

Detektion von Rissen und Bestimmung der Risstiefe mit induktiver Thermografie

Beate OSWALD-TRANTA, Roland SCHMIDT, Bruno BUCHMAYR
Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Kurzfassung. In vielen Industriebereichen ist eine 100%ige Bauteilprüfung vorgeschrieben, wo mit zerstörungsfreien Prüfverfahren wie z.B. der Magnetpulverprüfung oder dem Farbeindringverfahren auf oberflächennahe Fehler geprüft wird. Mit diesen Verfahren lässt sich die Rissposition detektieren, nicht aber seine Tiefe, wodurch alle Bauteile mit einer Anzeige als fehlerhaft ausgeschieden werden. Bei der induktiv angeregten Thermografie, bei der das Bauteil kurzzeitig induktiv erwärmt wird, lassen sich Oberflächenfehler durch Analyse der Temperaturänderung an der Bauteiloberfläche detektieren. Diese Methode gibt zusätzlich die Möglichkeit, eine Abhängigkeit zwischen der lokalen Erwärmung im Fehlerbereich und der Risstiefe festzustellen. Mit der Information über die Fehlertiefe lässt sich für gefundene Defekte eine Grenze definieren, ohne dass das Bauteil automatisch durch jeden Fehler ausgeschieden werden muss. Da Thermografie ein bildgebendes und berührungsloses Verfahren ist, kann diese Prüfmethode vollkommen automatisiert und in die Prozesskette eingebunden werden.

Der Erwärmungsprozess und die Verteilung der Temperatur durch die Wärmediffusion um den Fehler herum wurden analytisch modelliert. Aus diesen Ergebnissen wurde ein Zusammenhang zwischen der Risstiefe und der Signalstärke abgeleitet, und dies mit Messergebnissen verifiziert. Fehler mit definierten Risstiefen in reproduzierbaren Kalibrierkörpern wurden einerseits mit Drahterodieren, andererseits mit Direktem Metall Laser Sintern (DMLS) erzeugt. Das zweite Herstellverfahren ermöglicht die gezielte Einbringung gewünschter Fehlergeometrien aus CAD-Daten beim schichtweisen Aufbau eines Körpers aus Metallpulver. Auf diese Weise lassen sich verschiedene definierte Fehler erstellen und die Messergebnisse mit der Theorie vergleichen.

1. Einführung

In vielen Industriebereichen ist eine 100%ige Bauteilprüfung vorgeschrieben, um Oberflächenrisse zu detektieren. Zerstörungsfreie Prüfverfahren wie z.B. Magnetpulverprüfung, Farbeindring- oder Wirbelstromverfahren werden derzeit hauptsächlich verwendet, um Risse zu lokalisieren. Diese treten bei metallischen Bauteilen beispielsweise infolge von Urform/Umformprozessen (z.B. Gießen, Schmieden, Walzen, usw.), von Wärmeeinflüssen (Härten, Schweißen) oder im Betrieb durch Belastungen (z.B. Schwingbruch oder Pittingbildung bei Wälzlagerschalen) auf. Um weitere Arbeitsschritte in der Prozesskette für fehlerhafte Teile zu vermeiden, sollten die Fehler so früh wie möglich detektiert werden. Dazu ist eine schnelle, möglichst automatisierbare, zerstörungsfreie und 100%ige Prüfung notwendig.



Für die Detektion von Rissen in Stahlprodukten werden derzeit hauptsächlich Wirbelstrom- und Magnetpulverprüfung verwendet, nachdem diese Methoden normiert sind. Mit diesen Verfahren lässt sich die Position der Risse detektieren, nicht aber die Tiefe der Defekte, wodurch alle Bauteile mit einer Anzeige von Irregularitäten als fehlerhaft ausgeschieden werden.

In den letzten Jahren wird Thermografie immer öfters als zerstörungsfreies Prüfverfahren eingesetzt [1-5]. Diese Methode ist derzeit noch nicht normiert, aber es wird an einer Normierung gearbeitet [6]. Bei der induktiv angeregten Thermografie, bei der das Bauteil kurzzeitig induktiv um 1-5°C erwärmt wird, fließt der induzierte Wirbelstrom um einen Oberflächenriss herum. Damit lassen sich Oberflächenfehler durch Analyse der Temperaturänderung an der Bauteiloberfläche detektieren. Induktive Erwärmung ist eine sehr effiziente Technik, nachdem die Wärme direkt im Material erzeugt wird und damit ist sie unabhängig von Oberflächeneigenschaften, wie Emissivität. Diese Methode gibt zusätzlich die Möglichkeit, eine Abhängigkeit zwischen der lokalen Erwärmung im Fehlerbereich und der Risstiefe festzustellen. Mit der Information über die Tiefe lässt sich für gefundene Fehler eine Grenze definieren, ohne dass das Bauteil automatisch durch jeden Defekt ausgeschieden werden muss. Nachdem Thermografie ein bildgebendes und berührungsloses Verfahren ist, kann sie voll-automatisiert in die Prozesskette eingebunden werden.

2. Detektion von Rissen

Für die Erwärmung der Proben wird ein 10 kW Induktionsgenerator verwendet, welcher durch eine SPS gesteuert wird. Damit kann sowohl die Leistung als auch die Pulslänge präzise eingestellt werden. Ein kurzer Heizpuls von 0.1-1s wird verwendet und damit erwärmt sich während des Heizpulses die Oberfläche des Werkstückes etwa 1-5°C. Während und nach der Heizung wird die Temperatur an der Oberfläche mit einer Infrarotkamera aufgenommen. In den hier präsentierten Messungen wurde eine IR-Kamera mit gekühltem InSb Detektor im Wellenlängenbereich von 1.5-5µm verwendet. Die Kamera nimmt 380 Bilder pro Sekunde mit einer 320x256 Pixel Auflösung auf.

Abb.1a zeigt die Infrarotaufnahme eines Drahtstückes nach einem Heizpuls von 0.1s. Die im Bild sichtbare Länge des Drahtes beträgt etwa 5cm. Ein Riss zieht sich durch die gesamte Länge des Drahtes, welcher im Temperaturbild durch eine stärkere Erwärmung sehr gut sichtbar ist. Nach den Messungen wurde von diesem Bereich des Drahtes ein Schliff gefertigt und die mikroskopische Aufnahme (Abb. 1e) zeigt eine Risstiefe von etwa 0.7mm.

Die Erwärmung des Drahtes ist mit guter Näherung homogen, aber einige leichte Kratzer und Oberflächeneffekte sind im Temperaturbild sichtbar. Für die Auswertung der Infrarotsequenz wird mit Hilfe der Fourier-Transformation ein Phasenbild erstellt (Abb.1c), wodurch Oberflächeneffekte, Emissivitätsunterschiede und der Einfluss inhomogener Erwärmung eliminiert werden [7]. Die Verwendung der Fourier Transformation wird im nächsten Kapitel näher erörtert.

Abb. 1b zeigt das Temperaturbild eines anderen Drahtstückes mit kleinerem Durchmesser. Bei diesem hat die mikroskopische Aufnahme des nachträglich gefertigten Schliffes eine Risstiefe von etwa 0.35mm gezeigt. Abb. 1d zeigt das Phasenbild, berechnet von der Infrarotbildsequenz. Beim Vergleich der Bilder 1c und 1d ist ersichtlich, dass beim tieferen Riss (Abb. 1c) ein deutlich größerer Phasenkontrast um den Riss herum auftritt, als beim seichteren Riss (Abb. 1d).

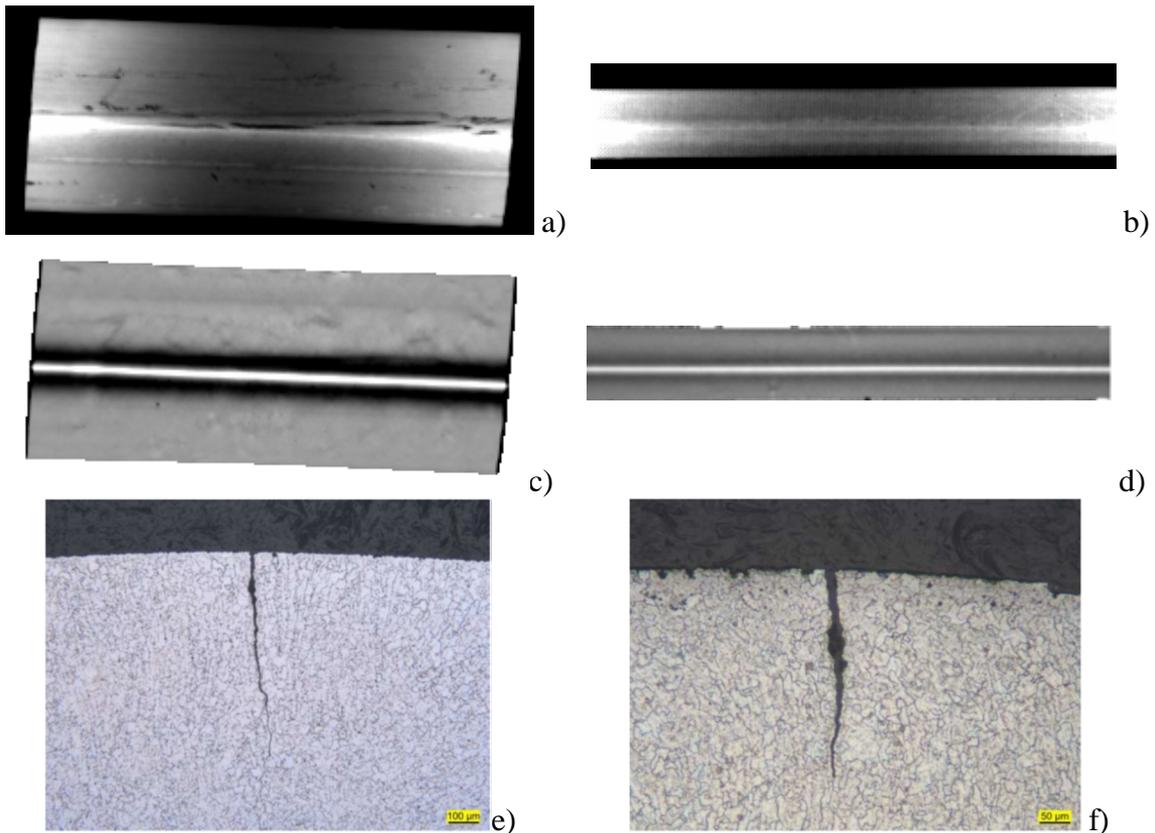


Abb. 1. a, b: Temperaturbilder von zwei Drähten nach 0.1s induktivem Heizpuls; c, d: die entsprechenden Phasenbilder der zwei Drähte; e, f: die mikroskopischen Aufnahmen von Schliffen zeigen, dass der erste Draht einen Riss mit 0.7mm und der zweite mit 0.35mm hat.

3. Ergebnisse der Modellrechnungen

Der Induktionsgenerator hat eine Arbeitsfrequenz von 150kHz. Dabei klingt die induzierte Wirbelstromdichte unter der Oberfläche exponentiell ab. Den Koeffizienten dieser exponentiellen Funktion bezeichnet man als Eindringtiefe und für einen typischen ferromagnetischen Stahl bei 150kHz Anregungsfrequenz beträgt sie etwa 40µm. Durch den ohmschen Widerstand entsteht Wärme im Material entlang des Stromflusses, die man Joule Erwärmung nennt.

In Modellrechnungen wird die geringe Eindringtiefe des Stromes in erster Näherung vernachlässigt und eine Oberflächenerwärmung angenommen. Nachdem der induzierte Wirbelstrom um den Riss herum fließen muss, werden die Oberfläche des Drahtes und die Seiten des Risses ebenfalls erwärmt. Damit wird dem Riss selektiv Wärme zugeführt, und so werden in den Infrarotbildern durch erhöhte Temperaturen die Risse sichtbar. Ein analytisches Modell wurde in früheren Publikationen präsentiert [5,8], welches die Erwärmung und den Temperaturverlauf um den Riss herum beschreibt. Hier werden nur die wesentlichsten Ergebnisse dieses Modells zusammengefasst.

Die Temperatur an der Oberfläche ($x=0$) einer fehlerfreien, unendlich dicken Probe bei konstanter Heizung steigt mit der Wurzelfunktion der Zeit , t ‘:

$$T_{fehlerfrei}(x=0,t) = \frac{2Q}{\lambda} \sqrt{\frac{\kappa t}{\pi}} \quad (1)$$

wobei κ die Temperaturleitfähigkeit, λ die Wärmeleitfähigkeit des Materials und Q den zugeführte Wärmefluss bezeichnet. An der Position des Risses ($y=0$) und an der Oberfläche ($x=0$) entsteht eine zusätzliche Temperatur von

$$T_{Riss}(x=0, y=0, t) = \frac{Q}{\lambda\pi} \left(d \operatorname{Ei} \left(\frac{d^2}{4\kappa t} \right) + 2\sqrt{\pi\kappa t} \operatorname{erf} \left(\frac{d}{2\sqrt{\kappa t}} \right) \right) \quad (2)$$

wobei d die Risstiefe bezeichnet. Auch aus diesen beiden Gleichungen ist es ersichtlich, dass der Wärmediffusionsprozess durch die Länge

$$d_{th} = 2\sqrt{\kappa t} \quad (3)$$

charakterisiert wird, die als thermische Diffusionslänge bezeichnet wird. Diese beschreibt, welche Strecke die Wärme innerhalb der Zeit t fließt. d_{th} beträgt für typischen ferro-magnetischen Stahl etwa 2.1mm, wenn $t=0.1s$, und 6.6mm wenn $t=1s$.

Mit diesem analytischen Modell wurde die zusätzliche Temperaturerhöhung, verursacht durch verschiedene Risttiefen, berechnet. Abb. 2a und 2b zeigen diese für eine Pulsheizung von 0.1s (Abb. 2a) und für 1s (Abb. 2b). Wie auch aus der Gleichung (2) ersichtlich ist, je tiefer ein Riss ist, desto höher die Temperatur an der Rissposition. Die zusätzliche Wärme, entstanden um den Riss herum, fließt seitlich ab und breitet sich etwa bis zu einem Abstand von $2d_{th}$ aus.

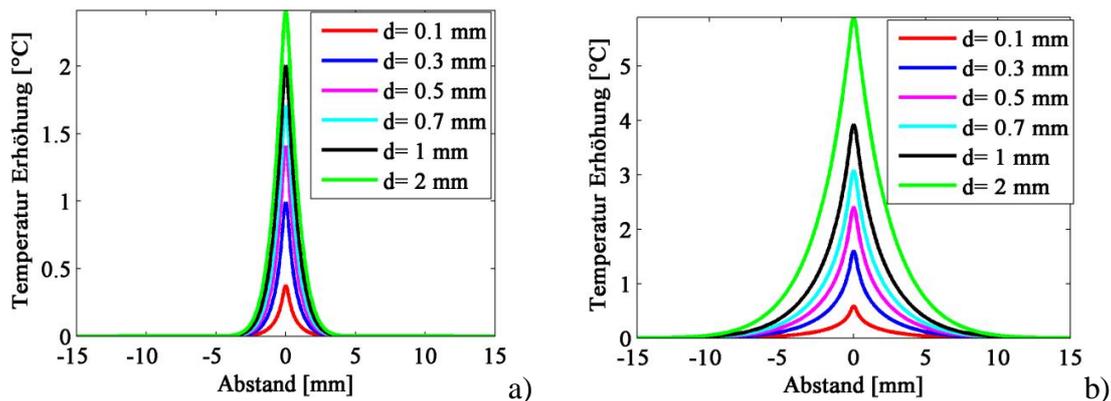


Abb. 2. Berechnete Temperaturerhöhung um verschieden tiefe Risse herum nach einem Heizpuls von 0.1s (a) und nach 1s (b)

Abb.3a zeigt den Temperaturverlauf an drei Positionen an der Oberfläche: an der Position des Risses; an einer Position weiter weg vom Riss, damit diese als fehlerfrei betrachtet werden kann und in einem Abstand von $d_{th}/2$ von der Rissposition. In Abb. 3b sind die Temperaturänderungen zeitabhängig dargestellt. Die Temperatur an der Rissposition ist die höchste, und damit steigt diese Funktion am schnellsten. Nach dem Abschalten der Heizung fließt die zusätzliche Wärme von hier schneller ab, als an der fehlerfreien Oberfläche.

In einem Abstand von $d_{th}/2$ steigt die Temperatur zuerst in gleichem Maß, wie an der fehlerfreien Oberfläche, beschrieben durch die Gleichung (1). Nach einer Zeit erreicht der zusätzliche Wärmefluss vom Riss diese Position, und die Temperatur steigt stärker, als bei fehlerfreier Oberfläche der Fall ist.

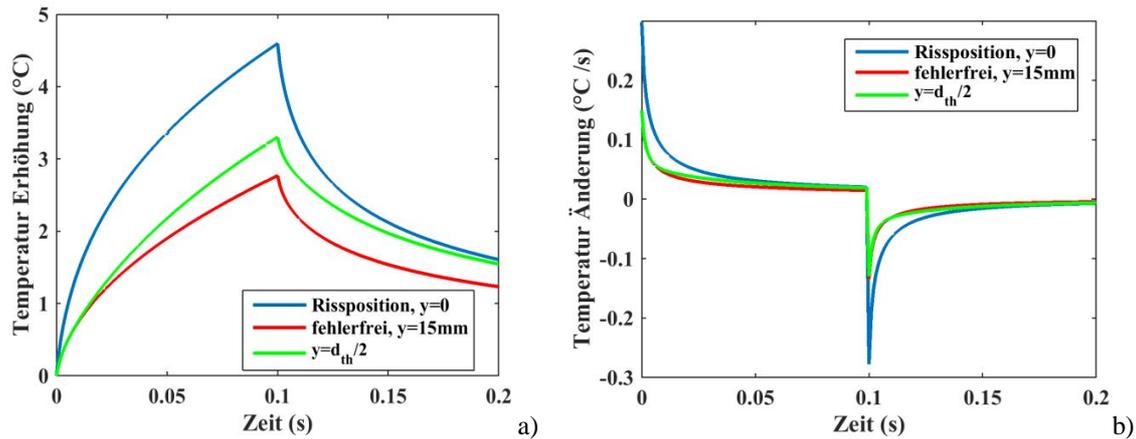


Abb. 3. a: Berechnete Temperatur –Zeit Funktion für einen Riss mit 0.7mm Tiefe, bei einem Heizpuls von 0.1s und nachher bei einer Abkühlphase von 0.1s; b) Zeitliche Ableitung der Funktionen in Abb. a.

Dieses Verhalten kann durch die Fourier Transformation in einem Phasenbild dargestellt werden [7]:

$$F_{\tau} = \int_0^{\tau} T(t) e^{-i2\pi t/\tau} dt \quad (4)$$

wobei $\tau = t_{Puls} + t_{Abkühlung}$. F_{τ} ist eine komplexe Zahl, deren Phase durch

$$\Phi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(F_{\tau})}{\text{Re}(F_{\tau})}\right) \quad (5)$$

bestimmt wird. Dieser Phasenwert, bestimmt für jedes Pixel der Infrarotaufnahme, wird als eigenes Bild dargestellt, wie in Abb.1c und 1d gezeigt ist. Nachdem dieser Phasenwert unabhängig von der Größe der Temperaturerhöhung ist, werden damit inhomogene Erwärmung oder Emissivitätsunterschiede eliminiert. Weiters wird Rauschen, welcher bei jeder Messung entsteht, durch die Fourier Transformation stark unterdrückt. Abb. 4a und 4b zeigen die berechneten Phasenwerte für verschiedene Risstiefen. Auf der x-Achse ist der relative Abstand aufgetragen: das Verhältnis des Abstandes vom Riss ($x=0$) und der thermischen Diffusionslänge.

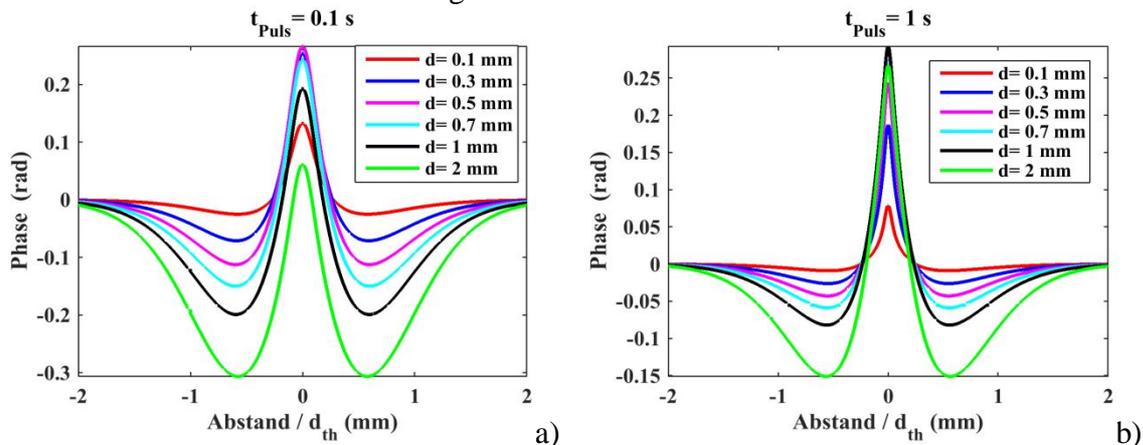


Abb. 4. Berechnete Phasenverteilung um verschieden tiefe Risse herum bei einem Heizpuls von 0.1s (a) und bei 1s (b)

Man erkennt aus diesen Diagrammen:

- Das Maximum der Phase befindet sich an der Rissposition, nachdem die Änderung der Temperatur da die größte ist;

- Je tiefer der Riss, desto größer der Kontrast zwischen Maximum und Minimum der Phase;
- Die Phase hat einen Minimumwert um $\frac{1}{2}$ herum, unabhängig von der Risstiefe und von Pulsdauer. An diese Stelle fließt die zusätzliche Wärme vom Riss, dadurch ist die Abkühlung verzögert, resultierend in einem kleineren Phasenwert.
- Der Riss beeinflusst den Phasenwert an der Oberfläche etwa bis zu einem Abstand von $2d_{th}$, nachdem die Wärme innerhalb der Zeit t' bis zu diesem Abstand fließt.

Abb. 5 zeigt die Temperaturerhöhung und den Phasenkontrast abhängig von der relativen Risstiefe, bezogen auf die thermische Diffusionslänge. Die Temperatur steigt monoton mit der Risstiefe und damit wäre sie für die Bestimmung der Tiefe geeignet. Andererseits, inhomogene Erwärmung und Emissivitätsunterschiede, wie kleine Oberflächenkratzer oder blanke Stellen beeinflussen die gemessene Oberflächentemperatur, und damit ist dies nicht zuverlässig genug. Demgegenüber, im Phasenbild sind diese Störfaktoren eliminiert und dadurch kann dies für die Bestimmung der Risstiefe verlässlicher zugezogen werden. Der Phasenkontrast steigt monoton an zu einer Risstiefe von etwa $d_{th}/3$. Dies bedeutet, dass die optimale Pulslänge dadurch bestimmt wird, welche Risstiefen aufgelöst werden sollten.

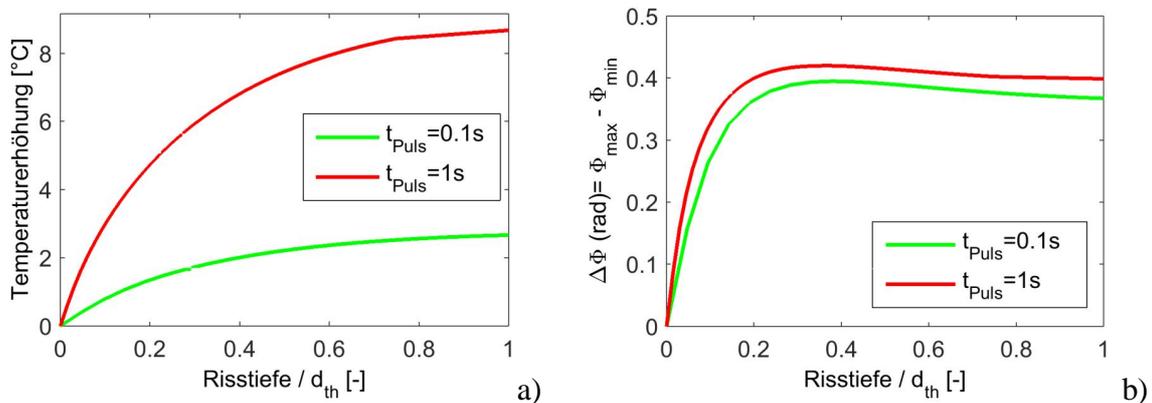


Abb. 5. Temperaturerhöhung an der Rissposition (a) und Phasenkontrast (b) abhängig von der relativen Risstiefe

4. Künstliche Fehler hergestellt durch Drahterodieren

Um reproduzierbare Fehler mit bestimmter Risstiefe, in einem Stahlwerkstück herzustellen (30mm x 60mm x 80mm), wurde ein Riss mit 3mm Tiefe durch Drahterosion eingeschnitten. Die Messung der Probe wurde mit einem 1s Heizpuls durchgeführt. Das Phasenbild ist in Abb. 6a dargestellt, in Abb. 6b ist das gemessene Phasenprofil mit der berechneten Verteilung verglichen. Die Phase ist an der Position des Risses die höchste und im Abstand von $d_{th}/2 = 3.3\text{mm}$ zeigt sie ein Minimum. Der Rand der Probe verhält sich wie ein sehr tiefer Riss, dadurch ist auch hier in einem Abstand von 3.3mm ein Phasenminimum sichtbar. Die gemessene und die berechnete Phasenverteilung stimmen gut überein, außer an der Rissposition. Der Durchmesser des Drahtes, welcher für die Drahterosion verwendet wurde, beträgt 0.25mm und der Schnitt selbst ist im Bild deutlich sichtbar. Daher zeigt der gemessene Phasenwert an der Rissposition einen Einschnitt, statt dem erwarteten Maximum.

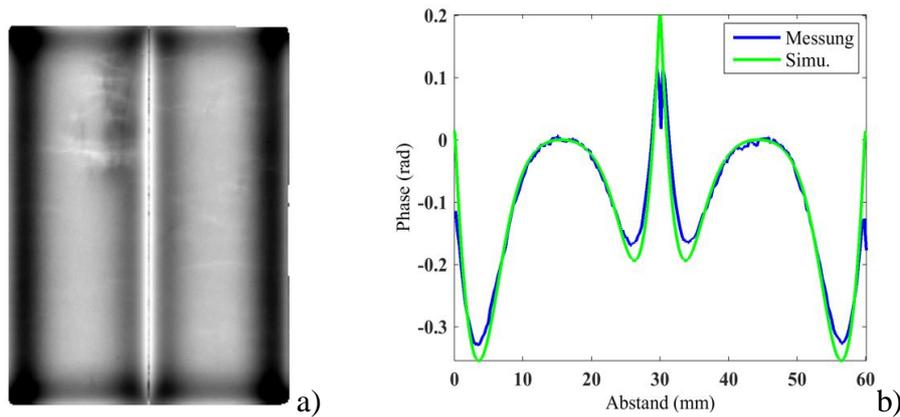


Abb. 6. a: Phasenbild des Probenstückes mit 3mm künstlichem Riss, Heizpulsdauer beträgt 1s; b: Vergleich des gemessenen und berechneten Phasenprofils

In die nächste Probe wurden 5 Risse mit der Tiefe 2, 1,5, 1, 0,75 und 0,5mm geschnitten. Das Phasenbild und der Vergleich der Phasenprofile sind in Abb. 7 dargestellt. Die Ergebnisse stimmen überein und der Phasenkontrast ist umso größer, je tiefer der Riss ist. Aber auch hier sind die Schnitte mit dem 0,25mm Drahtdurchmesser sichtbar, und dadurch ist das gemessene Phasenmaximum negativ beeinflusst.

Der größte Unterschied fällt bei dem Riss mit 0,5mm Tiefe auf. Bei diesem künstlichen Riss beträgt die Breite, entsprechend dem erodierenden Draht, 0,25mm, und die Tiefe ist 0,5mm. Dadurch hat dieser künstliche Riss nicht die geometrische Form eines sehr schmalen Risses, wie in den mikroskopischen Aufnahmen in Abb. 1e und 1f gezeigt wurde und wie es in den Berechnungen angenommen wurde. Sie zeigt eher die Form eines abgerundeten Rechtecks, siehe Abb.7c. Damit ist es verständlich, dass das Messergebnis für diesen Einschnitt nicht mit der Theorie übereinstimmt. Andererseits, diese Form entspricht auch nicht den Rissen, die in tatsächlichen Proben lokalisiert werden müssen. Damit entsteht das Problem, wie seichte künstliche Risse, die die geometrische Form eines tatsächlichen Risses aufweisen, erzeugt werden könnten.

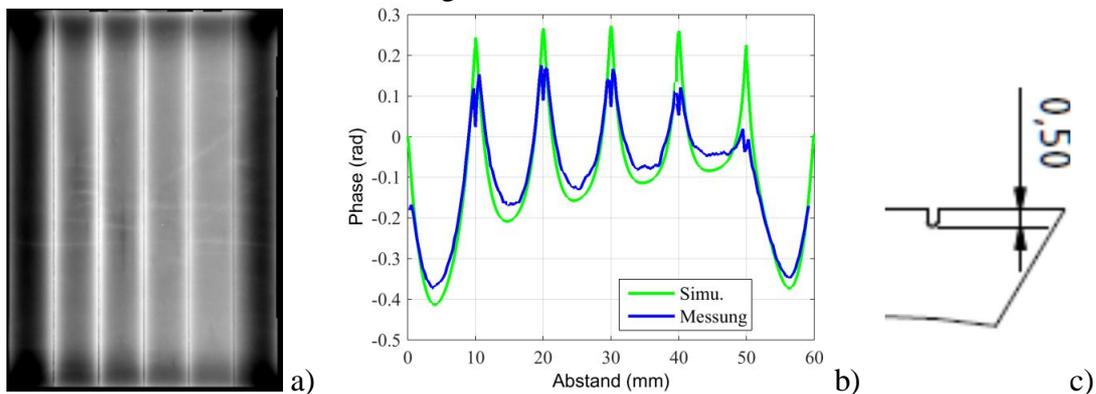


Abb. 7. a: Phasenbild des Probenstückes mit 5 verschieden tiefen künstlichen Rissen, Heizpulsdauer beträgt 1s; b: Vergleich des gemessenen und berechneten Phasenprofils; c) Skizze der Geometrie des kleinsten Risses mit 0,5mm Tiefe.

5. Künstliche Fehler hergestellt durch Metall Lasersintern

Weitere Probe mit künstlichen Fehlern wurde mit dem Direkten Metall Laser Sintern (DMLS) Verfahren hergestellt. Diese Technik erlaubt die gezielte Einbringung gewünschter Fehlergeometrien aus CAD-Daten beim schichtweisen Aufbau eines Körpers aus Metallpulver. Der Vorteil dieser Methode gegenüber dem Drahterodieren ist, dass

hiermit auch kurze Fehler erzeugt werden können, hingegen bei Drahterodieren muss die gesamte Länge der Probe geschnitten werden.

Abb. 8a zeigt die Probe mit verschiedenen Risstiefen und Risslängen. Die Risstiefe variiert zwischen 0.4mm und 1mm, und die Fehler in der ersten Reihe haben eine Länge von 10mm, in der zweiten und dritten Reihe sind sie 5mm lang. Abb. 8b zeigt die Fehlergeometrie und Messergebnisse für die zweite Reihe, wo die Fehlertiefe variiert wurde. Es ist ersichtlich, dass je tiefer ein Fehler ist, desto größer der Phasenkontrast.

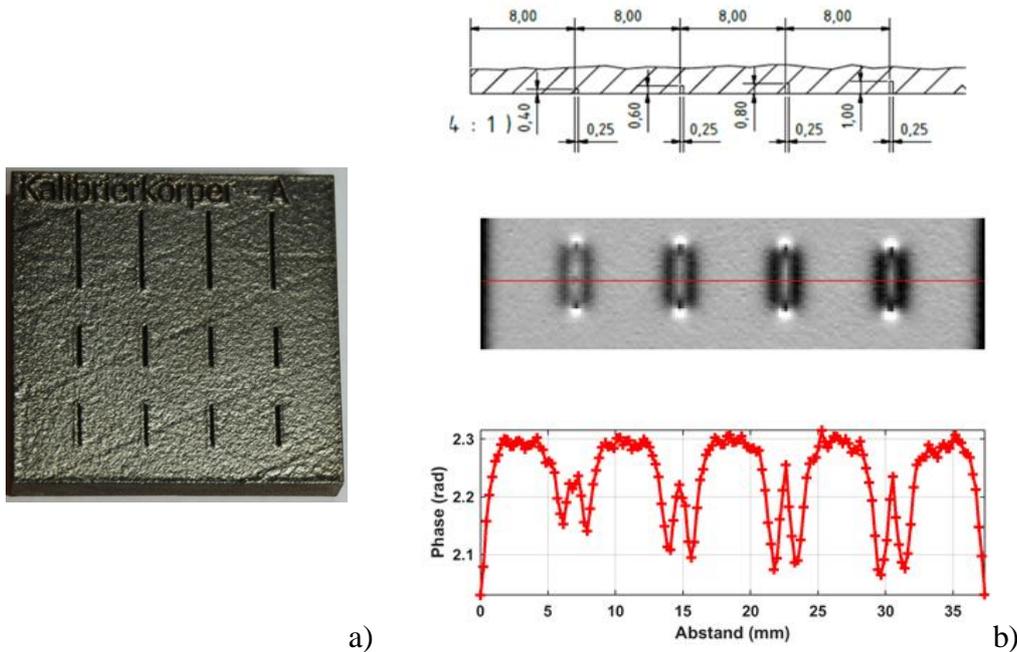


Abb. 8. a: Foto der mit Laser Sintern Verfahren hergestellten Probe; b, oben: Ausschnitt aus den CAD-Daten, Fehlergeometriedefinitionen für die mittlere Reihe; b, Mitte: Phasenbild der mittleren Reihe (Heizpuls = 0.1s); b, unten: Phasenprofil durch diese vier Fehler

Abb. 9 vergleicht die gemessene Temperatur- und Phasenverteilung um den 1mm Riss herum mit dem analytisch berechneten Verlauf. Es ist anzumerken, dass die Wärmeleitfähigkeit des gesinterten Materials geringer ist, als von Stahl, sie beträgt etwa die Hälfte. Damit ist auch die thermische Diffusionslänge, bzw. der Abstand zwischen Rissposition und dem Phasenminimum geringer, als bei den Proben im vorherigen Kapitel. Obwohl die Übereinstimmung der gerechneten und gemessenen Kurven sehr gut ist, ist an der Position des Risses die gemessene Phase geringer, als die berechnete. Dies kann durch die geringe Pixelauflösung der Messung erklärt werden. Bei Untersuchungen mit größerer Auflösung hat sich gezeigt, dass ähnlich wie bei den drahterodierten Proben, durch die Breite des künstlichen Fehlers die Phasenmaxima von den simulierten Werten abweichen.

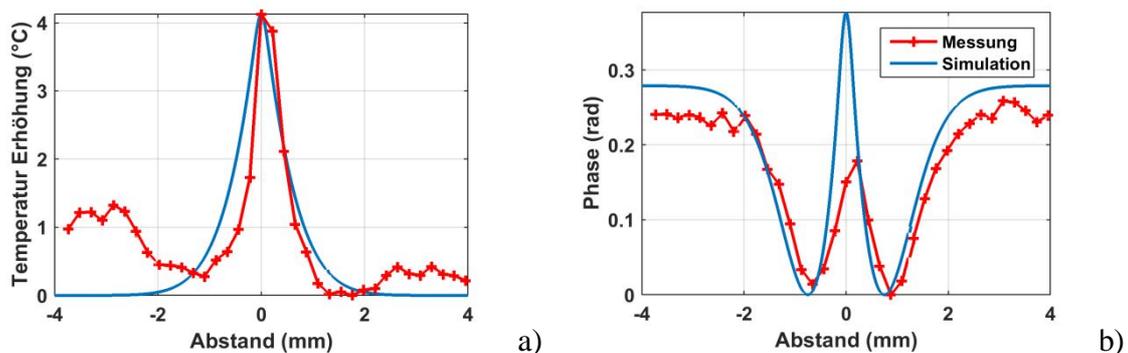


Abb.9. Vergleich der berechneten und gemessenen Temperatur- (a) und Phasenverteilung (b) für den Riss mit 1mm Tiefe, Heizdauer = 0.1s

In der ersten Reihe des Probenstückes wurde der Winkel der Fehler zur Oberfläche variiert. Die Messungen wurden mit Finite Element Simulationsergebnissen verglichen, aber die Erörterungen dieser Resultate gehen über den Rahmen dieses Artikels hinaus und werden in einer separaten Publikation präsentiert.

In der dritten Reihe wurde die Breite des Fehlers zwischen 0.08mm und 0.2mm variiert. Alle Fehler sind optisch sichtbar, siehe Abb. 8a, aber die Breite beeinflusst das Ergebnis so lang nicht, als die Tiefe des Risses mit seiner Breite keine vergleichbare Größe erreicht.

6. Ergebnisse für ‚natürliche‘ Risse

In den vorherigen Kapiteln wurden Ergebnisse für künstliche Fehler präsentiert. Wobei sich als wesentliches Problem der Unterschied in der geometrischen Form des Fehlers herausgestellt hat. Die Form des Risses und dadurch auch das Prüfsignal sind unterschiedlich, wenn der Fehler künstlich erzeugt wurde oder während eines Prozesses entstanden ist, wie in Abb. 1e und 1f gezeigt wurde. Für die zwei Risse, dargestellt in Abb. 1 wurden ebenfalls die Messungen und die Berechnungen verglichen, siehe Abb. 10. Die Ergebnisse stimmen sehr gut überein, außer an der Position des Risses, wobei dieser Unterschied allerdings geringer als bei den künstlichen Fehlern war. Für diese Abweichung konnten zwei Ursachen identifiziert werden:

- Die Pixelauflösung der Kamera ist geringer, als in der Simulation. Dadurch werden die schnellen und lokalen Temperaturänderungen an der Rissposition durch Mittelwerte ersetzt.
- In den Berechnungen wurde ein abruptes Einschalten der Heizung angenommen. Aber der Generator kann nicht so schnell die Leistung abgeben, und braucht etwa 30-50ms, bis die volle Heizleistung erreicht werden kann.

Mit Berücksichtigung dieser zwei Einflussfaktoren wurde eine korrigierte Kalibrationskurve für den Phasenkontrast berechnet, siehe Abb. 11. Dabei wurde einerseits eine Auflösung von 0.22mm/Pixel angenommen, andererseits eine Anstiegsdauer von 40ms, bis der Generator die volle Leistung erreicht. Der Phasenkontrast für kurze Heizdauer von 0.1s wird natürlich durch diesen langsameren Anstieg mehr beeinflusst als für die lange Heizdauer von 1s. Diese korrigierten Kurven können für die Bestimmung der Risttiefe bei Messungen verwendet werden und sie zeigen mit einer guten Näherung an, wie tief ein Riss tatsächlich in das Material eindringt.

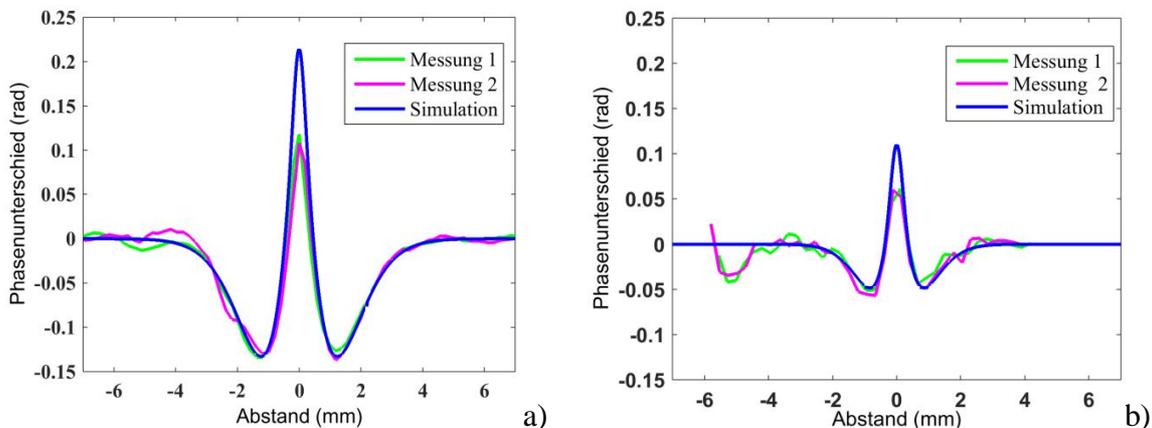


Abb. 10. Vergleich des gemessenen und berechneten Phasenprofils für die zwei Fehler, gezeigt in Abb. 1e (10a) und 1f (10b).

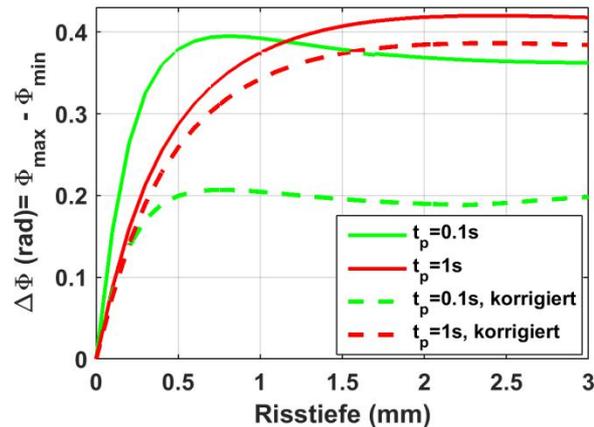


Abb. 11. Berechnete und korrigierte Kalibrationskurven für 0.1s und 1s Heizdauer. Für die korrigierte Kalibrationskurve wurde 0.22mm / 1 Pixel Auflösung und 40ms Einschaltdauer für den Generator angenommen.

7. Diskussion der Ergebnisse und Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass induktiv angeregte Thermografie ausgezeichnet für die Lokalisierung von Oberflächenrissen verwendet werden kann. Weiters wurde auch gezeigt, dass sowohl die Signalstärke, als auch der Phasenkontrast mit der Tiefe des Risses zusammenhängt und damit gibt diese Prüfmethode die Möglichkeit, dass ein Fehler nicht nur gefunden wird, sondern auch seine Tiefe abgeschätzt werden kann. Dafür wurden mit Hilfe eines analytischen Modells Kalibrationskurven abgeleitet.

Um die Prüfmethode zu kalibrieren, sind Proben mit künstlichen Rissen und mit bekannten Fehlergeometrien notwendig. Zwei Herstellungsverfahren wurden getestet: Drahterodieren und Direktes Metall Laser Sintern. Die zweite Methode hat den Vorteil, dass auch kürzere Risse und auch kompliziertere Fehlergeometrien hergestellt werden können. Aber die bisherigen künstlichen Fehler haben eine deutlich größere Breite und damit unterschiedliche Geometrie, als die tatsächlichen Fehler und dadurch werden auch Unterschiede in thermografischen Ergebnissen verursacht.

Bei den bisherigen Versuchen, seichte Fehler künstlich zu erzeugen, treten bereits Schwierigkeiten auf, wenn der Fehler 0.5mm tief sein soll. Andererseits konnten mit der thermografischen Prüfung von natürlichen Rissen auch sehr seichte Risse zuverlässig und reproduzierbar detektiert werden. Abb. 12 zeigt so einen Fehler mit einer Tiefe von 90 μ m. Bei der Bestimmung der Risstiefe mittels Schliff werden die Proben leider zerstört und können im Weiteren nicht für Kalibrationszwecke verwendet werden.

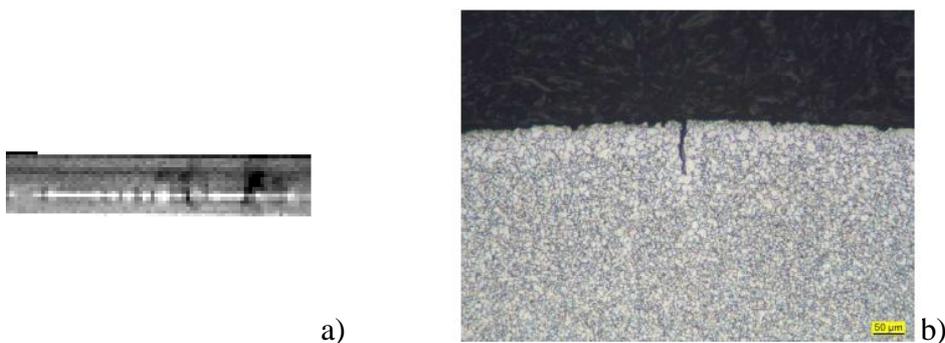


Abb. 12. a: Phasenbild eines Risses mit Markierung, wo dann ein mikroskopisches Schliffbild (b) gefertigt wurde, welches eine Risstiefe von 90 μ m zeigt.

Referenzen

- [1] K.J.Kremer, W.Kaiser, P.Möller, "Das Therm-O-Matic-Verfahren - ein neuartiges Verfahren für die Online-prüfung von Stahlerzeugnissen auf Oberflächenfehler", Stahl und Eisen 105 S.39-44, 1985.
- [2] G.Busse, "Verfahren zur phasenempfindlichen Darstellung eines effektmodulierten Gegenstandes", Patent No DE4203272, 1992.
- [3] J.Bamberg, G.Erbeck, G.Zenzinger, „EddyTherm: Ein Verfahren zur bildgebenden Rißprüfung metallischer Bauteile“ ZfP-Zeitung 68, p.60 – 62, 1999.
- [4] Riegert, G., Zweschper, T. and Busse, G., "Lockin thermography with eddy current excitation", QIRT Journal 1(1), 21–31 (2004).
- [5] Oswald-Tranta, B., "Thermoinductive investigations of magnetic materials for surface cracks", QIRT Journal 1(1), 33–46 (2004).
- [6] Ch. Maierhofer, P. Myrach, H. Steinfurth, M. Reischel, and M. Röllig, "Development of standards for flash thermography and lock-in thermography", 12. QIRT Conf., Bordeaux (2014).
- [7] Oswald-Tranta, B. "Time-resolved evaluation of inductive pulse heating measurements," QIRT Journal 6(1), 3–19 (2009).
- [8] Oswald-Tranta, B., "Thermo-inductive Crack Detection," Journal of Nondestructive Testing and Evaluation", 22(2), 137-153 (2007).