

Kombinierter Einsatz von aktiver Thermografie und digitaler Shearografie zur Verbesserung des Defektnachweises

Wolfgang SCHMIDT*, Tina WILHELM*
 * Fraunhofer IPA Nobelstr. 12 70569 Stuttgart
 wolfgang.schmidt@ipa.fraunhofer.de

Kurzfassung. Durch die immer effizientere Ausnutzung der Materialeigenschaften steigen auch die Anforderungen an zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Prüfung von Bauteilen stetig an. Häufig können diese Anforderungen nicht mit einem einzelnen Prüfverfahren abgedeckt werden. Eine Möglichkeit diesen Anforderungen gerecht zu werden liegt in der Kombination von Einzelverfahren zu Multisensorsystemen. Aufgrund der Redundanz und der weitgehend komplementären Funktionsweise von aktiver Thermografie und digitaler Shearografie liegt in der Fusion beider Verfahren zu einem Multisensorsystem hohes Potenzial zur Erfüllung der gestellten Anforderungen.

Die Methode der aktiven Thermografie beruht auf dem Prinzip, dass im Bauteil induzierte Wärme Flüsse im Bereich von Inhomogenitäten ein abweichendes Temperaturfeld hervorrufen. Das Prinzip der digitalen Shearografie basiert auf der Erfassung von Weglängenänderungen kohärenter elektromagnetischer Wellen zwischen einem Objekt und einem Detektor, wodurch lokale Verformungsänderungen detektiert werden. Analog zur aktiven Thermografie muss auch bei der Shearografie dem Prüfobjekt Energie zugeführt werden um Verformungsänderungen hervorzurufen, aus denen auf Abweichungen vom Normalzustand geschlossen werden kann. Da induzierte Wärme Flüsse auch Dehnungen im Bauteil verursachen, die an Defekten zu lokalen Verformungsänderungen führen welche durch die digitale Shearografie detektierbar sind, liegt es nahe aktive Thermografie und digitale Shearografie zu kombinieren. Ferner können bei beiden Verfahren gleiche Anregungsarten genutzt werden.

Die Kombination von aktiver Thermografie und digitaler Shearografie liefert gleichzeitig Informationen zu Wärme flüssen sowie Verformungen und daher einen höheren Informationsgehalt bezüglich des Defektzustandes eines Bauteils. Dies führt zu einer Verbesserung der Fehlernachweisbarkeit und insbesondere der Fehlerdetektionsrate im Vergleich zu den Einzelverfahren. Durch die Redundanz der beiden Verfahren bei der Fehlererkennung sinkt auch die Wahrscheinlichkeit von Fehlinterpretationen der Prüfergebnisse.

Einführung

Die Verfügbarkeit hochzuverlässiger zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Qualitätssicherung ist insbesondere im Bereich des Leichtbaus eine elementare Forderung. Durch neue, ambitionierte Werkstoffverbundsysteme entstehen erhöhte Anforderungen an die Prüftechnologie. Bei komplexeren Fragestellungen stoßen die Einzelverfahren an ihre physikalischen Grenzen. Um diese Fragestellungen dennoch effizient bewältigen zu können, gehen aktuelle Entwicklungstrends hin zur Kombination von Einzelverfahren zu Multisensorsystemen. Aufgrund der Redundanz hinsichtlich der nachweisbaren Defekte und der weitgehend komplementären Funktionsweise sowie der Ausnutzung von

Synergieeffekten bei beiden Verfahren, liegt in der Fusion von aktiver Thermografie und digitaler Shearografie zu solch einem Multisensorsystem ein hohes Potenzial zur Verbesserung des Prüfergebnisses.

Prüfmethoden

1.1 Aktive Thermografie

Die Methode der aktiven Thermografie beruht auf dem Prinzip, dass im Werkstoff bzw. Bauteil aktivierte Wärmeflüsse im Bereich von Inhomogenitäten eine Singularität in der Temperaturverteilung an der Bauteiloberfläche hervorrufen, welche sich durch thermografische Methoden hochpräzise abbilden lässt. Zur Erzeugung der benötigten Wärmeflüsse werden dabei hauptsächlich die in Abbildung 1 dargestellten Anregungsarten verwendet.

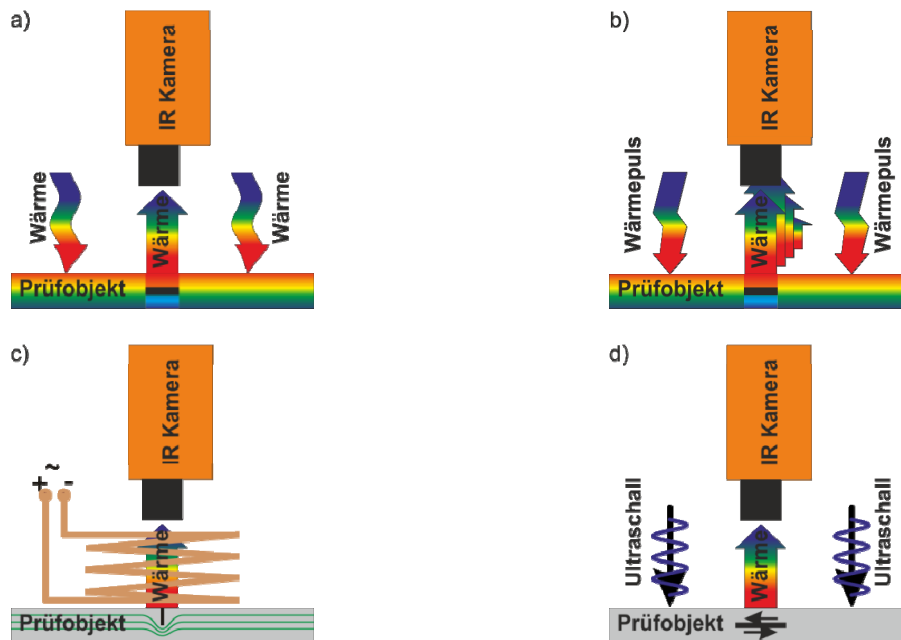


Abbildung 1. Anregungsarten der aktiven Thermografie a) thermisch, b) Wärmeimpuls, c) induktiv, d) Ultraschall.

1.2 Digitale Shearografie

Das Prinzip der digitalen Shearografie, einer speziellen Methode der Speckleinterferometrie, basiert auf dem Effekt, dass Verformungsänderungen durch die Erfassung von Weglängenänderungen kohärenter elektromagnetischer Wellen zwischen einem Objekt und einem Detektor flächenhaft ermittelt werden können. Dies wird ermöglicht, in dem die Bauteiloberfläche mit einem Laser beleuchtet wird und die reflektierten Lichtwellen mit Hilfe eines Interferometers in der Bildebene zur Interferenz gebracht werden. Damit lassen sich Verformungsänderungen sowohl in der Ebene (In-Plane) als auch aus der Ebene heraus (Out-of-Plane) detektieren. Durch mehrfaches Messen der Intensitätsverteilungen ist es möglich, daraus die relative Phasenlage der interferierenden Lichtwellen zu bestimmen (Abbildung 2). Analysiert man zu unterschiedlichen Belastungszuständen die Intensitätsverteilung des Laserlichts in der Bildebene, so lässt sich aus den Änderungen in den relativen Phasenbeziehungen zwischen den Belastungszuständen der Verformungsgradient an der Bauteiloberfläche bestimmen.

Praktisch wird dabei so vorgegangen, dass die der Intensitätsverteilungen des Laserlichts zu zwei unterschiedlichen Belastungszeitpunkten aufgenommen und die dabei generierten Interferogramme anschließend pixelweise subtrahiert werden.

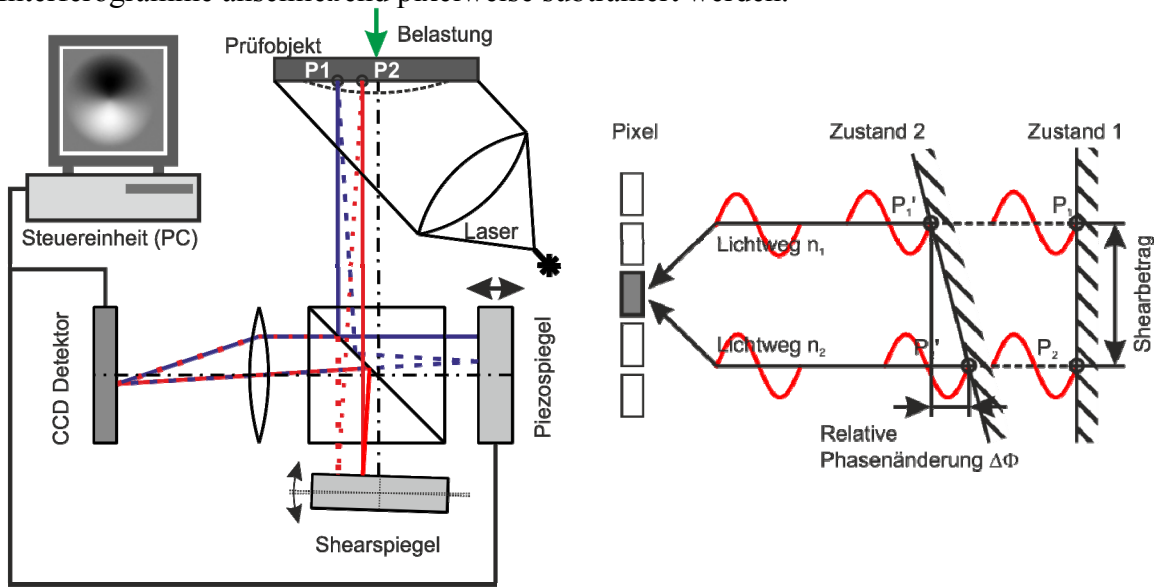
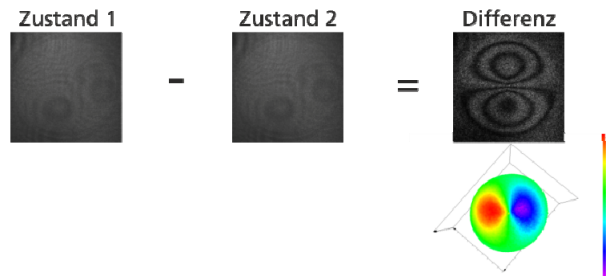


Abbildung 2. Prinzip der Shearografie.

Da in gleichförmig deformierten Bereichen keine Änderung der relativen Phase auftritt, löschen sich diese Bereiche bei der Subtraktion aus. Im Ergebnisinterferogramm ergeben sich deshalb nur noch in Bereichen in denen es zwischen den beiden Belastungszuständen zu einer Änderung der relativen Phasenlage kommt neue Interferenzen (Abbildung 3). Der Abstand der schwarzen Linien im Ergebnisinterferogramm in Abbildung 3 entspricht der halben Wellenlänge des Laserlichts. Somit kann über das Auszählen der Hell – Dunkel Übergänge der Verformungsgradient bestimmt werden.



$$I_{1,xy} = I_{P1,xy} + I_{P2,xy} + 2\sqrt{I_{P1,xy} * I_{P2,xy}} * \cos(\Phi_{0,xy})$$

$$I_{2,xy} = I_{P1,xy} + I_{P2,xy} + 2\sqrt{I_{P1,xy} * I_{P2,xy}} * \cos(\Phi_{0,xy} + \Delta\Phi_{xy})$$

$$I_{\Delta 12,xy} = 4\sqrt{I_{P1,xy} * I_{P2,xy}} * \sin\left(\Phi_{0,xy} + \frac{\Delta\Phi}{2}\right) * \sin\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right)$$

Abbildung 3. Entstehung eines Interferogramms.

Analog zur aktiven Thermografie muss auch bei der Shearografie dem Prüfobjekt Energie zugeführt werden um Verformungsänderungen hervorzurufen aus denen auf eventuelle Abweichungen vom Normalzustand (gleichförmige Deformation) geschlossen werden kann. Die hierfür eingesetzten Anregungsarten sind in Abbildung 4 dargestellt. Bei diesen Anregungsarten wird ausgenutzt, dass das Bauteil im Defektbereich andere Steifigkeitseigenschaften aufweist als in der defektfreien Umgebung. Dadurch unterscheidet sich auch das Verformungsverhalten im Defektbereich unter der eingebrachten Belastung. So verursacht beispielsweise eine Delamination beim Aufbringen einer flächigen thermischen Beanspruchung an der Oberfläche eines mehrschichtigen

Bauteils eine lokale Ausbeulung oder Einschnürung des Bauteils im Defektbereich. Ursache hierfür ist das sich einstellende Temperaturmoment, sowie die thermomechanische Verformung, die aus den fehlenden Bindungskräften zwischen den Schichten resultiert.

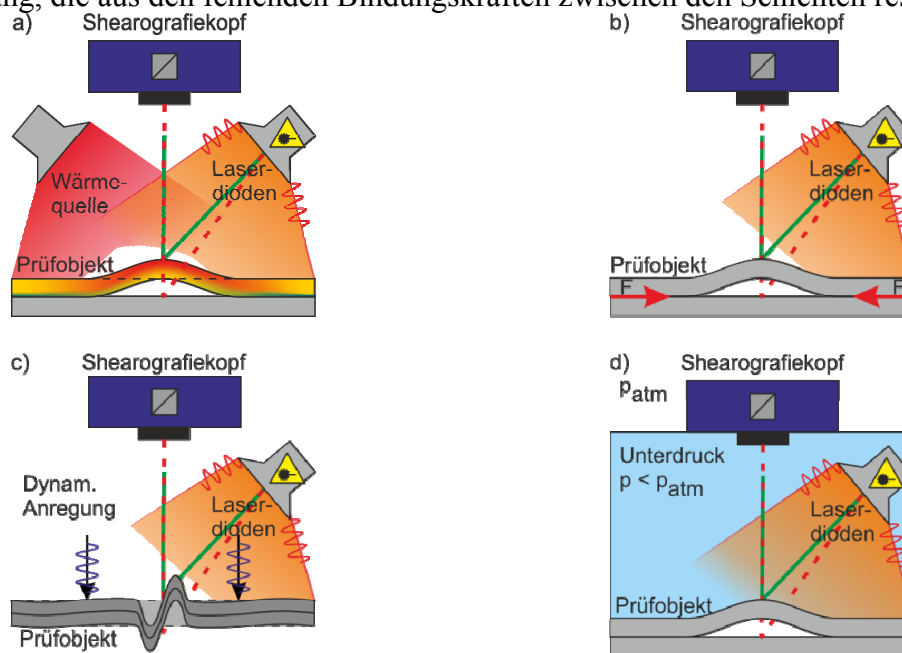


Abbildung 4. Anregungsarten für die digitale Shearografie a) thermisch, b) mechanisch, c) dynamisch, d) Unterdruck.

Aus Abbildung 1 und Abbildung 4 ist erkennbar, dass bei der aktiven Thermografie und digitalen Shearografie ähnliche Anregungsarten genutzt werden. Dies legt es nahe, die beiden Prüfverfahren zu kombinieren. Ein weiterer Aspekt der für eine Verfahrenskombination spricht ist, dass für die thermografische Messungen induzierte Wärme-flüsse auch thermische Dehnungen im Bauteil hervorrufen. Diese führen wie bereits dargelegt, an Defekten aufgrund von Steifigkeitsdiskontinuitäten zu lokalen Verformungsänderungen, welche durch die digitale Shearografie detektierbar sind. Damit wird durch den kombinierten Einsatz der beiden Verfahren eine Redundanz erzeugt, welche die Nachweiswahrscheinlichkeit und -sicherheit von Defekten deutlich erhöht. Zusätzlich werden durch die Verfahrenskombination die verfahrensspezifischen Schwächen des einen Prüfverfahrens durch die Stärken des anderen Verfahrens ergänzt. So lassen sich mit der Verfahrenskombination auch Defekte nachweisen, die ansonsten mit einem der beiden Verfahren als Einzelanwendung nicht nachweisbar sind.

Untersuchungen

Die Untersuchungen zum kombinierten Einsatz von aktiver Thermografie und digitaler Shearografie wurden an zunächst einer Referenzprobe mit Flachbodenbohrungen gemäß Abbildung 5 durchgeführt. An dieser Probe wurde untersucht, welche Einflüsse die Messanordnung und das Anregungssignal auf die Defektnachweisbarkeit der einzelnen Systeme haben. Hierzu wurden die Messdaten entlang der eingezeichneten Linien ausgewertet. Um eine zeit- und anregungssynchrone Datenaufnahme mit beiden Systemen realisieren zu können bieten sich zwei Varianten für die Anordnung der Messsysteme an (Abbildung 6).

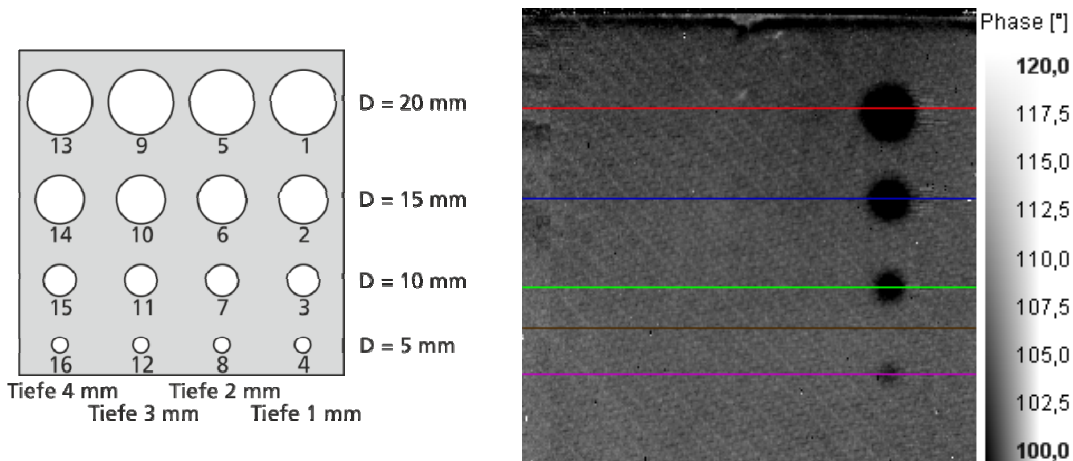


Abbildung 5. Aufbau der Referenzprobe und Auswertungslinien.

Bei der ersten Variante arbeitet man mit einem infrarot transparenten Spiegel wodurch Bildverzerrungen aufgrund unterschiedlicher Winkel der optischen Achsen weitgehend ausgeschlossen werden können. Die zweite Variante besteht aus einem Aufbau mit zwei getrennten optischen Achsen beider Messsysteme. Da die Detektoren der beiden Messsysteme in der Regel unterschiedliche Auflösungen besitzen, müssen bei beiden Anordnungen die aufgenommenen Bildausschnitte korreliert werden.

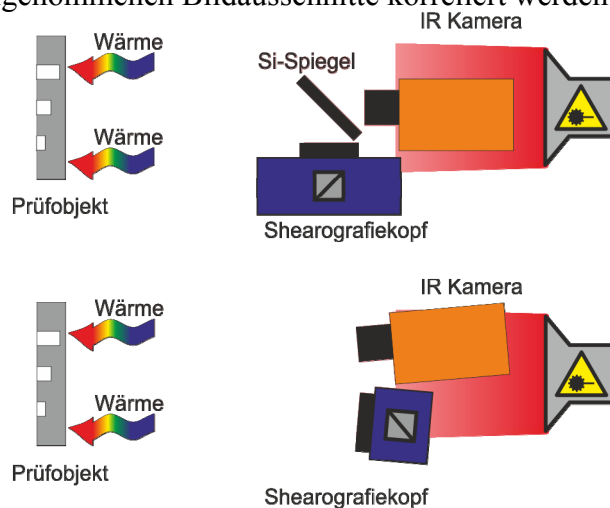


Abbildung 6. Prüfanordnung für synchrone Messungen.

Den Einfluss des infrarot transparenten Spiegels auf Amplituden- und Phasensignal der Thermografie zeigen die Messergebnisse einer Wärmefluss Lock-In Untersuchung in Abbildung 7. Wie zu erwarten fällt das Amplitudensignal bei Einsatz des Spiegels aufgrund dessen Transmissionseigenschaften ab. Das Phasensignal dagegen bleibt durch den Spiegel nahezu unverändert. Auch bei den Shearografieergebnissen können die Einflüsse durch die Umlenkung am Spiegel nahezu vernachlässigt werden.

Um ein möglichst optimales Messergebnis zu erzielen ist die geeignete Wahl der Anregungsparameter von entscheidender Bedeutung. Hierzu wurden an der Referenzprobe Untersuchungen mit thermischer Impulsanregung und amplitudenmodulierter thermischer Anregung durchgeführt. Ein Vergleich der Ergebnissignale dieser Anregungsarten zeigt Abbildung 8.

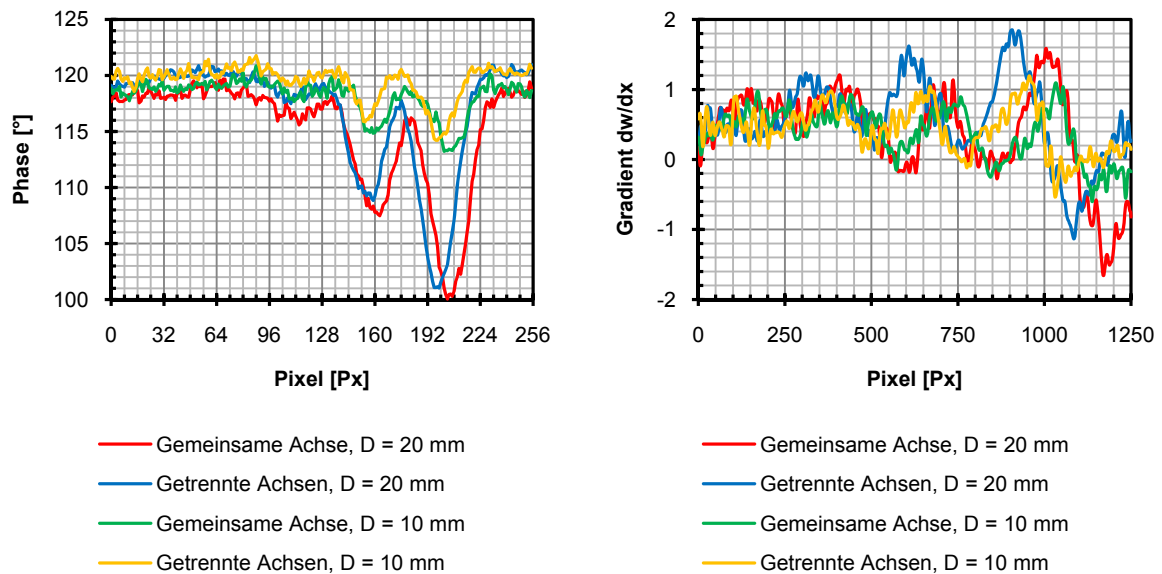


Abbildung 7. Einfluss der Messanordnung; Links Amplitude Thermografie, rechts Verformungsgradient Shearografie. Anregung thermisch amplitudenmoduliert.

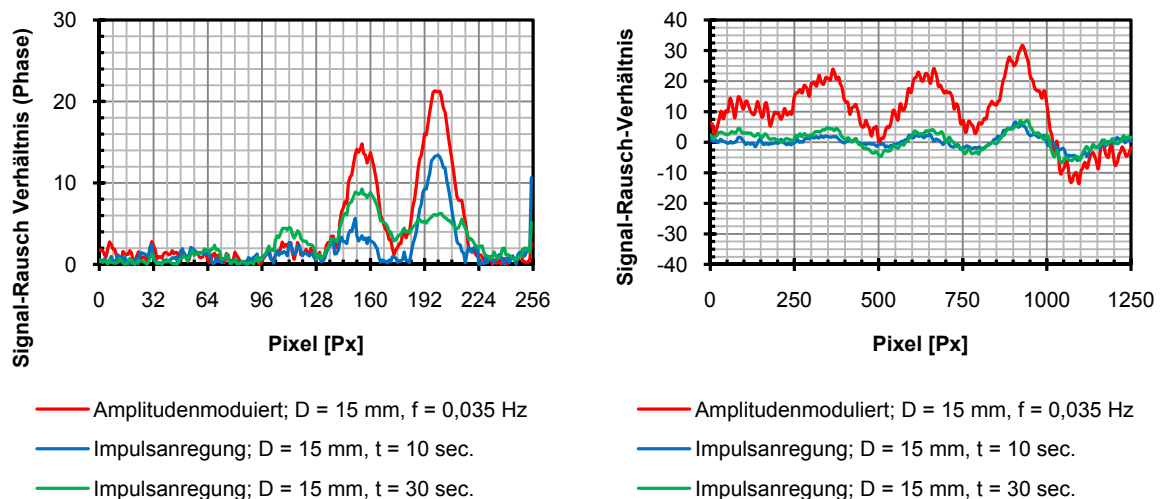


Abbildung 8. Vergleich der Messergebnisse bei Impuls und amplitudenmodulierter Anregung; links Thermografie, rechts Shearografie

Ergebnisse

Dass durch die Kombination der beiden Prüfverfahren die Nachweiswahrscheinlichkeit (POD) von Defekten erhöht wird zeigt Abbildung 9. Hier wurde eine CFK-Platte mit Flachbodenbohrungen unterschiedlicher Tiefe und Durchmesser untersucht wobei der Platte amplitudenmoduliert Wärme zugeführt wurde. Betrachtet man beide Verfahren getrennt, so sind mittels Thermografie maximal 8 Bohrungen nachzuweisen. Durch die Shearografie sind bei synchroner Prüfung 9 Bohrungen nachweisbar. Mit dem kombinierten System werden insgesamt 11 Bohrungen nachgewiesen. Dabei zeigt sich, dass durch die Shearografie die Bohrungen in größeren Tiefenlagen besser nachgewiesen werden, wogegen die Thermografie kleinere Bohrungen besser erkennt.

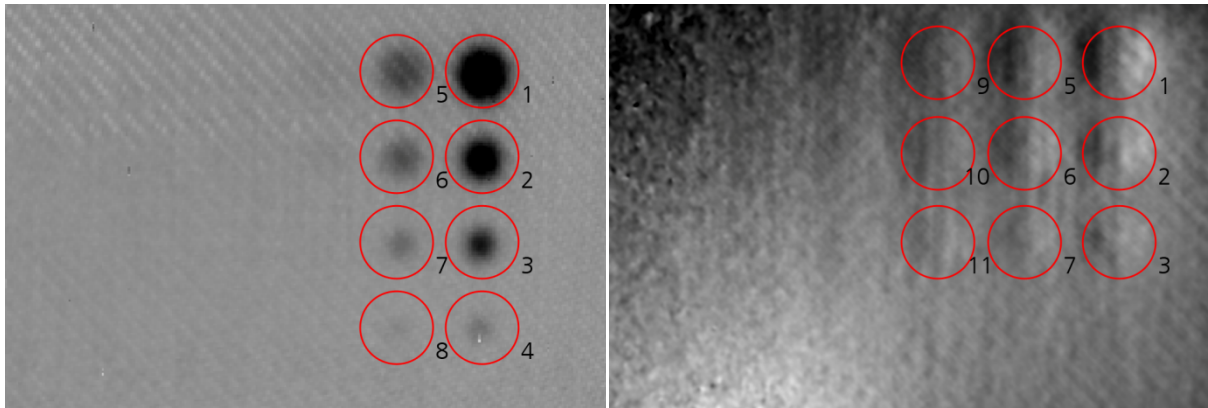


Abbildung 9. Nachweis von Flachbodenbohrungen, Tiefenlage nach links zunehmend, Durchmesser nach unten abnehmend (links Phasenthermogramm, rechts Shearogramm).

Mit der Definition der POD (Possibility Of Detection) als Verhältnis von richtig gefundenen Defekten zur Gesamtheit der Defekte ergibt sich hiermit für die Thermografie eine POD von 50% (8 gefunden / 16 insgesamt) und für die Shearografie eine POD von 56%. Die Kombination aus Thermografie und Shearografie weist eine POD von 69% auf, was in diesem Fall eine Verbesserung der Nachweiswahrscheinlichkeit von 19% bzw. 13% bedeutet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden auch durch eine gekoppelte FEM – Simulation bestätigt. Betrachtet man das Verhältnis der Ergebnismaxima zu den von den Herstellern der Messsysteme angegebenen Messauflösungen, so liefert dieses einen qualitativ identischen Verlauf wie die gemessenen Signal-Rauschverhältnisse für die beiden Messverfahren (Abbildung 10).

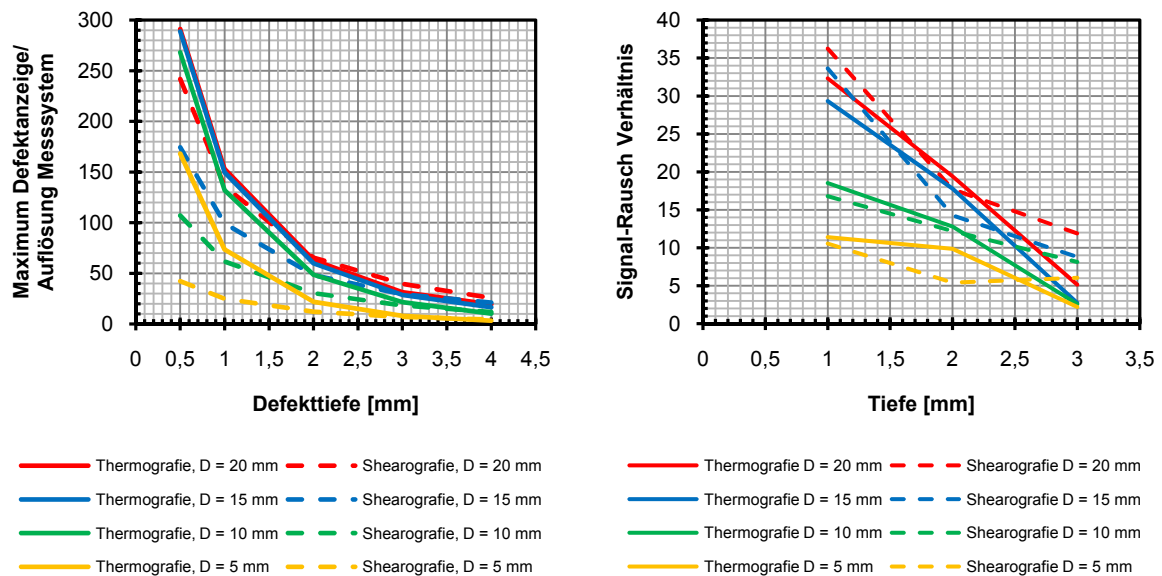


Abbildung 10. Qualitativer Vergleich Ergebnisse aus Simulation (links) und Signal-Rauschverhältnis aus Messung (rechts).

Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass sich tieferliegende ausgedehnte Bohrungen shearografisch in kürzerer Zeit nachweisen lassen als thermografisch. Bei einer amplitudenmodulierten thermischen Anregung wurden die Bohrungen 5 bis 7 in Abbildung 5 mittels Shearografie bereits bei einer Anregungsfrequenz von 0,25 Hz detektiert. Um diese Bohrungen auch thermografisch nachzuweisen war eine Anregungsfrequenz von 0,066 Hz notwendig. Dies bedeutet, dass sich Defekte dieser Größenordnung shearografisch knapp viermal schneller nachweisen lassen. Zusätzlich werden bei der Anregungsfrequenz von 0,25 Hz durch die thermografische Messung noch kleinere

oberflächennahe Defekte nachgewiesen, die mittels Shearografie nicht detektiert werden konnten. Durch die Reduzierung der Prüfzeiten und damit der auch der Prüfkosten wird die Verfahrenskombination auch unter ökonomischen Gesichtspunkten interessant.

Ausblick

Wie am Beispiel der CFK-Strukturen gezeigt wurde, ist es durch den kombinierten Einsatz beider Prüfverfahren möglich an komplex aufgebauten Bauteilen innerhalb einer einzelnen Prüfung unterschiedliche Defektarten zu erkennen, die mit den Einzelverfahren nur in zwei aufeinanderfolgenden Prüfungen schwer oder gar nicht nachweisbar waren. Die Kombination von aktiver Thermografie und digitaler Shearografie liefert gleichzeitig Informationen zu Wärmeflüssen und Verformungen und liefert daher bei entsprechender Auswertung einen höheren Informationsgehalt bezüglich des Defektzustandes eines Bauteils. Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung der Fehlernachweisbarkeit und insbesondere der Fehlerdetektionsrate im Vergleich zu den Einzelverfahren. Durch die Redundanz der beiden Verfahren bei der Fehlererkennung sinkt auch die Wahrscheinlichkeit von Fehlinterpretationen der Prüfergebnisse. Dies liefert neue Ansatzpunkte für intelligente, sich selbst teachende Auswertungstechniken beispielsweise mittels neuronaler Netze. Durch Ausnutzung von Synergien und der Redundanzen der beiden Systeme ist ein kombiniertes System dann in der Lage selbständig zu entscheiden, ob Defekte vorliegen oder nicht.