

OBERFLÄCHENRISSPRÜFUNG MIT AKTIVER DYNAMISCHER THERMOGRAFIE

Alternative zu konventionellen Prüfverfahren

Die induktiv angeregte Thermografie bietet sich für die automatisierte zerstörungsfreie Prüfung auf oberflächennahe Fehler in Metallen, insbesondere Stählen, an. Diese Prüftechnik arbeitet vollständig berührungslos und sehr schnell. Daher eignet sie sich für kontinuierlich messende Online-Prüfsysteme in der Produktionslinie und zur automatisierten, robotergestützten Einzelteilprüfung.

Die passive Thermografie ist mittlerweile in zahlreichen Industriesektoren etabliert und als Standardmethode in die unterschiedlichen Normen und Regelwerke eingegangen, z. B. DIN EN 13187 für die Bauthermografie, DIN 54191 für die Elektrothermografie oder ISO 18434 für die Maschinendiagnostik.

Im Unterschied dazu gibt es für die aktive dynamische Thermografie keine derartigen verbindlichen Richtlinien oder Objektnormen, welche die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) von Bauteilen oder Werkstoffen beschreiben. Erste Schritte

erfolgten mit den sowohl für die passive als auch für die aktive Thermografie gültigen Verfahrensnormen DIN 54190, Teile 1 bis 3 („Grundlagen“, „Geräte“, „Begriffe“). Aktuell erstellen auch die Fachausschüsse Thermografie der DGZfP, Berlin, und der VATH-Bundesverband für Angewandte Thermografie e.V., Tabarz, (siehe Kasten Seite 68) neue Richtlinien für die aktive Thermografie. Ergänzend wurden Regelwerke zur Personalqualifizierung in Anlehnung an die für die ZfP gültige EN 473 erarbeitet, welche sich mit der Ausbildung sowohl für die passive als auch für die aktive Thermografie befassen (DIN 54162).

Aufgrund der wachsenden Nachfrage des Marktes nach hochautomatisierbaren Verfahren wird momentan mit Nachdruck an der weitergehenden Qualifizierung der aktiven dynamischen Thermografie gearbeitet. Einen Schwerpunkt bildet dabei die Qualifizierung für die zerstörungsfreie (Serien-)Prüfung hinsichtlich oberflächennaher Fehler bei der Herstellung und beim Einsatz von hauptsäch-

lich metallischen Werkstoffen und Bauteilen. Die Variante der induktiv angeregten Thermografie stellt dabei das ZfP-Verfahren mit dem besten Potenzial für die großflächige Prüfung auf oberflächennahe Fehler dar.

Thermische Signaturen detektiert

Bei der induktiv angeregten Thermografie wird das zu untersuchende Bauteil kurzzeitig (maximal ca. 200 ms) mit einem elektromagnetischen Wechselfeld beaufschlagt (Bild 1). Die typischen Frequenzen liegen zwischen 100 und 300 kHz, die Pulsleistungen am Induktor betragen bis 15 kW. Die im Metall induzierten Wirbelstromfelder werden von Materialungängen (z. B. Rissen) in ihrer Ausbreitung gestört, was in deren Umgebung zu einer veränderten Wirbelstromdichte führt (Bild 2). Infolge von Wirbelstromverlusten bilden sich in der Nachbarschaft der Risse charakteristische Temperaturfelder aus. Mittels der berührungslosen Infrarotmesstechnik kön-

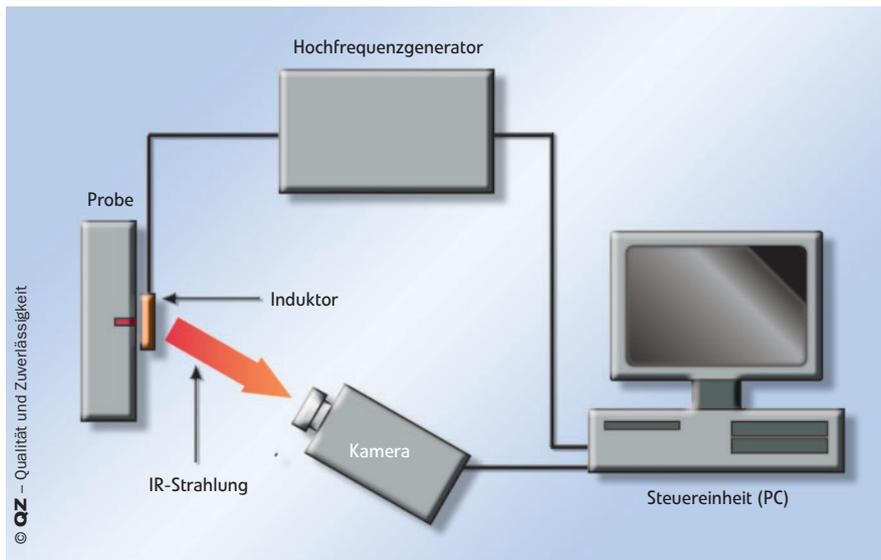


Bild 1. Schematisches Prüfprinzip der induktiv angeregten Thermografie

nen diese thermischen Signaturen als Anzeigen (Hot Spots) erkannt und die Signale orts- und zeitaufgelöst ausgewertet werden [1].

Die typische Messdauer für das von der Infrarotkamera erfasste Messfeld liegt maximal bei ca. 500 ms für die Einzelmessung mit gepulster Anregung. In der kontinuierlichen Messung können bei entsprechend hoher Nachweisempfindlichkeit derzeit Relativbewegungen von Induktor und Probe bis 1 m/s realisiert werden. Die induktiv angeregte thermografische Prüftechnik arbeitet vollständig berührungslos und sehr schnell und eignet sich sowohl für kontinuierlich messende Online-Prüfsysteme in der Produktionslinie (Daueranregung) als auch zur automatisierten, robotergestützten Einzelteilprüfung (Pulsanregung).

Wegen der in Metallen sehr schnell ablaufenden Wärmeleitungsvorgänge werden bei der induktiv angeregten Thermo-

grafie für die Detektion leistungsfähige IR-Kameras eingesetzt. Eine typische Leistungscharakteristik stellt sich mindestens wie folgt dar: Focal-Plane-Array-Kamera mit mindestens 256 x 256 Pixeln, NETD < 100 mK, Bildwiederholrate ≥ 100 Hz, passende Optik zum Erreichen der geforderten Ortsauflösung und des gewünschten Bildfeldes.

Die Mechanismen, die letztlich zur Fehleranzeige (Rissignale) führen, unterscheiden sich für ferromagnetische Werkstoffe (z. B. ferritische Stähle) von denen in nicht magnetischen Werkstoffen (z. B. austenitische Stähle, Cu- oder Al-Legierungen). Entscheidend für die erreichbare Nachweisempfindlichkeit und die auszuwählenden Prüfparameter sind neben der Oberflächentopografie und -emissivität vor allem die elektrischen, magnetischen und Wärmeleitungseigenschaften des untersuchten Materials bei Wechselfeldanregung.

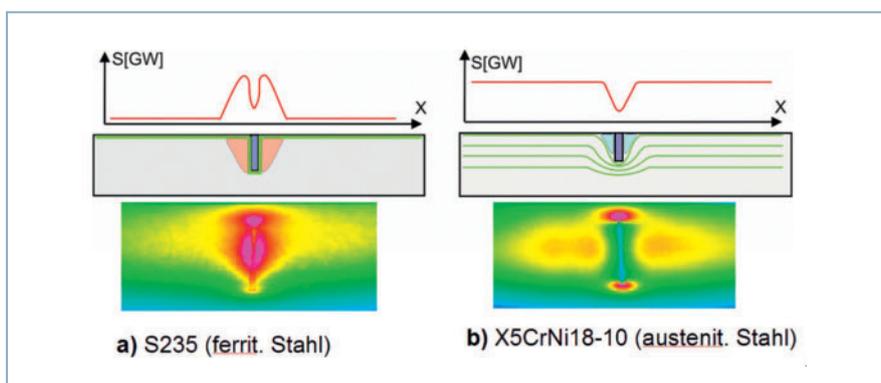


Bild 2. Wirbelstromfelder (schematisch) und resultierende thermische Signatur für ferritischen Stahl (a) und austenitischen Stahl (b)

Literatur

- 1 Walle, G.; Netzelmann, U.: Thermographic Crack Detection in Ferritic Steel Components Using Inductive Heating. Proc. 9th ECNDT Berlin, 25.-29.9.2006, DGZfP-Berichtsband BB 103-CD, Paper Tu.4.8.5
- 2 Netzelmann, U.; Strauß, H. und Walle, G.: Zerstörungsfreie thermografische Methoden zur Detektion von Fehlern an Massivumform-Teilen. Schmiede-Journal, März 2007, Industrieverband Massivumformung e.V., Hagen, S. 26-28
- 3 Untersuchungsberichte Nr. QS 0524 – Teile 1 bis 3, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken, 2005/2006
- 4 Lugin S.; Netzelmann, U.: A defect shape reconstruction algorithm for pulsed thermography. NDT&E International 40 (2007) S. 220-228

Als ein Hauptinfluss sind der Skineffekt und seine Auswirkungen auf die thermografisch detektierbare Fehleranzeige zu berücksichtigen. Typische Skintiefen z. B. für ferritischen Stahl liegen für den genannten Frequenzbereich zwischen 30 und 50 μm , für austenitischen Stahl zwischen 0,8 und 1,3 mm. Als Folge bilden sich für die beiden Stahlgruppen unterschiedliche Stromdichte-Verteilungen in der Nähe der Fehlstellen und entsprechend unterschiedliche thermische Signaturen aus.

Prüftechnik qualifiziert

Mit der flexiblen Laborakkreditierung nach DIN EN ISO / IEC 17025:2005 wurde am Fraunhofer IZFP, Saarbrücken, die induktiv angeregte Thermografie für die Prüfung auf oberflächennahe Fehler in metallischen Werkstoffen qualifiziert.

Die Ergebnisse der Parameteruntersuchungen und die ergänzenden numerischen Simulationsrechnungen werden nachfolgend vorgestellt. Dabei wurden vor allem die Nachweisempfindlichkeiten bezüglich Fehlerlänge, Fehlertiefe, Fehlerorientierung und Neigungswinkel zur Oberfläche („Einlaufwinkel“) sowie Fehlerüberdeckung untersucht. Alle Testkörper (Platten mit 3 mm Dicke) weisen eine vergleichbare Oberflächentopografie nach Glasperlen-Strahlen auf ($R_a \approx 2 \mu\text{m}$, $R_z \approx 15 \mu\text{m}$). \triangleright

Verband der Thermografen

Der VATH-Bundesverband für Angewandte Thermografie e.V. in Tabarz/Thüringen ist nach eigenen Angaben mit annähernd 250 Mitgliedern der größte Thermografieverband im deutschsprachigen Raum. Zu seinen Mitgliedern zählen Anwender aus dem Sektorservice, der Bauwirtschaft, dem Handwerk, der Industrie und der Medizin sowie Fachhochschulen, Institute, Universitäten und Infrarogerätehersteller. Der Verein will die Thermografie, ihre Anwendung, Weiterentwicklung und die Erschließung neuer Anwendungsgebiete fördern. Er versteht sich als Forum für den Erfahrungs- und Informationsaustausch, bei dem nationale und internationale Kontakte, z. B. bei Fachtagungen, gepflegt werden. Weitere Aufgaben sind Beratung, Fort- und Weiterbildung sowie Mitarbeit und Interessenvertretung in Gremien und Normenausschüssen.

Der VATH widmet sich vorrangig der Thermografie in den Sektoren Bau-, Elektro- und Industrierwesen, aber auch der aktiven Thermografie als Prüfmethode in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Es werden Lehrveranstaltungen als Qualifizierungs- und Zertifizierungsmaßnahmen nach DIN 54162 und EN 473, Stufe 1, 2, 3 und nach der Europäischen Feuer-schutz-Richtlinie CFPA durchgeführt. So soll ein hoher Qualitätsstandard bei Infrarotmessungen und der Messergebnisauswertung gesichert werden.

► www.vath.de

QM-Infocenter.de ► QZ301896

Die Testfehler wurden durch erodierte Nuten erzeugt: Breite von ca. 0,3 mm, Fehlertiefen von 0,15 bis 2,9 mm, Fehlerlängen von 1 bis 10 mm, Risseinlaufwinkel von 15 bis 90° (senkrechter Riss), Überdeckungen von 0,1 bis 2,8 mm.

Die untersuchten Werkstoffe umfassen sowohl ferritischen Stahl (S 235) als auch austenitischen Stahl (1.4301 bzw. X5CrNi18-10). Weitere Metalle wurde untersucht; die detaillierten Ergebnisse werden gesondert publiziert (Al-Knetlegierung EN AW-5754, halbhartes Cu-ETP F.25). Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgelistet.

senkrechte Oberflächen-Risse				
Werkstoff	Risstiefe [mm]	Risslänge [mm]	S/N [dB]	
S235	T ≥ 0,15	L ≥ 7,5	> 10	
	T ≥ 0,25	2 ≤ L < 7,5	> 10	
X5CrNi18-10	T ≥ 0,3	L ≥ 5	6	
	T ≥ 0,5	2 ≤ L < 5	6	
schräg einlaufende Oberflächen-Risse (Tiefe T senkrecht zur Oberfläche)				
Werkstoff	Risstiefe [mm]	Risslänge [mm]	Risseinlaufwinkel α [°]	S/N [dB]
S235	T ≥ 0,08	L ≥ 7,5	20° ≤ α ≤ 60°	> 10
	T ≥ 0,15	2 ≤ L < 7,5	20° ≤ α ≤ 60°	> 10
X5CrNi18-10	T ≥ 0,20	L ≥ 5	30° ≤ α ≤ 60°	6
	T ≥ 0,35	2 ≤ L < 5	30° ≤ α ≤ 60°	6
verdeckte, senkrechte Risse				
Werkstoff	Überdeckung: z	Risslänge [mm]	S/N [dB]	
S235	z ≤ 0,05 mm	L ≥ 7,5 mm	6	
X5CrNi18-10	z ≤ 1 mm	L ≥ 7,5 mm	6	

Tabelle 1. Nachweisgrenzen und zugehöriger Signal-Rausch-Abstand (S/N)

Bereich auf Gabel	B	C	D	E	F	Summe
Anzahl entdeckter Fehler IT (davon bestätigt durch Metallografie)	2 (2)	0 (0)	1 (1)	7 (7)	1 (1)	11 (11)
Anzahl entdeckter Fehler MT (davon bestätigt mit Metallografie)	3 (2)	1 (0)	6 (1)	21 (7)	7 (1)	38 (11)
Scheinanzeigen MT	1	1	5	14	6	27

Tabelle 2. Vergleich des Nachweisvermögens und der Prüfzuverlässigkeit an geschmiedeten Serienteilen (Gabeln [4]), vgl. Bild 3 (Magnetpulverprüfung = MT, induktiv angeregte Thermografie = IT)

Technik industriell erprobt

Aus den umfangreichen industriellen Erprobungen werden nachfolgend zwei Anwendungen für die induktiv angeregte Thermografie vorgestellt. In einer groß angelegten Studie [2] gemeinsam mit dem Verband für Massivumformung (Cold Forging Group) wurde das Verfahren für die Oberflächenrissprüfung von Schmiedeteilen eingesetzt (100 % Prüfung, Bild 3). Die zweite Anwendung zeigt die applikative Umsetzung mit entsprechenden Testergebnissen an der Linie für die Online-Prüfung von stranggegossenen Stahlangprodukten [3] (Bild 4).

In beiden Fällen wurde die Prüfempfindlichkeit gemäß den Vorgaben der Anwender eingestellt. Die Prüfaussagen wurden durch die Anwender selbst verifiziert, indem sie zum einen mit der bisher dort genutzten Magnetpulverprüfung (MT) verglichen wurde. Zum anderen nahm

man an besonders interessanten Probenbereichen metallografische Schliffuntersuchungen zur Verifikation der thermografisch angezeigten Fehlstellen (IT) vor. Die Tabellen 2 und 3 fassen die Ergebnisse für die beiden Anwendungen zusammen.

Die aktive dynamische Thermografie mit induktiver Anregung erfüllt die gestellten Anforderungen sowohl für die Serien- als auch für die Online-Prüfung an Bauteilen und Halbzeugen. Sie bietet darüber hinaus einige grundsätzliche Vorteile, wie z. B. der Verzicht auf Prüfmedien oder Chemikalien, die komplett berührungslose und voll automatisierbare Prüfung bei gleichzeitiger Erhöhung der Prüfzuverlässigkeit (Vermeidung von Scheinanzeigen), die beim Einsatz konventioneller Prüfmethode (Magnetpulverprüfung MT, Farbeindringprüfung PT, Wirbelstromprüfung ET) bedacht werden müssen.

Materialabmessungen	160 bis 210 mm Kantenlänge, bis 12 m Länge
Oberflächenzustand	gussrauhe, durch Strahlen entzünderte Oberfläche, Rauhtiefen: $55 \mu\text{m} < Rz < 70 \mu\text{m}$, Walzmarkentextur
Transportgeschwindigkeit	bis 1 m/s
geforderte Risstiefe	$T \geq 0,4 \text{ mm}$ für Längs- und Querfehler
min. Fehlerlänge	5 mm bei mind. 6 dB S/N
Genauigkeit Ortszuordnung	$\pm 10 \text{ mm}$
weitere Prüfmerkmale	Schalungen, Porenester
Besonderheiten	keine Scheinanzeigen, Längs- und Querfelder, senkrechte und schräg liegende Fehler auf Flächen und Kanten

Tabelle 3. Übersicht zur Leistungscharakteristik für die Prüfung von Strangguss-Rohmaterial

Aufgrund ihres hohen Automatisierungsgrades, ihrer unkomplizierten und vollkommen berührungslosen Prüf- und Handhabungstechnik sowie ihrer sicheren und zuverlässigen Prüfaussage stellt die induktiv angeregte Thermografie eine interessante und in der Gesamtbilanz zudem wirtschaftliche Alternative zu den oben genannten konventionellen Prüfverfahren

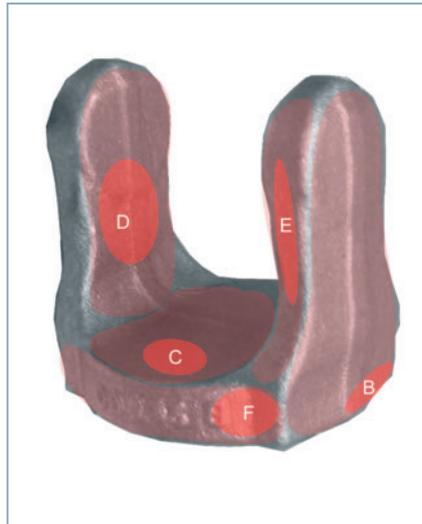


Bild 3. Kritische Prüfpositionen an einem geschmiedeten Großserienteil (Muster-Bauteil), vgl. Tabelle 2

dar. Die softwareseitig implementierte Signal- und Bildverarbeitung erlaubt eine schnelle, vollautomatische und objektive Fehleridentifikation [4] entsprechend der geforderten Nachweisempfindlichkeit. Als Prüfsystem lässt sich diese Technologie sehr gut in bestehende SPS-Umgebungen und Produktionsabläufe integrieren. □

Dr. Bernd Valeske, Günter Walle,
Dr. Udo Netzelmann

► **Fraunhofer-Institut für Zerstorungsfreie Prüfverfahren IZFP**
T 06 81/93 02-3989
bernd.valeske@izfp.fraunhofer.de
www.izfp.fraunhofer.de

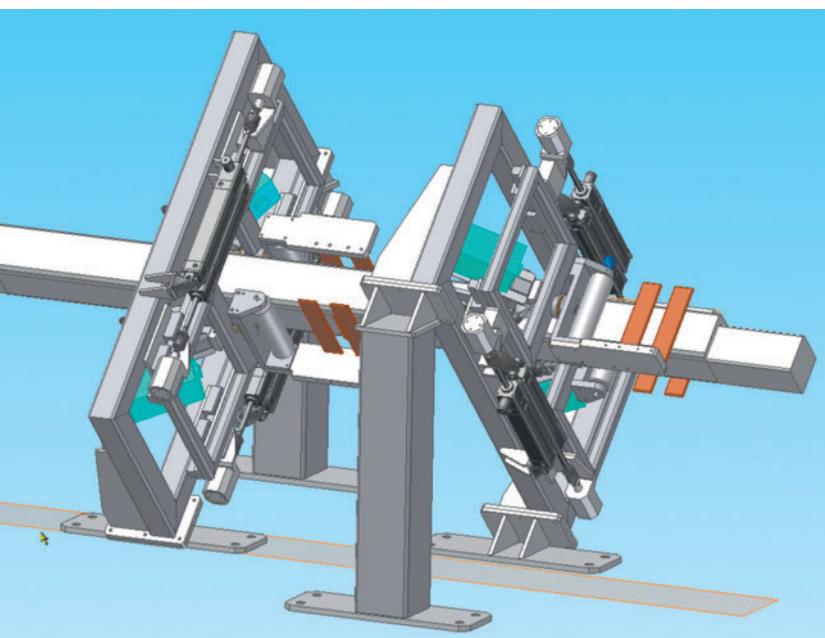


Bild 4. Umsetzungsbeispiel für die kontinuierliche, vollflächige Prüfung auf Längs- und Querfehler an Stranggusserzeugnissen (Prüfgeschwindigkeiten bis 1 m/s), Konzeption: Fraunhofer IZFP in Kooperation mit der Woll Maschinenbau GmbH (2006)