

Untersuchungen zur Bestimmung der Risstiefe mit induktiver Thermografie

Beate OSWALD-TRANTA
Montanuniversität, Leoben, Österreich

Kurzfassung. Bei induktiv angeregter Thermografie wird das Bauteil kurzzeitig induktiv erwärmt und die Oberflächentemperatur mit einer Infrarot Kamera aufgenommen. Nachdem die Eindringtiefe des Wirbelstromes bei ferromagnetischen Materialien sehr gering ist, fließt der Strom um einen Oberflächenriss herum, wodurch dieser selektiv erwärmt wird. Durch diese zusätzliche Erwärmung kann der Fehler in den IR-Bildern erkannt werden. Vergleiche ergeben, dass wenn statt eines einzigen IR-bildes die gesamte Sequenz ausgewertet wird, z.B. mittels Fourier Transformation, dann ist eine viel zuverlässigere Fehlerdetektion gewährleistet. Diese Methode gibt auch die Möglichkeit, eine Abhängigkeit zwischen der lokalen Bauteilerwärmung im Fehlerbereich und der Risstiefe festzustellen. Mit der Information über die Fehlertiefe lässt sich für gefundene Fehler eine Grenze definieren, ohne dass das Bauteil automatisch durch jeden Fehler ausgediebst werden muss.

Der Erwärmungsprozess, sowie die zeitliche und örtliche Verteilung der Temperatur durch die Wärmediffusion um den Fehler herum wurde mit analytischen Rechnungen und mit Finite-Element Simulationen modelliert. Aus diesen Ergebnissen wurde ein Zusammenhang zwischen der Risstiefe und der Signalhöhe abgeleitet, welcher dann mit Messergebnissen verifiziert wurde. Zusätzliche Untersuchungen wurden durchgeführt, wie die Orientierung und die Lage des Risses, bzw. der Winkel zwischen dem Riss und des induzierten Magnetfeldes das Ergebnis beeinflusst.

Um die detektierbaren Fehlertiefen ermitteln zu können, ist ein reproduzierbarer Kalibrierkörper mit definierten Fehlern notwendig. Da Defekte in unterschiedlichen Längen auftreten und ihre Orientierungen zur Oberfläche variieren, ist es notwendig diese künstlich nachzubauen. Eine Methode um künstliche Risse zu erzeugen ist Direktes Metall Laser Sintern (DMLS). Die hergestellten Teile mit den künstlichen Fehlern wurden dann mit Thermografie geprüft und die Ergebnisse mit den Rechnungen verglichen.

1. Einführung

In vielen Industriebereichen ist eine 100%ige Bauteilprüfung vorgeschrieben, um Oberflächenrisse zu detektieren und um fehlerhafte Teile auszusortieren. Zerstörungsfreie Prüfverfahren wie z.B. Magnetpulverprüfung, Farbeindring- oder Wirbelstromverfahren werden derzeit hauptsächlich verwendet, um Risse, die in Folge von Umformung oder Belastung entstehen, zu lokalisieren. Um weitere Arbeitsschritte in der Prozesskette für fehlerhafte Teile zu vermeiden, sollten die Fehler so früh wie möglich detektiert werden, wozu eine schnelle, möglichst automatisierbare, zerstörungsfreie und 100%ige Prüfung notwendig ist.



In der Industrie werden für die Detektion von Rissen in Stahlprodukten 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.

Es wurden schon einige Untersuchungen durchgeführt [7-8], wie die Signalstärke von der Tiefe des Risses abhängt, aber dies hat sich nur auf Fehler beschränkt, die ‚vertikal‘ sind, d.h. unter 90° zur Oberfläche ins Material eindringen. In dieser Veröffentlichung wird untersucht, wie der Neigungswinkel des Risses zur Oberfläche das Detektionssignal beeinflusst. Weiters werden Ergebnisse präsentiert, wie die Lage des Risses, d.h. der Winkel zwischen dem Riss und des induzierten Magnetfeldes auf das gemessene Signal auswirkt.

2. Berechnungen für vertikale Risse

In früher Publikationen [7-8] wurde ein analytisches Modell präsentiert, womit man im ferro-magnetischen Stahl die Temperatur- und die Phasenverteilung für vertikale Oberflächenrisse berechnen kann. Darüber hinaus wurde es auch gezeigt, wie man aus dieser Signalstärke die Tiefe des Risses abschätzen kann. In dieser Modellrechnung wird angenommen, dass die Eindringtiefe des induzierten Wirbelstromes vernachlässigbar klein ist und so mit Oberflächenwärmezufuhr gut beschreibbar ist. Bei typischem ferro-magnetischen Stahl und bei einer Anregungsfrequenz von 150 kHz beträgt die Eindringtiefe etwa 40 µm und damit ist sie in erster Näherung vernachlässigbar.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen für vertikale Risse kurz zusammengefasst, um in den nächsten für schräg liegende Risse die Untersuchungen zu erweitern.

Der induzierte Wirbelstrom wird durch den Riss abgelenkt, dadurch der Fehler selektiv erwärmt wird. Je tiefer ein Riss ist, desto höher ist der Temperaturanstieg an der Oberfläche. Die Breite der Erwärmungszone kann mit der sogenannten thermischen Diffusionslänge

$$d_{th} = 2\sqrt{\kappa t} \tag{1}$$

charakterisiert werden, wobei κ die Temperaturleitfähigkeit und t die Heizdauer bezeichnen. Abb.1. zeigt die Temperaturverteilung um verschieden tiefe Risse herum nach einer Heizdauer von 0.1 und 1 s. Auf der x-Achse ist der Abstand im Verhältnis zur thermischen Diffusionslänge aufgetragen.

Nachdem die Temperaturbilder von inhomogener Erwärmung und von Oberflächeneffekte, wie blank geschliffene Bereiche beeinflusst werden, sind sie nicht gut geeignet für eine zuverlässige Bestimmung der Risstiefe. Um bessere Ergebnisse zu erzielen, wird durch Fourier-Transformation ein Phasenbild berechnet [9]. Dabei wird sowohl die Erwärmungsphase als auch die Abkühlung berücksichtigt und ein Phasenbild wird für die Frequenz

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{t_{Puls} + t_{Abkühlung}} \quad (2)$$

berechnet.

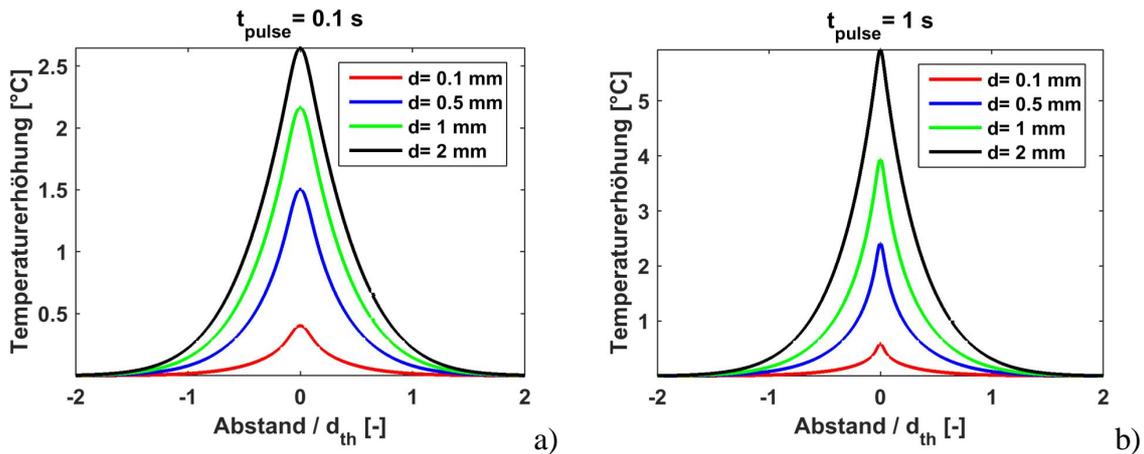


Abb. 1. Berechnete Temperaturerhöhung um verschieden tiefe Risse herum nach einem Heizpuls von 0.1s (a) und nach 1s (b).

Abb.2 zeigt die Phasenverteilung um die gleichen Risse herum, wie in Abb. 1. Die Phase weist unabhängig von der Risstiefe ein Minimum im Abstand von $d_{th}/2$ von der Rissposition auf. Dieses Phasenminimum entsteht dadurch, dass die zusätzliche Wärme vom Riss bis zu dieser Stelle geflossen ist, und dadurch dass ein kleiner Wärmestau entsteht, welcher durch einen kleineren Phasenwert bemerkbar wird.

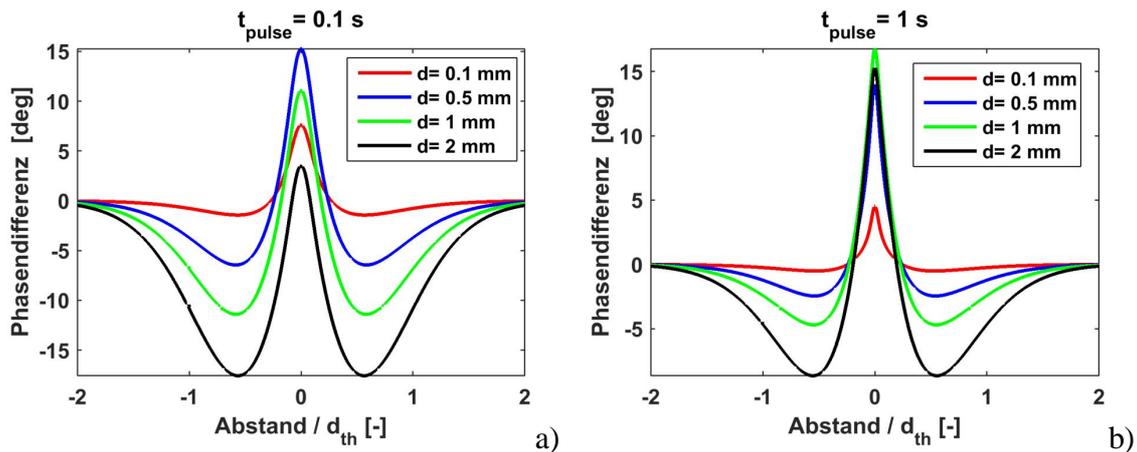


Abb. 2. Berechnete Phasenverteilung um verschieden tiefe Risse herum bei einem Heizpuls von 0.1s (a) und bei 1s (b)

Der Phasenkontrast, d.h. die Differenz zwischen dem Phasenminimum und dem Phasenmaximum an der Rissposition steigt, je tiefer ein Riss ist. Damit ist dieser Phasenkontrast zuverlässig geeignet, um die Fehlertiefe zu bestimmen [7,8].

3. Modellrechnungen mit FEM Simulationen

In vielen Fällen liegen die Risse nicht 90° zur Oberfläche, sondern neigen unter einem geringeren Winkel. Typische Überwalzungsfehler neigen sich etwa $45\text{-}60^\circ$ zur Oberfläche. Um den Erwärmungs- und Abkühlprozess für solche Fehler zu berechnen, wurde ein Finite-Element Simulationsmodell aufgesetzt, wobei die Risstiefe und sein Neigungswinkel variierbar sind. Für die Berechnungen wurde der kommerziell erhältliche Multiphysics Simulator von Ansys Inc. [10] verwendet. Abb. 3 zeigt z.B. die Temperaturverteilung nach 0.1 s Heizpuls um einen Riss herum mit 60° Neigungswinkel zur Oberfläche. Die Wärme fließt aus der Ecke langsamer ab, und so entsteht hier durch den Wärmestau eine höhere Temperatur. Aus den Temperaturwerten, ähnlich wie im vorherigen Kapitel, wird eine Phasenverteilung berechnet, siehe Abb. 3b. Der Wärmestau in der Ecke wird hier durch einen deutlich niedrigeren Phasenwert gekennzeichnet. Nachdem der Temperaturverlauf um die rechte und linke Seite des Risses nicht symmetrisch ist, ist auch die Phase um die Rissposition ($x=0$) stark asymmetrisch.

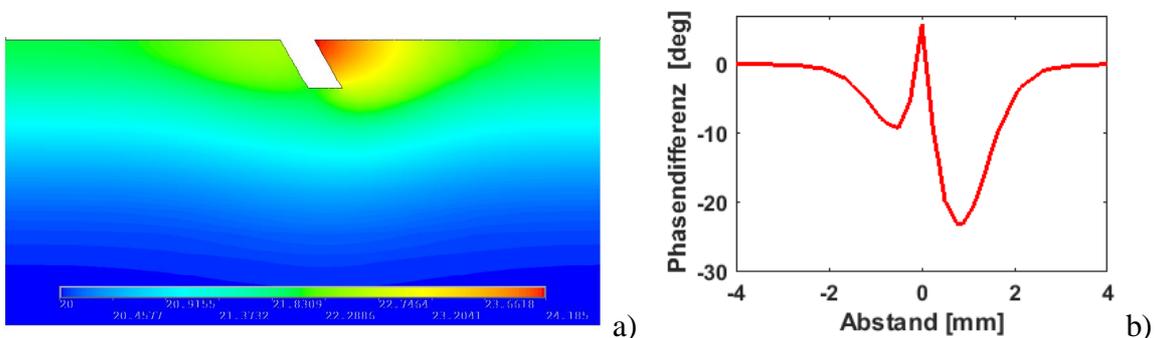


Abb. 3. a: Temperaturverteilung berechnet mit FEM-Simulation: Risstiefe = 0.6mm, Rissbreite = 0.5mm, Neigungswinkel = 60° , Heizdauer = 0.1 s; b: Phasenverlauf um den Riss, berechnet aus den simulierten Temperaturwerten

Im nächsten Schritt wurden die Ergebnisse der analytischen Berechnungen des vorherigen Kapitels und der FEM-Simulationen verglichen. Nachdem die analytischen Rechnungen nur für zur Oberfläche normal liegende Fehler gelten, wurden Ergebnisse für solche Risse gegenübergestellt und sehr gute Übereinstimmung gefunden. Die Minima und die Maxima der berechneten Phasenverläufe sind geringfügig verschoben, siehe Abb.4, aber der Phasenkontrast, d.h. die Differenz zwischen Maximum und Minimum, ist gleich geblieben. Die Abweichung in den Phasen ist auf die geringere Auflösung in den Zeitschritten und auf die größere Blockgröße der FEM Simulation zurückzuführen.

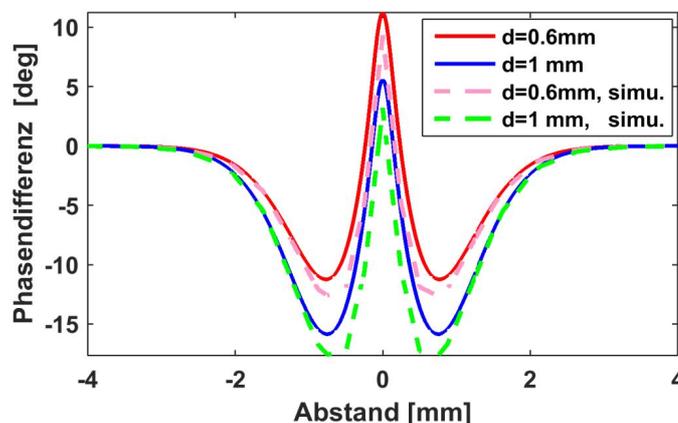


Abb. 4. Vergleich des Phasenverlaufs für zwei vertikale Risse, berechnet mit dem analytischen Modell (durchgezogene Linien) und mit FEM-Simulation (gestrichelte Linien)

Wenn sich der Riss zur Oberfläche neigt (Neigungswinkel = α), staut sich die Wärme immer mehr in der Ecke, je kleiner der Winkel ist. Demgegenüber ist auf der anderen Seite des Risses, bei dem stumpfen Winkel, der Wärmestau immer weniger, nachdem hier der Winkel zunimmt. Damit wird der Phasenverlauf um den Riss herum asymmetrisch. Abb. 5 zeigt für einige Neigungswinkel den berechneten Phasenverlauf. Wenn der Riss normal zur Oberfläche steht ($\alpha=90^\circ$), sind die Phasenminima auf beiden Seiten identisch. Je mehr sich der Riss zur Oberfläche neigt, wird das Minimum auf der linken Seite (stumpfer Winkel) höher und auf der rechten Seite (spitzer Winkel) niedriger.

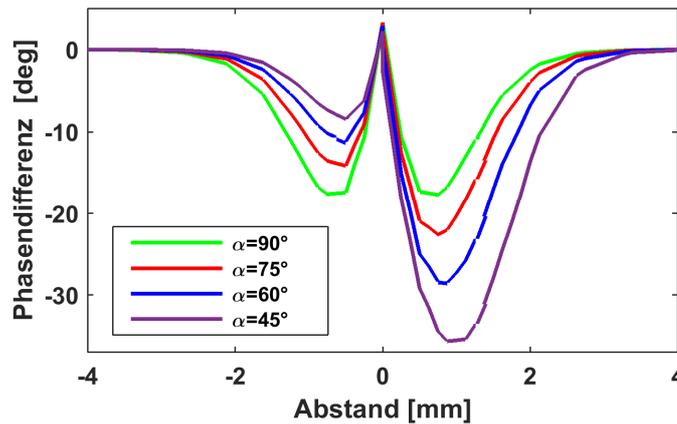


Abb. 5. Phasenverlauf für Risse mit unterschiedlichen Neigungswinkeln, die Risstiefe beträgt jedes Mal 1mm

Der Unterschied zwischen den beiden Phasenminima charakterisiert den Neigungswinkel und dies hängt mit guter Näherung linear vom Winkel ab, siehe Abb. 6a. Aber die Risstiefe selbst beeinflusst auch diesen Zusammenhang: bei einer geringeren Risstiefe ist bei einem bestimmten Neigungswinkel die Phasendifferenz kleiner. Die Risstiefe selbst kann durch den Mittelwert der beiden Minima bestimmt werden. Dieser Mittelwert ist etwa konstant, unabhängig vom Neigungswinkel, siehe Abb. 6b.

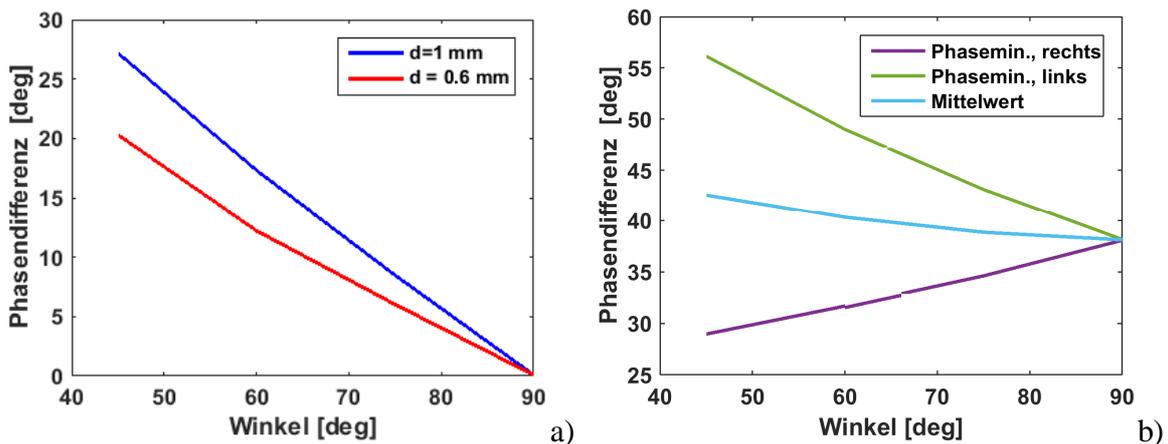


Abb. 6. a: Differenz zwischen den Phasenminima auf der rechten und linken Seite, dargestellt für die Risstiefe $d=1$ und 0.6 mm; b: beide Phasenminima und deren Mittelwert abhängig vom Neigungswinkel, die Risstiefe beträgt 1mm.

4. Messergebnisse für schräg liegende Risse

Um die berechneten Ergebnisse mit Messungen vergleichen zu können, wurde eine Probe mit künstlichen Fehlern 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. Die Probe selbst und Messergebnisse an vertikalen Fehlern wurden in der Publikation [8] präsentiert. Diesmal wurde eine andere Reihe der künstlichen Fehler untersucht, wo die Risse einmal vertikal sind und einmal 60° zur Oberfläche geneigt, siehe Abb. 7a. In Abb.7b ist das Phasenbild der vier Risse gezeigt und unterhalb (Abb. 7c) ein Profil durch dieses Phasenbild. Dieses Phasenprofil stimmt ausgezeichnet mit den vorherigen Rechnungen überein:

- Der tiefere Riss ($d=1\text{mm}$) hat einen größeren Phasenkontrast als der Riss mit einer Tiefe von 0.6 mm ,
- Der Phasenverlauf zeigt das asymmetrische Verhalten, wie es nach den Modellrechnungen erwartet ist,
- Beim tieferen Riss ($d=1\text{mm}$) ist der Unterschied zwischen den zwei Minima größer als beim seichteren Riss ($d=0.6\text{mm}$),
- Der Mittelwert der zwei Minima entspricht etwa dem Minimum, welches beim normal liegenden Riss zu beobachten ist.

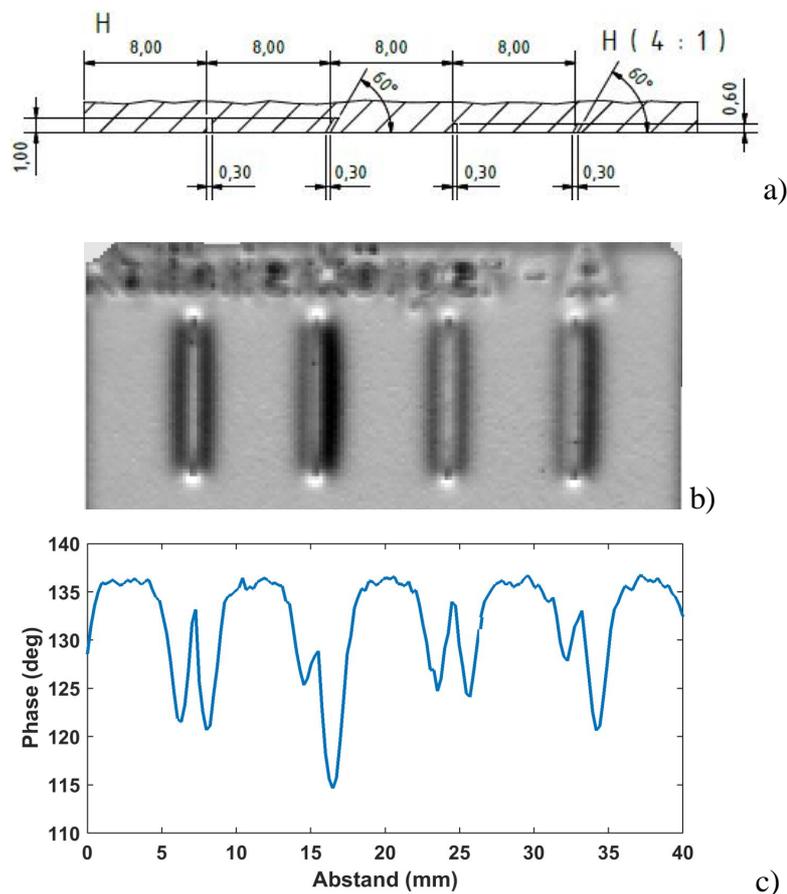


Abb. 7. a: Ausschnitt aus den CAD-Daten mit Fehlergeometriedefinitionen; b: Phasenbild (Heizpuls = 0.1s); c: Phasenprofil durch diese vier Fehler.

5. Untersuchungen für die Rissorientierung

Bei induktiv angeregter Thermografie, ähnlich wie bei Magnetpulverprüfung, beeinflusst der Winkel zwischen der Risslinie und der Magnetfeldstärke die Signalstärke. Gegenüber der Magnetfeldprüfung wird das Signal bei der thermografischen Untersuchung durch die Ablenkung des Wirbelstromes durch den Riss verursacht. Damit ist das Signal das stärkste,

wenn die Wirbelstromrichtung 90° zur Rissrichtung steht, und dementsprechend steht die Magnetfeldstärke parallel zur Rissrichtung [11]. Abb. 8 demonstriert dieses Verhalten an einem Fitting mit einem etwa 10 mm langen Riss im mittleren Bereich. Der Riss ist bei einem Winkel von 60° noch gut sichtbar. Aber bei 90° , wo der Riss parallel mit der Richtung des Wirbelstromes liegt, ist der Fehler nicht mehr erkennbar.

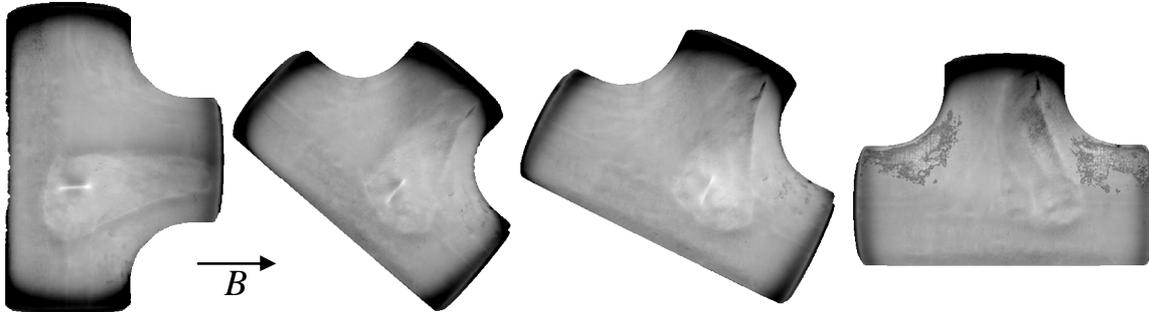


Abb. 8: Phasenbilder eines Fittings, wobei der Winkel zwischen der Rissorientierung und des induzierten Magnetfeldes (0° , 45° , 60° und 90° von links nach rechts) variiert wurde.

Abb. 9a zeigt Profile quer über den Riss bei diesen Messungen. Bei einem Winkel von 45° ist der Phasenkontrast etwa die Hälfte des Kontrasts bei 0° . In Abb. 9b sind die Phasenkontrastwerte abhängig vom Winkel aufgetragen. Der Phasenkontrast sinkt mit einem Wert zwischen $\cos(\beta)$ und $\cos^2(\beta)$. Dieser Zusammenhang kann damit erklärt werden, dass vom Wirbelstrom j der Teil $j \cdot \cos(\beta)$ normal auf den Riss trifft, dieser Teil wird vom Riss abgelenkt, damit ist dieser effektiv in der selektiven Erwärmung des Risses.

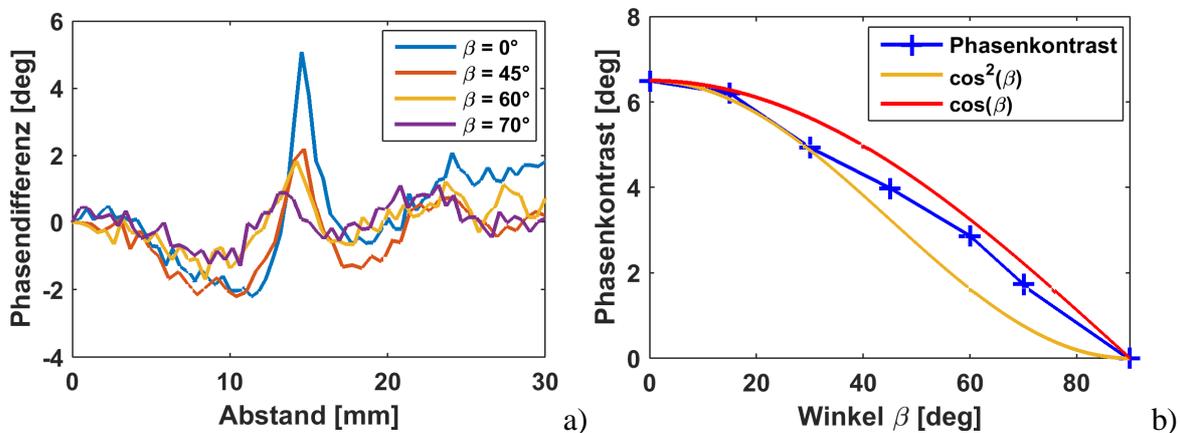


Abb. 9: a: Profile in den Phasenbildern der Abb.8 durch den Riss, bei verschiedenen Winkeln zwischen Riss und Magnetfeld; b: Phasenkontrast abhängig vom Winkel (β) zwischen Riss- und Magnetfeldrichtung

6. Erwärmungsmuster um kurzen Rissen herum

Die bisherigen Überlegungen gelten für den Fall, wenn der Riss lang ist und damit 1-dimensionale Rechnung angewendet werden kann. Wenn ein Riss kurz ist, entsteht ein typisches „Schmetterling förmiges“ Muster, siehe Abb. 10a. Dabei werden die Endpunkte des Risses warm, weil der Wirbelstrom hier nicht ins Material unter dem Riss abgelenkt wird, sondern er fließt an der Oberfläche um den Spitzen herum und damit entstehen hier eine Art von ‚Hotspots‘. Abb. 10b zeigt, wie dieses Muster sich ändert, wenn der Riss 45° zur Magnetfeldrichtung steht. Die Hotspots wandern auf die Seite der Spitze, wo der

Wirbelstrom um den Fehler herum fließt. Dementsprechend die Phasenminima, die dunkleren Bereiche, verschieben sich auch um den Riss herum.

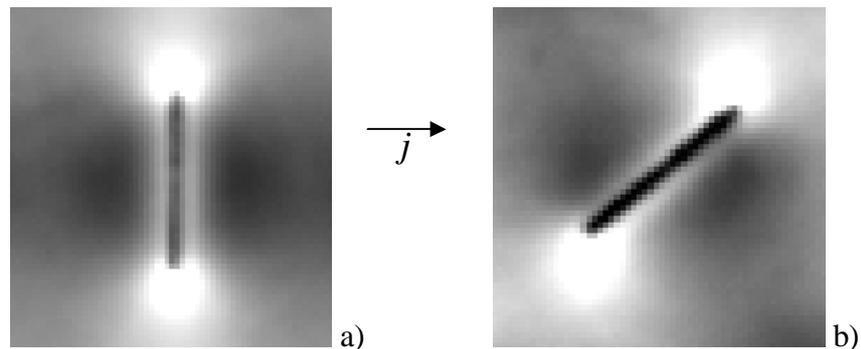


Abb. 10: Phasenbilder um einen vertikalen Fehler in der Laser gesinterten Probe, Risslänge= 5mm, Risstiefe=0,8mm; a: Riss steht 90° zur Wirbelstromrichtung (und damit parallel zum Magnetfeld); b: Riss und Wirbelstrom schließen 45° ein.

7. Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass die induktiv angeregte Thermografie ausgezeichnet geeignet ist, Risse in metallischen, speziell in ferro-magnetischen Materialien zu finden und auch die Tiefe des Risses abzuschätzen. Der Einfluss der Risslage und -orientierung auf den Phasenkontrast wurde untersucht und die Ergebnisse der analytischen Rechnungen mit FEM Simulationen und mit Messungen an Proben mit künstlichen Fehlern verglichen. Die gute Übereinstimmung der theoretischen und gemessenen Werte beweisen, dass die Methode schon reif genug ist, auch in der Industrie standardmäßig angewandt zu werden und sie bietet eine exzellente alternative Prüfmöglichkeit zu den gängigen Techniken, wie Magnetpulver- oder Wirbelstromprüfung.

8. Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei Prof. Buchmayr, Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben, für die Herstellung der Laser gesinterten Probe bedanken.

9. Referenzen

- [1] [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] B. Oswald-Tranta, R. Schmidt, "Crack depth determination with inductive thermography", in Proc. SPIE, Thermosense XXXVII, vol.9485, April 2015.

- [8] B. Oswald-Tranta, R. Schmidt, B. Buchmayr, „Detektion von Rissen und Bestimmung der Ristiefe mit induktiver Thermografie“, DACH Jahrestagung Salzburg, 2015.
- [9] B. Oswald-Tranta, "Time-resolved evaluation of inductive pulse heating measurements," QIRT Journal 6(1), 3–19 (2009).
- [10] ANSYS, Inc., [Online]. Available: <http://www.ansys.com>
- [11] B. Oswald-Tranta and M. Sorger, “Localizing surface cracks with inductive thermographical inspection: from measurement to image processing,” QIRT Journal, vol. 8, no. 2, pp. 149–164, 2011.