer dort auf, wo ein Bauteil lokal aufgrund eines Defektes geschwächt wird. Dieser Bereich besitzt dann eigene, sehr viel höhere Resonanzfrequenzen und kann mit diesen sehr effizient angeregt werden. Dies führt zu einer energieeffizienten Ultraschallthermografie mit einfachen Anregungsquellen. Da jedoch Defektresonanzfrequenzen üblicherweise unbekannt sind, muss breitbandig angeregt werden. Während eines langsamen Frequenzsweeps im unteren und mittleren Kiloherzbereich, werden Defekte sobald ihre Resonanzfrequenz erreicht wird angeregt und die thermische Antwort aufgrund von Rissuferreibung oder viskoelastischer Erwärmung an der Oberfläche von einer Thermografiekamera detektiert. Trotz der sehr niedrigen integralen Wärme können mithilfe einer Fourier-Filterung Defekte mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis detektiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die RFST auf eine Vielzahl von Flachbodenbohrungen in PMMA und Impactschäden in CFK angewendet. Dabei variiert bei ersten sowohl der Radius als auch die Ligamentdicke, während letztere sich durch Impact-Energie bzw. Schadensfläche unterscheiden. Aufgrund der großen Anzahl an Prüfkörpern konnte eine Probability of Detection (PoD) Analyse durchgeführt und das Verfahren RFST somit validiert werden.

1. Einführung

Ultraschallverfahren (UT) gehören zu den führenden und meistbekanntesten zerstörungsfreien Prüfmethode. Dies liegt nicht zuletzt an den einfachen und zuverlässigen Technologien, Ultraschall zu generieren und zu detektieren, während die dafür nötigen Gerätschaften vergleichsweise günstig sind. Die Ultraschallthermografie (UTT) grenzt sich stark von den üblichen UT Verfahren durch ihr spezielles Equipment ab. Traditionell werden leistungsstarke Ultraschall-Kunststoff-Schweißanlagen verwendet, welche bei fixen Frequenzen von üblicherweise 20 kHz oder 40 kHz arbeiten und dabei mehrere kW elektrische Leistung aufnehmen können [1]. Dem Prüfkörper wird dabei der Ultraschallgeber (Sonotrode + Booster +Horn) mit Kräften im kN-Bereich aufgepresst (Bild 1), um die Kontaktverluste zu minimieren, was zu nicht-reproduzierbaren Messungen führen kann. Die niedrige Umwandlungseffizienz (ca. -20 dB) von elektrischer Leistung in akustische wird üblicherweise in Kauf genommen, da genügend Eingangsleistung zur Verfügung steht.



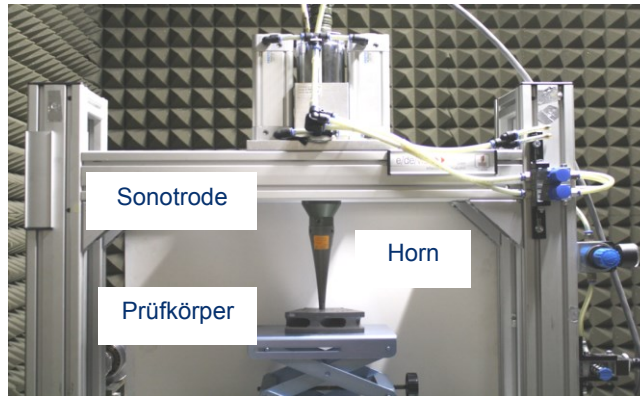


Bild 1: Messaufbau Ultraschallthermografie

Um den Anwendungsbereich der UTT zu erweitern ist es notwendig, weniger sperriges und leistungshungriges Equipment einsetzen zu können – idealerweise gewöhnliche Standard-Ultraschallgeber. Hieraus leitet sich die grundlegende Aufgabe ab, die Möglichkeiten einer Niedrigenergieanregung für die Ultraschallthermografie zu erforschen.

In diesem Beitrag wird die resonante Frequenzsweep Thermografie (RFST) [2] vorgestellt, worin die Ultraschallaktivierung mithilfe des Prinzips der Lokalen Defektresonanz (LDR) [3] optimiert wird. Die LDR bietet eine selektive und effiziente Anregung der Defektfläche, indem die gesamte Ultraschallenergie in den Defekt gepumpt wird. Die niedrige eingesetzte Anregungsenergie von wenigen Watt reicht aus, um Defekte mittels Thermografie zu detektieren. Anhand einer POD-Analyse wird dies schließlich quantifiziert.

2. Stand der Technik

2.1. Prinzip und Nachweis der lokalen Defektresonanz

Das Prinzip der LDR besagt, dass jeder Defekt zu einer Steifigkeitsreduzierung einer lokal begrenzten Masse und Geometrie führt. Dieser Defekt muss daher spezielle, eigene Eigenfrequenzen haben. Regt man das Bauteil mit genau diesen Frequenzen an, schwingt nur der Defekt respektive das umschließende Material. Dies führt zu einer sehr hohen Defektselektivität und einer sehr geringen Leistungsaufnahme, da die zu bewegende Masse sehr gering ist. Für eine simple Flachbodenbohrung, welche als fest eingespannte, schwingende Platte modelliert werden kann, wurde die folgende Beziehung hergeleitet [4]:

$$f_0 \approx \frac{1,6h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

Sie bringt die Defekteigenfrequenz f_0 mit den Materialkennwerten Dichte und Steifigkeit, sowie den Geometriedaten Plattenhöhe h und Plattenradius R in Zusammenhang. Die vorgestellte Beziehung ist ein stark vereinfachter Ansatz für die einfachste mögliche Geometrie, welche nichtsdestotrotz die grundlegende Physik und Gedanken erklärt. Der Ausdruck in (1) dient der Berechnung der Grundfrequenzen von Flachbodenbohrungen, aber auch ähnlichen Defekten in Metallen oder Faserkunststoffverbunden, wie z. B. Ablösungen oder Delaminationen. Die LDR eignet sich, um das Defektsignal der Ultraschallthermografie zu verstärken, wie in [5, 6] gezeigt wurde.

2.2. Resonante Frequenzsweep Thermografie (RFST)

Das Prinzip der RFST wurde erstmals in [2] erläutert. Da Defekte meistens unbekannt sind, ist die Detektion aufgrund seiner lokalen Defektresonanz mittels Laser Scanning Vibrometrie äußerst zeitaufwendig (mehrere Minuten) und kostspielig. Eine breitbandige Anregung, welche die Defektresonanzfrequenz(en) enthält wäre wünschenswert. Der kontinuierliche Sweep ist ein Spezialfall des allgemein bekannten Chirps mit einer sehr geringen Modulationsfrequenz. Wenn das Frequenzband langsam genug durchfahren wird, eröffnet sich die Möglichkeit Defektresonanzen live zu beobachten. Bild 2 (links) zeigt schematisch einen typischen linearen Frequenzsweep. Die Amplitudenresonanzkurve eines Defektes folgt immer einer breiten, nicht spitzen Verteilung, wie sie in Bild 2 (Mitte) dargestellt ist. Im Vorliegenden Fall liegt die Resonanzfrequenz genau in der Mitte des Anregungsbandes und erscheint nach der Hälfte der Sweepzeit. Die zugehörige thermische Defektantwort ist in Bild 2 (rechts) illustriert. Unter Vernachlässigung von Strahlungs- und Konvektionsverlusten ist die Wärmemenge proportional zum Integral über der Frequenzantwort. Der Zeitpunkt der stärksten Schwingungsamplitude entspricht dann dem stärksten Gradienten in der Temperatur-Zeit-Kurve.

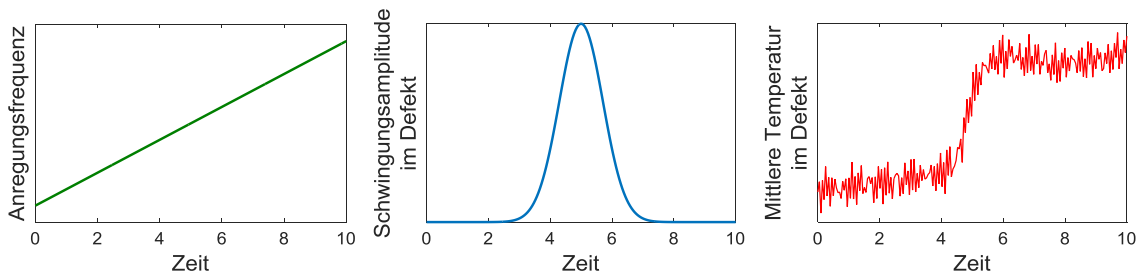


Bild 2: Schematische Darstellung eines Frequenzsweeps (links) und der zugehörigen akustischen (Mitte) und thermischen (rechts) Defektantwort

Wiederholt man ein Sweepanregungssignal der Dauer τ , erhält man ein periodisches Temperatursignal mit der Frequenz $1/\tau$. Ein solches Signal ist in Bild 3 (links) dargestellt. Die Periodizität kann mittels einer Fourieranalyse nachgewiesen werden. Da sich das Signal innerhalb von 40 s viermal wiederholt, ist die am stärksten auftretende Frequenz 0,1 Hz, wie Bild 3 (rechts) beweist.

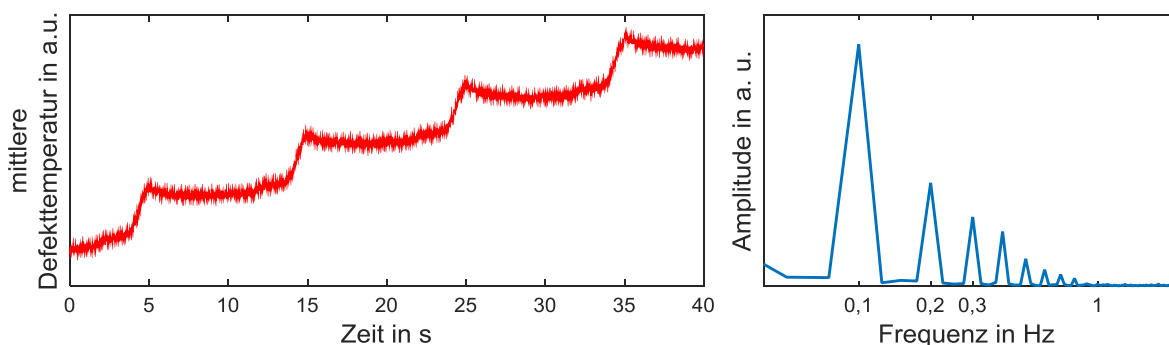


Bild 3: Periodisches Temperatursignal aufgrund wiederholter Defektaktivierung (links) und zugehörige Fourieranalyse (rechts)

Daraus folgt, dass eine Auswertung der Ultraschallthermografie mit periodischer Sweepanregung mittels Diskreter Fouriertransformation nach dem Lockin-Prinzip eine Verbesserung des SNR durch Schmalbandfilterung bewirkt.

Anhand eines CFK-Prüfkörpers mit Delaminationen wurde diese Methode erstmals validiert. Wie die Graphen in Bild 4 zeigen, unterscheiden sich die Frequenzantworten der beiden Defekte erheblich. Dies liegt an den unterschiedlichen Defektgeometrien. Da es reale Delaminationen sind, ist die Form der Defekte zufällig und unregelmäßig, welche mithilfe der Vibrometrie dargestellt werden können.

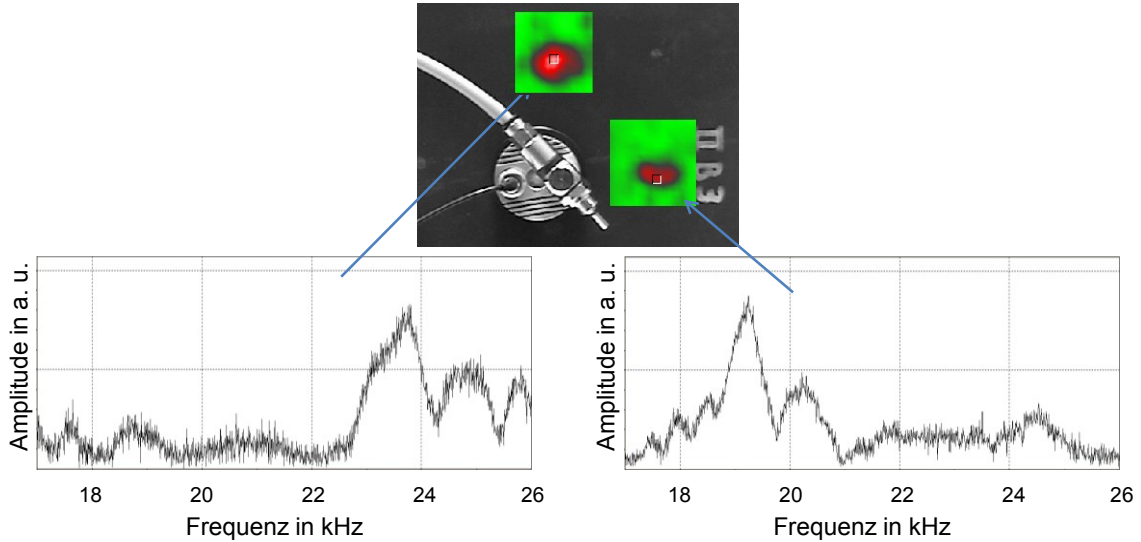


Bild 4: Laservibrometrie Messergebnis: Die Graphen oben und unten zeigen die Frequenzantwort für die mit jeweiligen Defekte

Trotz unbekannter Defektresonanzen, kann mit der oben beschriebenen Breitbandanregung eine Thermografieprüfung durchgeführt werden. Beide Defekte werden erkannt, wie Bild 5 zeigt.

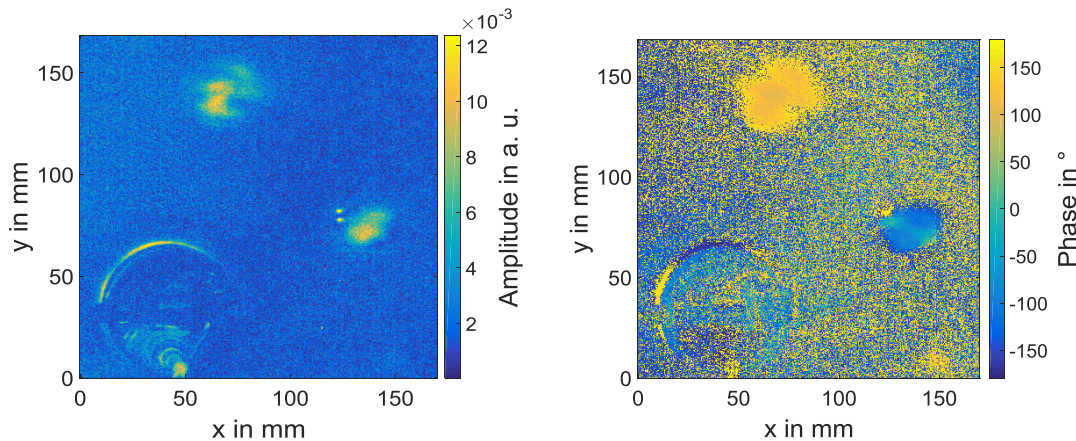


Bild 5: Amplitudenbild (links) und Phasenbild (rechts) nach FFT bei 0,1 Hz

Neben dem sehr eindeutigen Amplitudenbild enthüllt das Phasenbild (Bild 5, rechts) noch zusätzliche Informationen. Beide Defekte werden eindeutig angezeigt, unterscheiden sich jedoch im Phasenwinkel. Dies ist auf die unterschiedliche Phasenlage der Temperaturpeaks innerhalb des Anregungsspektrums zurückzuführen.

Für diese Messungen wurde eine Anregungsspannung von nur 50 V verwendet. Das Anregungssignal wurde zwischen 17 und 26 kHz über 10 s moduliert und dies dreimal wiederholt.

3. Experimentelles

3.1. Verwendete Prüfkörper

Da laut (1) die Resonanzfrequenz und die Schwingungsamplitude von den Flachbodenbohrungsparametern Ligament H und Radius R abhängen, wurden zwei 10 mm dicke PMMA-Platten mit je 50 solcher Bohrungen gefertigt. Die Bohrungen variierten in der Ligamenthöhe von 0,43 bis 3,8 mm und im Radius von 0,98 bis 19,99 mm. Diese jeweils 50 Bohrungen wurden anschließend mit je 18 unterschiedlichen Shaker-Positionen geprüft. Es entstanden somit insgesamt 900 SNR Werte je Platte. Ein exemplarisches Ergebnis ist in Bild 6 dargestellt. Die Anregungsspannung betrug 30 V AC, das Frequenzband 5–70 kHz und die Messdauer 2x 15 s.

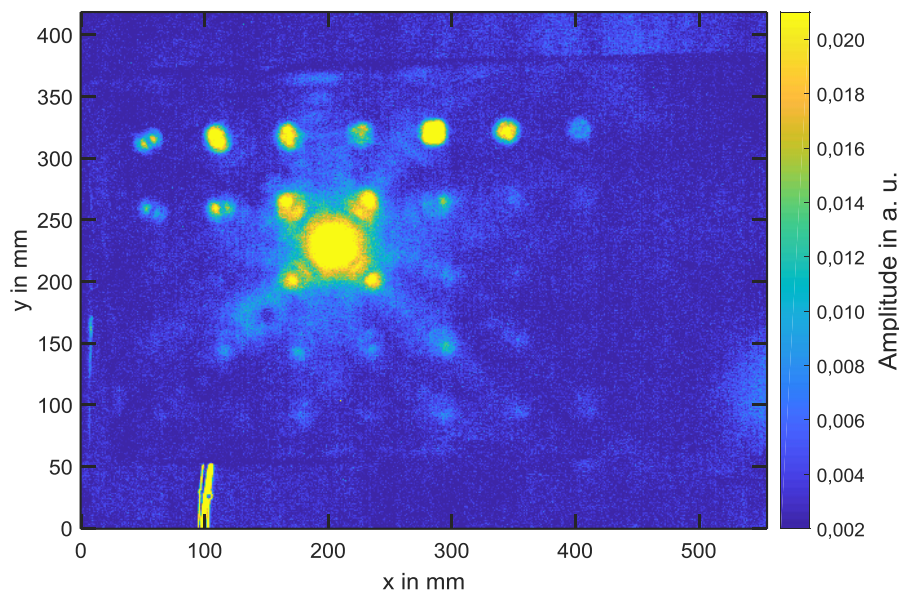


Bild 6: Exemplarisches Prüfergebnis (Amplitudenbild) einer Platte mit 50 Flachbodenbohrungen

Weiterhin standen 40 verschieden große Impactschäden in 3mm dickem CFK-Material zur Verfügung. Die Messdauer wurde aufgrund der hohen Dämpfung auf 2x 25 s erhöht. Die projizierten Schadensflächen der Impacts reichen von ca. 15 bis 1704 mm² und wurden mittels optisch angeregter Thermografie rückseitig bestimmt. Auch diese Bauteile wurden mit verschiedenen Shaker Positionen geprüft, so dass insgesamt 320 Messwerte zur Verfügung standen. Die Abstände der Shaker zu den Impacts reichten dabei von 38 bis 550 mm.

3.2. Berechnung der POD

Die POD wurde nach dem Prinzip der Bewertungsschwelle berechnet. Alternativ existiert auch die etwas einfachere Methode nach dem Hit-Miss-Prinzip. Das Prinzip sei in Bild 7 nochmals veranschaulicht.

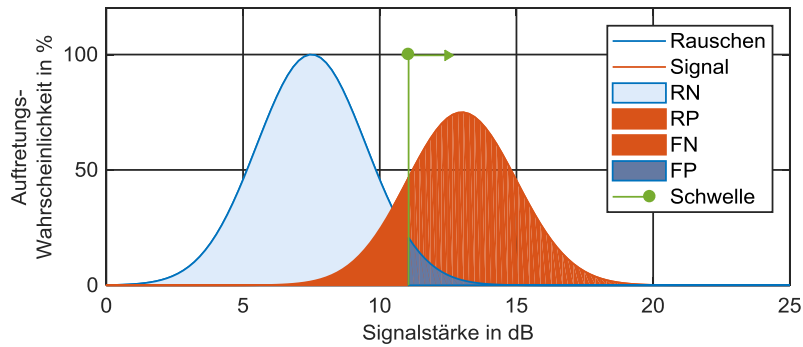


Bild 7: Prinzip der Bestimmung einer POD aufgrund einer Bewertungsschwelle

Man unterscheidet zwischen richtig negativ (RN), richtig positiv (RP), falsch negativ (FN) und falsch positiv (FP) erkannten Defekten. Die POD berechnet sich folglich aus den Flächen unter den Kurven zu

$$POD = \frac{RP}{RP + FN} \quad (2)$$

Aufgrund der hohen Streuung in den Defektkenngößen und deren Signalantworten, wurde der folgende zusätzliche Rechenschritt implementiert: Die Defekte werden entsprechend ihrer Größe in Defektgrößenintervalle eingeteilt und Normalverteilungen $\exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$ über die Defekte innerhalb der Intervalle gefittet. Dies ist in Bild 8 veranschaulicht.

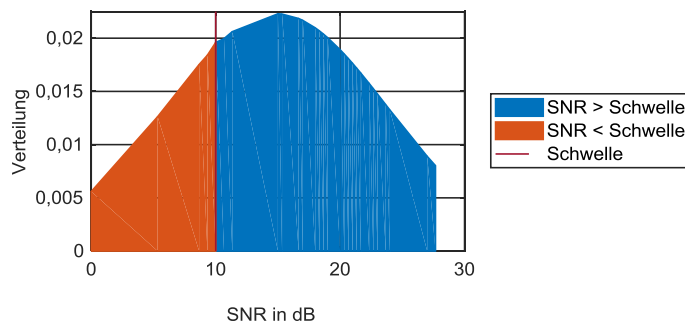


Bild 8: Gefittete Normalverteilung über eine diskrete Anzahl an SNR-Werten der Defekte in einem exemplarischen Defektgrößenintervall

Die Berechnungen werden sowohl für die Amplituden- als auch für die Phasenbilder durchgeführt und jeweils der höhere SNR-Wert der beiden für die Erstellung der Verteilungsfunktion genutzt. Als Defektkenngöße wird der Durchschnittswert aller Defekte eines Intervalls gewählt. Abschließend wird mittels Regression einer Verteilungsfunktion $1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)$ an die berechneten Wahrscheinlichkeitswerte eine POD-Kurve aufgestellt. Aufgrund des großen zusätzlichen Aufwandes wurde auf eine Bestimmung des $a_{90/95}$ -Wertes verzichtet, da hierzu mind. 30 Wiederholungen notwendig wären [7, 8].

4. Ergebnisse der POD

Vorversuche ergaben, dass sich 10 dB als Bewertungsschwelle sehr gut eignet. Bild 9 (links) zeigt die POD für Flachbodenbohrungen mit abnehmender Ligamenthöhe und konstantem Radius $r=10$ mm. Um eine vollständige POD-Kurve zu zeichnen fehlten Defekte mit noch größeren und noch kleineren Ligamenten. Letztere waren

fertigungsbedingt nicht möglich. Weiterhin ist der Einfluss der Anregungsspannung dargestellt. Wie zu erwarten nimmt die Detektionswahrscheinlichkeit mit der Spannung zu. Für 30 V beträgt der a_{90} -Wert 0,16 mm, für 60 V 1,24 mm.

Für den Bohrungsradius ergibt sich ein a_{90} von ca. 6,55 mm bei annähernd konstantem Ligament von $H=0,75 \pm 0,27$ mm. Senkt man die Bewertungsschwelle auf 5 statt 10 dB, sinkt der a_{90} -Wert auf 4,8 mm Radius. Wie Bild 9 (rechts) außerdem zeigt, sind die POD-Kurven auch von der gewählten Intervallbreite, also der Berechnungsmethode abhängig. Diese Intervalle sind jedoch notwendig, wie oben erklärt wurde.

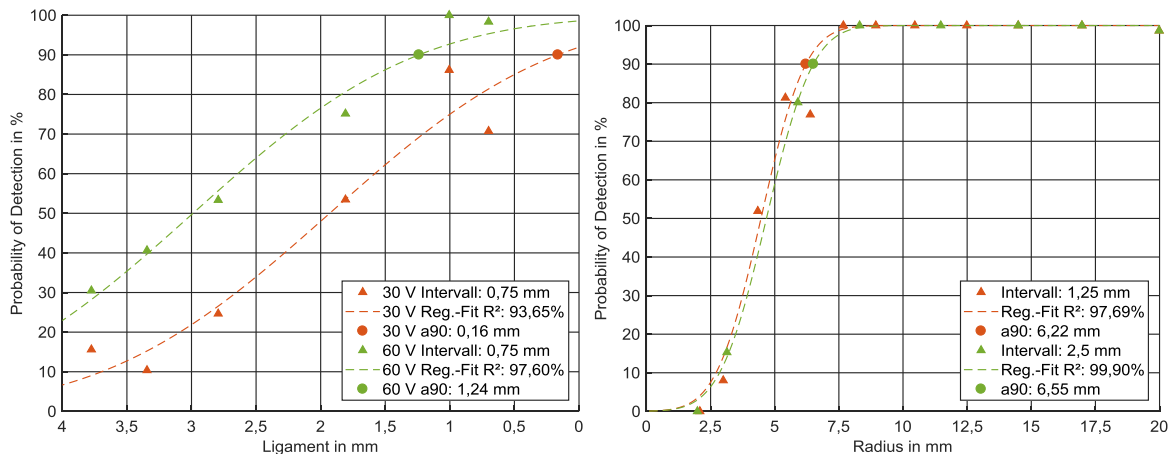


Bild 9: POD-Kurven für Flachbodenbohrungen in PMMA mittels RFST. Links: Variierende Ligamenthöhe, rechts: variierender Radius

Für die Impactschäden in CFK ergeben sich die POD-Kurven in Bild 10. Die Abbildung links zeigt, dass selbst kleinste Schäden noch mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% detektiert werden können. Einerseits zeigt dies die hohe Empfindlichkeit der RFST, andererseits konnte aber für keinen Defekt eine 100%ige Erkennungsrate erzielt werden. Diese Erkenntnisse führten zu einem Überdenken der gewählten Defektkenngroße. Bessere Ergebnisse lassen sich für den Shaker-Defekt-Abstand als Kenngröße erreichen. Dieser Parameter scheint einen sehr viel größeren Einfluss auf die Nachweisempfindlichkeit zu haben, als die Schadensgröße. Aus ihm lässt sich auf die maximale untersuchbare Prüffläche schließen.

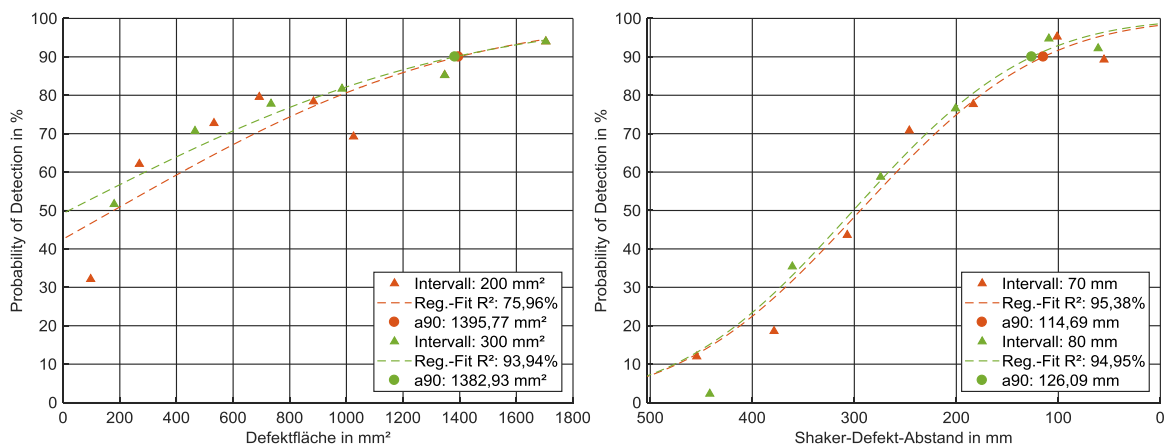


Bild 10: POD Kurven für Impactschäden in CFK aufgetragen über die Schadenfläche (links) und den Shaker-Defekt-Abstand (rechts)

5. Fazit

Die lokale Defektresonanz, welche die Schwingungsamplituden lokal im Defekt um ein Vielfaches verstärkt, bietet eine gute Möglichkeit, auch bei geringen Anregungsleistungen, ein messbares Temperatursignal im Defekt zu erzeugen. Bei unbekanntem Defekt und Defektresonanzfrequenzen bietet sich eine breitbandige Anregung an, z. B. in Form eines kontinuierlichen Frequenzsweeps an. Ist die Anregungsdauer lang genug, tritt an einem Defekt ein Temperatursprung auf. Dieser Indikator reicht aus, um eine Probe auf Defekte zu prüfen. Über die Phasenlage der Defekte lassen sich mittels der RFST zusätzliche Aussagen zur Geometrie der Defekte machen.

Mittels einer POD konnte die RFST für Flachbodenbohrungen in PMMA und Impacts in CFK validiert werden. Für die Bohrungen ergaben sich a_{90} -Werte von 0,16 mm Dicke bzw. 6,55 mm Radius. Die Werte fallen vergleichsweise schlecht aus, da über alle 18 Shaker-Defekt-Abstände gemittelt wurde. Einige der Abstände sind so groß, dass sie für die Prüfpraxis nicht relevant sind. Für die Schadensfläche in CFK konnte keine zufriedenstellende POD errechnet werden. Es ergibt sich zwar theoretisch ein Wert von $a_{90}=1383 \text{ mm}^2$, diese Defekte sind jedoch bereits mit dem bloßen Auge zu erkennen. Außerdem konnten keine 0%- und 100%-Wahrscheinlichkeiten gefunden werden. Als bestimmender Parameter konnte hingegen der Shaker-Defekt-Abstand identifiziert werden. Für eine Qualifizierung des Verfahrens für eine bestimmte Anwendung müsste eine POD für einen fixen, maximalen Shaker-Defekt-Abstand also eine maximale Prüffeldfläche durchgeführt werden.

Da Faserkunststoffverbunde prinzipiell sehr verschieden sind, müssen für weitere Werkstoffe und Prüfkörper POD-Studien durchgeführt werden, um ein sichereres Verständnis für die RFST zu erlangen.

6. Referenzen

- [1] MIGNOGNA, R.B., R.E. GREEN, J.C. DUKE, E.G. HENNEKE und K.L. REIFSNIDER. Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials. In: *Ultrasonics*, 1981, 19(4), 159IN1161-160IN2163
- [2] Rahammer, M. und M. Kreutzbruck. Fourier-transform vibrothermography with frequency sweep excitation utilizing local defect resonances. In: *NDT & E International*, 2017, 86, 83–88. Doi:10.1016/j.ndteint.2016.11.012
- [3] SOLODOV, I., J. BAI, S. BEKGULYAN und G. BUSSE. A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultrasonic non-destructive evaluation. In: *Applied Physics Letters*, 2011, 99(21), 211911. Doi:10.1063/1.3663872
- [4] SOLODOV, I., J. BAI und G. BUSSE. Resonant ultrasound spectroscopy of defects. Case study of flat-bottomed holes. In: *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(22), 223512. Doi:10.1063/1.4810926
- [5] SOLODOV, I., M. RAHAMMER, D. DERUSOVA und G. BUSSE. Highly-efficient and noncontact vibrothermography via local defect resonance. In: *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2015, 12(1), 98–111
- [6] SOLODOV, I., D. DERUSOVA und M. RAHAMMER. Thermosonic Chladni figures for defect-selective imaging. In: *Ultrasonics*, 2015, 60, 1–5
- [7] Georgiou, G. Probability of detection (PoD) curves. Derivation, applications and limitations. In: *Health and Safety Executive*, 2006, (454). <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr454.pdf>
- [8] Carboni, M. und S. Beretta. Effect of probability of detection upon the definition of inspection intervals for railway axles. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2007, 221(3), 409–417. Doi:10.1243/09544097JRRT132