

Rissprüfung mittels aktiver Thermografieverfahren: Induktions- und Ultraschallanregung im Vergleich

Christian SPIESSBERGER, Thomas ZWESCHPER, Alexander DILLENZ
edevis GmbH, Handwerkstr. 55, 70565 Stuttgart, info@edevis.de

Kurzfassung. Nach wie vor ist zerstörungsfreie Rissprüfung in metallischen Bauteilen ein aktuelles Thema, sowohl in der Automobilindustrie als auch im Bereich Luft- und Raumfahrt. Aktive Thermografieverfahren sind gut geeignet, oberflächennahe Risse in metallischen Strukturen (Sinter-, Guss-, Schmiede- oder Umformbauteilen) nachzuweisen. Die Anregung der zu prüfenden Bauteile erfolgt entweder induktiv oder mittels Ultraschall. Beide Methoden sind bildgebend, wobei kurze Taktzeiten realisierbar sind. Eine vollautomatisierte Prüfung der Bauteile ist häufig möglich.

Bei der Induktionsthermografie wird ein Wirbelstromfeld in einem metallischen Bauteil erzeugt und mit einer Infrarotkamera visualisiert. Materialfehler, wie zum Beispiel Risse, verändern lokal die Wirbelstromfeldichte und damit auch die Wärmeverteilung im Bauteil, was einen selektiven Rissnachweis möglich macht.

Bei der ultraschallangeregten Thermografie wird das Prüfobjekt mit einem Ultraschallgeber zum Schwingen gebracht, wodurch sich die Rissufer eventuell vorhandener Risse relativ zueinander bewegen. Die entstehende Reibungswärme gibt Auskunft über Größe und Lage des Risses.

Die Gegenüberstellung der erzielten Messergebnisse zeigt jeweils die Vor- und Nachteile beider Anregungsformen. Die induktiv angeregte Thermografie arbeitet im Gegensatz zur ultraschallangeregten Thermografie völlig berührungslos. Umgekehrt hat die ultraschallangeregte Thermografie den Vorteil, dass die Rissorientierung keinen Einfluss auf das Messergebnis hat. Der Vortrag gibt anhand konkreter Praxisbeispiele einen Überblick über die daraus resultierenden unterschiedlichen Einsatzbereiche beider Verfahren im industriellen Umfeld.

Einführung

Die zerstörungsfreie Rissprüfung metallischer Bauteile hat nichts an Bedeutung verloren. Die überwiegend eingesetzten Verfahren sind visuelle Prüfung, Ultraschallverfahren, Wirbelstromverfahren, Magnetpulver- und Farbeindringprüfung. Die Verfahren sind leistungsfähig und haben sich über viele Jahren und Jahrzehnten bewährt. Als Alternative gewinnen aktive Thermografieverfahren in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung, da sie neben technischen Vorteilen insbesondere wirtschaftlich interessant sind:

- Im Gegensatz zu Wirbelstrom und Ultraschallverfahren handelt es sich um eine flächige und nicht um eine rasternde Prüfung. Dies führt zu kurzen Prüfzeiten, die meist unter einer Sekunde pro Messfeld liegen.
- Bei ausreichendem Messkontrast sind die Verfahren häufig einfacher automatisierbar als die Magnetpulver- oder Eindringprüfung. Eine Serienprüfung mit kurzen Taktzeiten ist somit realisierbar.

- Es ist keine Oberflächenbehandlung der zu prüfenden Teile vor der Prüfung notwendig. Daher müssen die geprüften Teile nach vollendeter Prüfung auch nicht gesäubert werden.

Wichtig für den erfolgreichen Einsatz der aktiven Thermografie ist die Abstimmung der Anregungstechnik auf den geprüften Werkstoff und die gesuchten Fehler. Für die Rissprüfung kommen die Anregung mit Induktion oder Leistungultraschall in Betracht. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über beide Verfahren, diskutiert die jeweiligen Vor- und Nachteile und vergleicht beide Verfahren miteinander. Gleichzeitig wird versucht, die thermografischen Verfahren zu den klassischen Rissprüfungsverfahren hin abzugrenzen.

1. Rissprüfung mit aktiven Thermografieverfahren

1.1 Induktiv angeregte Thermografie

Die induktiv angeregte Thermografie ist ein vollständig berührungslos arbeitendes Prüfverfahren, das geeignet ist, Materialfehler, wie z.B. Risse und Überwalzungen in metallischen Strukturen (Sinter-, Guss-, Schmiede- oder Umformbauteilen) nachzuweisen [1-3]. Dabei wird ein Wirbelstromfeld in einem metallischen Bauteil erzeugt und mit einer Infrarotkamera visualisiert. Materialfehler, wie etwa Risse, verändern das Wirbelstromfeld und damit auch die Wärmeverteilung im Bauteil. Die Wirbelströme müssen unter Rissen hindurch oder um Risse herum fließen. Die dadurch erhöhte Stromdichte führt zu einer größeren Erwärmung der Rissumgebung.

Durch die bildhafte Erfassung der zeitlichen Verzögerung zwischen induktiver Anregung und thermischer Antwort (Phase) wird ein robustes Verfahren erreicht, das gegenüber Verunreinigungen der Bauteiloberfläche unempfindlich ist. Die pulsformige Wärmezufuhr erfolgt mittels spezieller Induktionsgeneratoren, wodurch sich kurze Taktzeiten von unter einer Sekunde realisieren lassen. Der prinzipielle Aufbau eines Prüfsystems ist in Abbildung 1 skizziert.

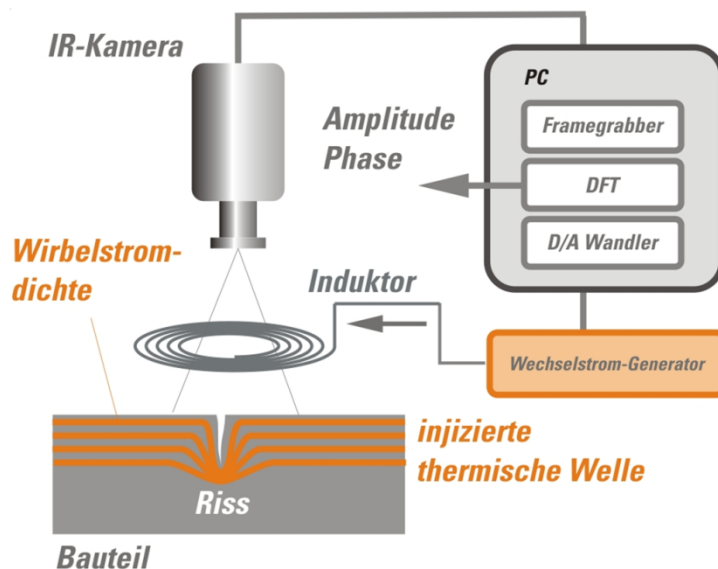


Abbildung 1. Prinzipieller Aufbau der induktiv angeregten Thermografie.

Ein typischer Laboraufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Das zu prüfende Bauteil ist von einer Kupferspule umgeben, die an einem Induktionsgenerator angeschlossen wird. Die

Kamera ist auf das Bauteil gerichtet. Spule und Kamera müssen so positioniert werden, dass die Spule nicht den relevanten Bauteilbereich verdeckt.



Abbildung 2. Laboraufbau mit Anpasser, Spule und Thermografiekamera.

Die gesuchten Risse müssen nicht oberflächenbrechend sein, sie können auch geringfügig unterhalb der Oberfläche liegen. Bei nichtmagnetischen Werkstoffen (z.B. Aluminium) sind aufgrund der deutlich höheren Wirbelstromeindringtiefe auch tieferliegende Risse detektierbar, bei magnetischen Werkstoffen wie Stahl dürfen die Risse nur leicht unter der Oberfläche liegen.

Der Zeitpunkt des maximalen Temperaturkontrasts zwischen Defekten und intakten Bereichen hängt von der Tiefe der Fehlstelle, der Art des Fehlers und der Temperaturleitfähigkeit des Werkstoffs ab. Daher wird die gesamte Abkühlungssequenz nach dem Blitz und nicht nur ein Einzelbild ausgewertet. Hierfür gibt es verschiedene Auswertemethoden. Als Standardauswertung hat sich die Puls-Phasenauswertung etabliert, die im Wesentlichen eine gewichtete Mittelung über die Abkühlungssequenz darstellt.

1.2 Ultraschallangeregte Thermografie

Im Gegensatz zur induktiv angeregten Thermografie werden bei der ultraschallangeregten Thermografie die veränderten mechanischen Eigenschaften durch Defekte zur modulierten Wärmeerzeugung eingesetzt [4,5]. Wird ein Bauteil zum Schwingen angeregt, so werden kleine Relativbewegungen der beiden Rissufer zueinander erzeugt. Die entstehende Reibungswärme wird von einer Thermografiekamera nachgewiesen. Der Mechanismus ist vergleichbar mit der Wärme, die entsteht, wenn man im Winter kalte Hände schnell aneinander reibt. Um möglichst viel Wärme zu erzeugen sollten Hände oder Rissufer möglichst häufig pro Zeiteinheit aneinander vorbei bewegt werden. Für die zerstörungsfreie Prüfung wird daher Ultraschall zur Anregung verwendet.

Der Ultraschall wird mit einem piezoelektrischen Ultraschallgeber ins Bauteil eingeleitet. Aufgrund der hohen benötigten Leistungen ist eine berührungslose Kopplung unmöglich. Der Ultraschall wird bevorzugt am Defekt gedämpft und in Wärme umgewandelt, die ihn selektiv im Sinne einer thermischen Dunkelfeldmethode hervortreten lässt. Der prinzipielle Aufbau der ultraschallangeregten Thermografie ist in Abbildung 3 dargestellt.

Trotz des ähnlichen Aufbaus der Ultraschall- und der Induktionsthermografie enthalten die Ergebnisbilder völlig unterschiedliche Information: Bei der induktiv angeregten Thermografie wird die Unterbrechung von Wirbelströmen durch Risse

dargestellt. Bei der Ultraschallanregung ist die lokale Rissuferreibung der kontrastgebende Mechanismus. Das eine Verfahren erkennt also eine Störung in den elektrischen Eigenschaften, das andere Verfahren eine Anomalie der mechanischen Eigenschaften. Die Kombination beider Verfahren kann daher zusätzliche Informationen über Defekteigenschaften liefern.

Wenn die Ultraschallanregung bei nur einer Ultraschallfrequenz durchgeführt wird, kann das Ergebnis durch Stehwelleneffekte stark beeinträchtigt werden. Dieses Problem lässt sich durch ständiges Verändern der Frequenz während der Messung (Frequenzmodulation) lösen [6].

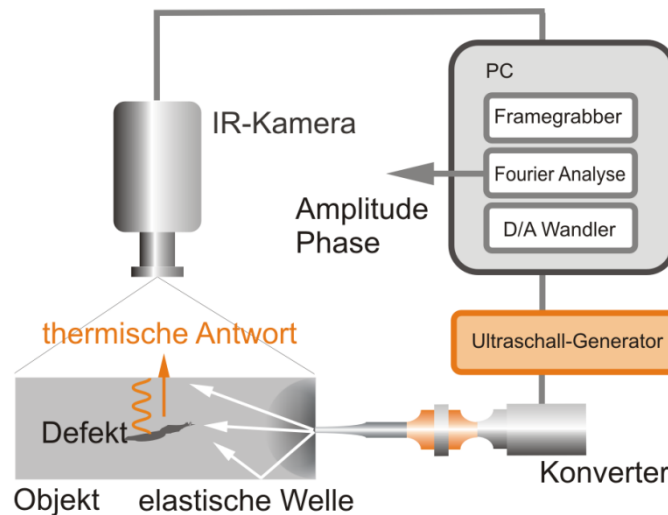


Abbildung 3. Prinzipieller Aufbau der ultraschallangeregten Thermografie .

1.3 Phasenauswertung

Die Anregung erfolgt bei beiden Verfahren entweder sinusförmig (Lockin-Thermografie) oder pulsartig (Puls-Phasen-Thermografie). In beiden Fällen wird die aufgenommene Temperatursequenz mit einer Fouriertransformation in ein Phasen- und ein Amplitudenbild komprimiert. Die Phasenverschiebung zwischen Wärmezufuhr und Temperatur hängt davon ab, wie schnell die Wärme ins Bauteilinnere abfließt. Das Phasenbild stellt diese Verzögerung für jeden Bildpixel dar. Im Amplitudenbild ist die Schwankungshöhe der Temperaturwerte enthalten. Ein praxisrelevanter Vorteil von Phasenbildern liegt darin, dass die optischen oder infraroten Oberflächenstrukturen des Prüfobjektes (Emissionskoeffizienten, inhomogene Temperaturverteilung) unterdrückt und praktisch nur die thermischen Strukturen gezeigt werden. Eventuelle Unregelmäßigkeiten im Kamerabild werden ebenfalls eliminiert.

Bei der Lockin-Thermografie erfolgt die Fouriertransformation ausschließlich bei der Anregungsfrequenz. Die Tiefenreichweite lässt sich durch Variation der Modulationsfrequenz einstellen: je tiefer die Frequenz, desto höher die Reichweite.

Bei der Puls-Phasen-Thermografie ist die Auswertefrequenz innerhalb bestimmter Grenzen, die von der Sequenzlänge und der Kamerafrequenz vorgegeben werden, frei wählbar. Die maximal mögliche Frequenz hängt nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorems von der Kamerafrequenz ab, die minimale Frequenz von der Sequenzlänge. Für besonders schnelle Vorgänge (z.B. Prüfung dünner Beschichtungen) sind hohe Auswertefrequenzen und damit schnelle Kameras notwendig. Zur Prüfung dicker Materialstärken muss die Wärme genügend Zeit haben, um zur Fehlstelle vordringen zu können (niedrige Frequenz). Das bedingt eine ausreichend lange Erfassung der Abkühlung

nach dem Blitz. Wie bei der Lockin-Thermografie ermöglicht die Auswertung mit unterschiedlichen Frequenzen die Einschätzung der Tiefe verschiedener Bauteilstrukturen. Oberflächennahe Fehler zeigen sich bei hohen Auswertefrequenzen, tieferliegende Strukturen bei tiefen Frequenzen.

2. Messergebnisse

2.1 Induktionsthermografie

Besonders geeignet ist die Induktionsthermografie für die Prüfung auf Längsrisse in rotationssymmetrischen Bauteilen. Abbildung 4 zeigt die Detektion eines Risses in einer Stahlschraube. Der Vergleich mit einem Temperaturbild während des Anregungspulses (links) mit dem aus der Abkühlungssequenz berechneten Phasenbild (rechts) zeigt eindrucksvoll die Vorteile der Phasenauswertung. Die deutlich stärkere Aufheizung des Schraubenkopfes wird eliminiert, der Riss (roter Pfeil) ist deutlich erkennbar.

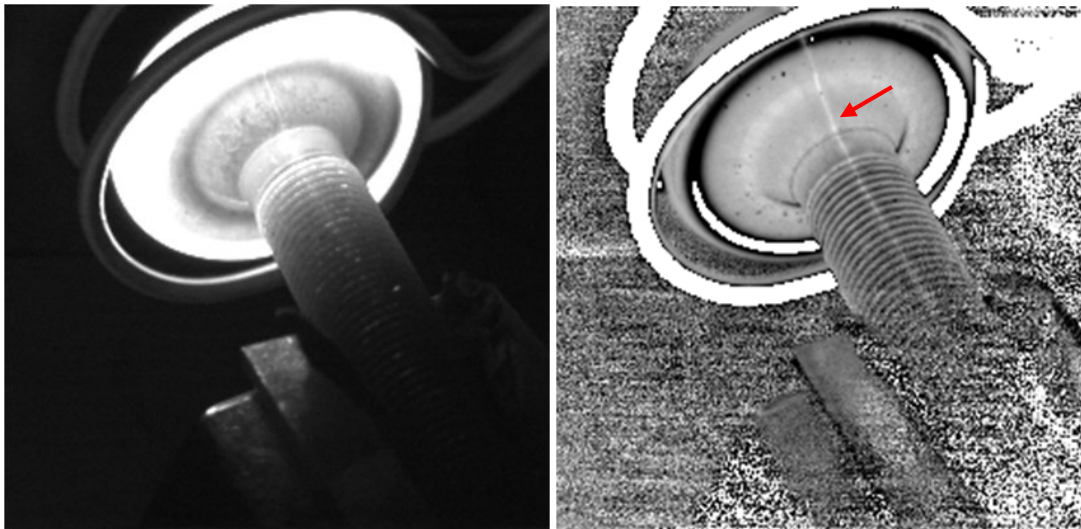


Abbildung 4. Prüfung eines Stahlbolzens. Links: Temperaturbild aus der aufgenommenen Sequenz. Rechts: Phasenbild mit Grauwertskalierung. Phasenbild bei 1 Hz, Prüfzeit ca. 0,5 Sekunden.

Die Prüfung nicht rotationssymmetrischer Bauteile demonstriert Abbildung 5 am Beispiel einer Achswelle. Auch hier ist der Riss klar erkennbar (roter Pfeil).

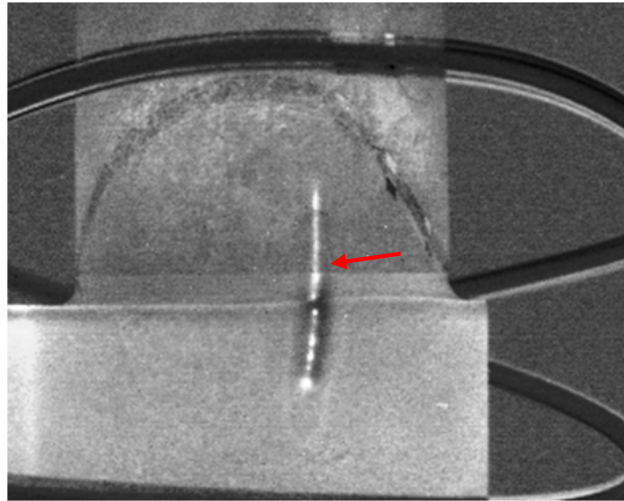


Abbildung 5. Riss in einer Achswelle. Induktionsthermografie Phasenbild bei 1 Hz, Prüfzeit ca. 0,5 Sekunden.

2.2 Ultraschallangeregte Thermografie

Für die Prüfung enger Radien ist bei der induktiv angeregten Thermografie eine aufwändige Anpassung der Spule notwendig. Mit der ultraschallangeregten Thermografie lässt sich dieser Aufwand vermeiden.

Bauteile mit vielen engen Kurvenradien sind Zahnräder. Die Prüfung der Zahnflanken auf Risse ist besonders wichtig, da die hier auftretenden mechanischen Belastungen am größten sind. Abbildung 6 zeigt, dass eine großflächige Rissprüfung gesinterter Zahnräder mit ultraschallangeregter Thermografie möglich ist.

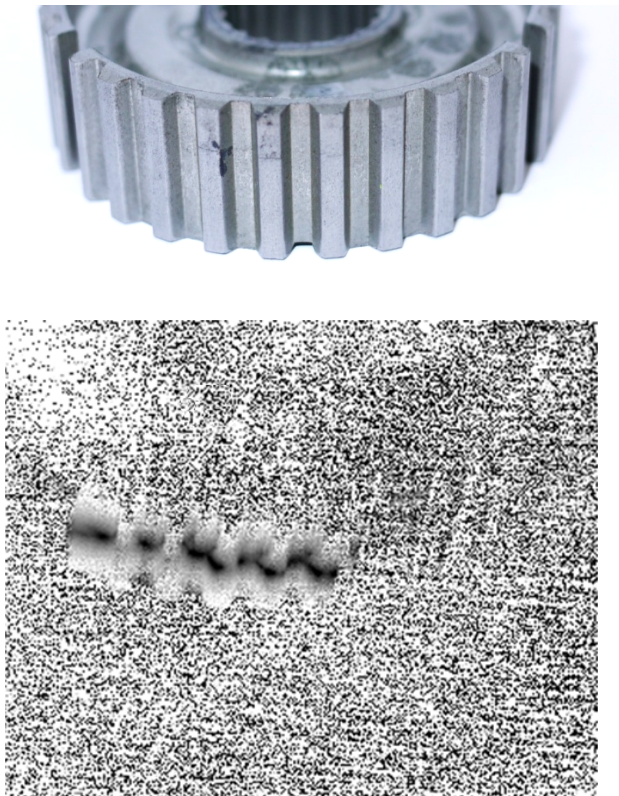


Abbildung 6. Prüfung eines gesinterten Stahl-Zahnrads mit Riss. Fotografie (oben) und Phasenbild (unten). Das defektselektive Ergebnisbild zeigt ausschließlich den Riss, der intakte Rest des Bauteils ist verrauscht.

Im Phasenbild ist nur der Riss zu erkennen, da nur hier Wärme entsteht. Die automatische Auswertung dieser defektselektiven Ergebnisbilder ist daher recht einfach möglich.

Die ultraschallangeregte Thermografie ist auch auf die Prüfung von Nietverbindungen anwendbar. Defekte Stanznieten weisen innere Oberflächen und Risse auf, die während der Ultraschallanregung aneinander reiben und Wärme erzeugen. In Abbildung 7 wird das Messergebnis einer intakten Verbindung einer defekten Niete gegenüber gestellt. Das Amplitudenbild der defekten Niete (rechts) unterscheidet sich deutlich von dem der intakten Niete (links). Auch hier wird wieder das defektselektive Verhalten der ultraschallangeregten Thermografie deutlich.

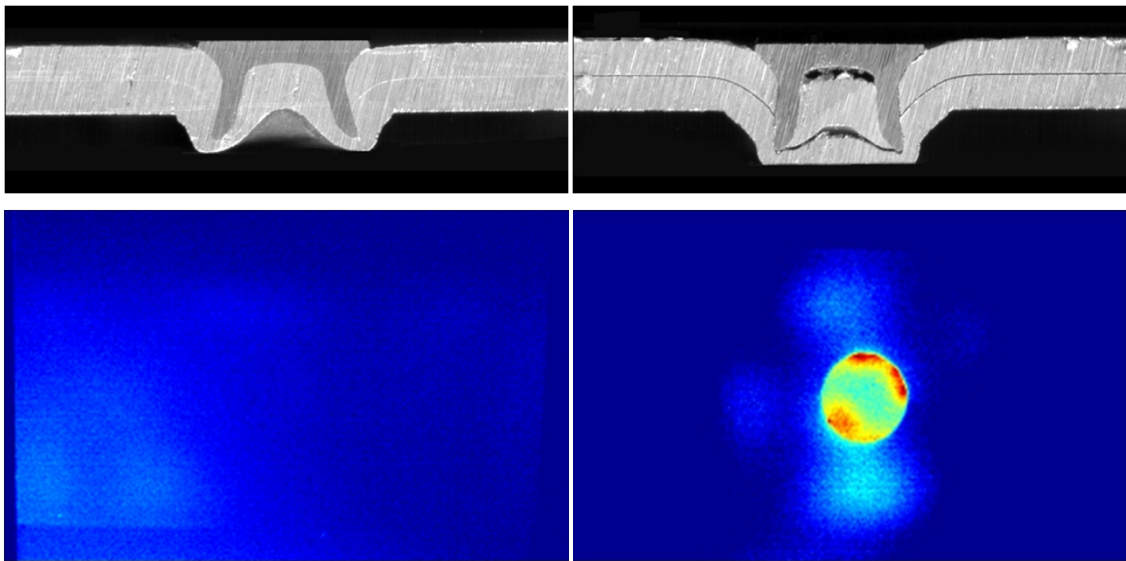


Abbildung 7. Prüfung von Stanznietverbindungen. Oben: Schliffbilder. Unten: Ergebnisbilder der ultraschallangeregten Thermografie. Auf der linken Seite ist eine intakte Niete, rechts eine defekte Niete abgebildet. Prüfzeit ca. 2 Sekunden.

4. Vergleich beider Verfahren

Bei der ultraschallangeregten Thermografie muss ein Ultraschallgeber auf das zu untersuchende Bauteil gepresst werden. Beschädigungen der Oberfläche wie beispielsweise Kratzer lassen sich daher nicht gänzlich ausschließen. Induktiv angeregte Thermografieverfahren arbeiten hingegen vollkommen berührungsfrei.

Allerdings hängt die Erkennbarkeit von Rissen bei der Induktionsthermografie von deren Orientierung im Bauteil ab, da die Feldlinien des induktiven Wechselfeldes mit den Rissen wechselwirken müssen. Im Gegensatz dazu ist bei der ultraschallangeregten Thermografie die Risserkennung weitgehend unabhängig von der Rissorientierung.

Mit Ultraschallanregung ist der Fehlernachweis in größerer Tiefe möglich als bei der induktiv angeregten Thermografie, da nur sehr oberflächennahe Fehler das Wirbelstromfeld in ausreichendem Maße stören. Die mit Ultraschall erzeugte Risswärme diffundiert auch aus größeren Tiefen an die Oberfläche.

Bei komplexen Geometrien ist es schwierig, die Bauteiloberfläche gleichmäßig mit Induktion anzuregen. Es ist dann häufig nur möglich, einzelne Bauteilbereiche zu untersuchen. Wenn das ganze Bauteil geprüft werden soll ist der Einsatz der ultraschallangeregten Thermografie sinnvoller.

Bei elektrisch schlecht oder gar nicht leitfähigen Materialien kommt nur die ultraschallangeregte Thermografie als Prüfverfahren infrage.

4. Fazit

Die Stärken beider Verfahren liegen in der extrem kurzen Prüfzeit bei gleichzeitig hoher Nachweisempfindlichkeit. Die Verfahren sind gut automatisierbar und sowohl mit Ultraschall- als auch mit Induktionsanregung als Qualitätsprüfung in der Fertigung einsetzbar. Die Möglichkeit klassische Verfahren der Rissprüfung, wie Magnetpulver- und Farbeindringprüfung, zu ersetzen, wird in Zukunft eine große Rolle spielen.

Referenzen

- [1] J. Bamberg, G. Erbeck, G. Zenzinger. EddyTherm: *Ein Verfahren zur bildgebenden Rissprüfung metallischer Bauteile*. ZfP-Zeitung 68 (1999), S. 60-62
- [2] G. Riegert, T. Zweschper, A. Dillenz, G. Busse. *Wirbelstromangeregte Lockin-Thermografie - Prinzip und Anwendungen*. Berichtsband 89-CD. Berlin : DGZfP (2004), V90
- [3] J. Vrana. *Grundlagen und Anwendungen der aktiven Thermographie mit elektromagnetischer Anregung: Induktions- und Konduktionsthermografie*. Dissertation (2008), Universität des Saarlandes
- [4] R.B. Mignogna, R.E. Green, J.C. Duke, E.G. Henneke, K.L. Reifsnider. *Thermographic investigations of high-power ultrasonic heating in materials*, Ultrasonics 7 (1981), 159-163
- [5] F. Stärk. *Temperature measurements on cyclically loaded materials*, Werkstofftechnik 13 (1982), Verlag Chemie GmbH, Weinheim, 333-338
- [6] T. Zweschper, A. Dillenz, G. Riegert, D. Scherling, G. Busse. *Ultrasound excited thermography using frequency modulated elastic waves*. Insight 45 Nr. 3 (2003), S.178-182