Rissdetektion in nicht-magnetischen und magnetischen Materialien mit induktiver Thermographie

Beate OSWALD-TRANTA
Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Kontakt E-Mail: beate.oswald@unileoben.ac.at

Kurzfassung. Induktiv angeregte Thermografie ist eine ausgezeichnete Prüfmethode um Oberflächenrisse in metallischen Teilen zu detektieren. Während und nach einer kurzen induktiven Erwärmung wird die Oberflächentemperatur mit einer Infrarot Kamera aufgenommen. Sowohl die Wirbelstromverteilung als auch der Wärmefluss wird durch einen Riss gestört und dadurch wird der Fehler im Infrarotbild erkennbar. Die Eindringtiefe des Wirbelstromes ist einerseits durch die Anregungsfrequenz, andererseits durch Materialeigenschaften, wie magnetische Permeabilität und elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Für magnetische und nicht magnetische Materialien kann die Eindringtiefe um Größenordnungen unterschiedlich sein. Wenn die Eindringtiefe im Vergleich zur Risstiefe klein ist, ist der Riss durch eine höhere Temperatur erkennbar. Aber wenn die Eindringtiefe etwa vergleichbar mit der Risstiefe ist, ist die Temperatur um den Riss herum niedriger. Diese Temperaturunterschiede gleichen sich mit der Zeit durch die Wärmediffusion aus. Dementsprechend muss für ein bestimmtes Material einerseits die Anregungsfrequenz, andererseits die Pulslänge so gewählt werden, dass Risse möglichst große Signalunterschiede erzeugen. Finite Element Simulationen wurden aufgestellt, um für verschiedene Metalle (magnetischen und nicht magnetischen Stahl, Aluminium, Titan) dieses Verhalten zu modellieren und eine Hilfe für die Auswahl der optimalen Frequenz- und Pulslänge zu geben.

Der Temperaturunterschied um einen Riss herum hängt auch von der Risstiefe ab. Eine zuverlässigere Fehlerdetektion ist gewährleistet, wenn statt ein einziges Infrarotbild die gesamte Bildsequenz mittels Fourier Transformation ausgewertet wird. Die so erhaltenen Phasenbilder geben eine bessere Möglichkeit Risse zu lokalisieren, aber auch ihre Tiefe abzuschätzen. Die Abhängigkeit des Phasenkontrasts von der Risstiefe wird zuerst mit FEM Simulationen untersucht, sowohl für magnetische als auch nicht-magnetische Materialien. Weiters wurden magnetische und nicht-magnetische Stahlkörper mit künstlichen, unterschiedlich tiefen Rissen erzeugt und Messergebnisse mit den Simulationen verglichen.

1. Einführung

Induktiv angeregte Thermografie wird immer mehr und mehr als Rissprüfungstechnik etabliert, nachdem sie eine ausgezeichnete Alternative zu früheren Methoden, wie Magnetpulverprüfung oder Eindringprüfung darstellt [1-3]. Der Vorteil der Thermografie ist einerseits die sehr gute Automatisierbarkeit, andererseits die Möglichkeit die Risstiefe abzuschätzen. Frühere Arbeiten haben sich damit beschäftigt, wie die Risstiefe für ferro-magnetischen Materialien die Signalstärke beeinflusst [2,4,5]. Diese Untersuchungen

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/

wurden nicht nur für vertikale Oberflächenrisse, die normal zu Oberfläche stehen, durchgeführt, sondern auch für schräg zu Oberfläche liegende Risse [6]. Für nicht-magnetische Materialien wurden auch schon einige Berechnungen bezüglich Wirbelstrom- und Temperaturverteilung gemacht, bzw. Messergebnisse präsentiert [7-8]. In diesem Paper ist das Hauptmerkmal auf die Abhängigkeit der Signalstärke von der Risstiefe und von Messparametern, wie Anregungsfrequenz und Pulslänge, gelegt. Im Anfangsteil werden Ergebnisse zusammengefasst, die schon publiziert wurden [2,9]. Weiters werden mittels Simulation- und Messergebnissen erörtert, von welchen Parametern die Phasendifferenz abhängt und wie diese in optimaler Weise für Risstiefenbestimmung verwendet werden können.

2. Induktive Erwärmung verschiedener Metalle

Bei induktiver Erwärmung werden Wirbelströme in der Oberflächenschicht des elektrisch leitenden Materials induziert. Im idealisierten Fall eines unendlich dicken Materials mit einer ebenen Oberfläche klingt die Wirbelstromdichte exponentiell unter der Oberfläche ab, deren Abklingkonstante als Eindringtiefe bezeichnet wird

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu_r \omega \sigma}} \tag{1}$$

Diese hängt einerseits von den magnetischen Eigenschaften des Materials, charakterisiert durch μ_r, und deren elektrischen Leitfähigkeit σ ab. Andererseits wird sie durch die Anregungsfrequenz ω beeinflusst. Durch den ohmschen Widerstand des Materials entsteht Wärme, die so-genannte Joule Wärme, deren Dichte unter der Oberfläche ebenfalls exponentiell abklingt. Nachdem die erzeugte Wärme quadratisch von der Stromdichte abhängt, beträgt die Abklingkonstante der Wärme $\delta/2$:

$$P(z) = P_0 \cdot e^{-z/(\delta/2)} \tag{2}$$

wobei P_0 die Joule Wärme an der Oberfläche bezeichnet:

$$P_0 = P(z=0) = \frac{|H_0|^2 \, \mu_0 \mu_r \, \omega}{2} \tag{3}$$

Dies hängt von H_0, dem Magnetfeld ab, welches durch die stromdurchgeflutete Induktionsspule erzeugt wird. Das Magnetfeld hängt von der Geometrie der Spule und vom Abstand zwischen Spule und der Metalloberfläche ab. Die gesamte Joule Wärme kann durch Integrieren berechnet werden [2,9]

$$P_{tot} = \int_0^\infty P(z) dz = P_0 \cdot \frac{\delta}{2} = \frac{\sqrt{2}}{4} |H_0|^2 \sqrt{\omega} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\sigma}} \tag{4}$$

Damit ist die gesamte induzierte Wärme proportional zur Wurzel der Anregungsfrequenz und der relativen Permeabilität und umgekehrt proportional zur Wurzel der elektrischen Leitfähigkeit.

Ferro-magnetische Materialien können ausgezeichnet wegen ihrer hohen relativen Permeabilität μ_r durch Induktion erwärmt werden. Auch in nicht magnetisierbaren Materialien kann Wärme erzeugt werden, wobei dies bei Materialien mit geringerer elektrischer Leitfähigkeit effektiver ist. Tabelle 1 fasst von einigen Metallen die relevanten elektrischen und thermischen Eigenschaften zusammen. Abb.1 zeigt für diese Metalle die Eindringtiefe des Wirbelstroms abhängig von der Anregungsfrequenz.

Tabelle 1. Materialparameter von einigen Metallen

Material	**Elektrische Leitfähigkeit σ [$\Omega^{-1}m^{-1}$]**	**Relative Permeabilität μ_r [-]**	**Thermische Leitfähigkeit λ [$W\ m^{-1}K^{-1}$]**	**Temperatur Leitfähigkeit κ [$m^2\ s^{-1}$]**	**t_{dth} laut Gl.6 [s]**
Titan	1.8e6	1	17	7.1e-6	0.035
Aluminium	3.3e7	1	218	1.2e-4	0.002
Kupfer	5.6e7	1	384	1.12e-4	0.002
AISI304 (nicht magn. Stahl)	0.7e6	1	16	4e-6	0.0625
Stahl (ferro-magnetisch)	1.85e6	600	40	1.16e-5	0.021

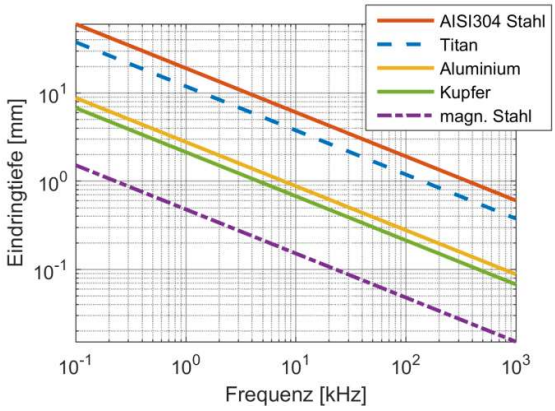

Abb. 1. Eindringtiefe des Wirbelstromes (δ) für fünf Metalle

Kommerzielle Induktionsgeneratoren werden meistens in zwei Frequenzbereichen angeboten: im mittleren- (MF) und im hoch-frequenten (HF) Bereich. Für die Rissprüfung in verschiedenen Materialien ist es essentiell zu wissen, mit welchem Generatortyp man im welchen Bereich der Eindringtiefe liegt. Diese Daten sind in Tabelle 2 zusammengefasst [9].

Tabelle 2. Eindringtiefe des Wirbelstromes (δ) für übliche Induktionsfrequenzen

Material	**50 Hz**	**MF-Generator**		**HF-Generator**	
		5 kHz	**30 kHz**	**50 kHz**	**450 kHz**
Titan	53 mm	5.3 mm	2.16 mm	1.68 mm	0.56 mm
Aluminium	12.4 mm	1.2 mm	0.5 mm	0.4 mm	0.13 mm
Kupfer	9.5 mm	0.95 mm	0.39 mm	0.3 mm	0.1 mm
AISI304 (nicht magn. Stahl)	85 mm	8.5 mm	3.5 mm	2.7 mm	0.9 mm
Stahl (ferro-magnetisch)	2.1 mm	0.21 mm	0.08 mm	0.07mm	0.02 mm

3. Erwärmung um einen vertikalen Riss

Die exponentielle Abklingfunktion der Wirbelstromdichte ist nur für eine halb-unendliche und ebene Oberfläche gültig. Im Falle von geometrischen Änderungen, wie z.B. Ecken oder Rissen, fließt der Wirbelstrom um diese herum, aber dringt nicht in die Ecken vollständig ein [7-8]. Finite Element Simulationen mit dem Multiphysik Simulator ANSYS [10] wurden Modelle aufgesetzt, um zuerst die Verteilung des Magnetfelds, des Wirbelstromes und der Joule Wärme zu berechnen, und in weiterer Folge die Temperaturverteilung nach

der Wärmediffusion zu bestimmen. In den Modellen wurden vertikale Risse untersucht, die 90° zur Oberfläche liegen und die lang genug sind, um die Verteilung mit einem 2D Querschnitt simulieren zu können.

Die Wirbelstromverteilung um einen Riss herum ist durch das Verhältnis der Risstiefe zu Eindringtiefe bestimmt. Abb.2 demonstriert dies für zwei Fälle, wenn die Eindringtiefe δ=0.1mm (a) und δ=1mm (b) um einen Riss mit d=0.5mm Tiefe beträgt. Wenn die Eindringtiefe gering ist, dann folgen die Stromlinien dem Riss und die Joule Wärme ist auch relativ gleichmäßig entlang den Rissflanken verteilt (Abb.2c). Demgegenüber, wenn die Eindringtiefe vergleichbar mit der Risstiefe ist, werden die Stromlinien vom Riss abgelenkt, und der Strom fließt nicht in die Ecken des Risses hinein. Dadurch entsteht in diesem Bereich kaum Wärme (Abb.2d). Aber an der Spitze des Risses, welche innerhalb des Materials liegt, bildet sich ein ‚hot spot' aus.

Es ist wichtig anzumerken, dass diese Verteilungen bzw. dieses Verhalten nur vom Verhältnis d/δ abhängt und vom Material selbst unabhängig ist. Es ist möglich eine geringe Eindringtiefe in einem ferro-magnetischen Stahl zu erzeugen, wenn niedrige Anregungsfrequenz verwendet wird, oder in einem nicht-magnetischen Material geringe Eindringtiefe zu haben, wenn die Induktion mit sehr hoher Frequenz angeregt wird.

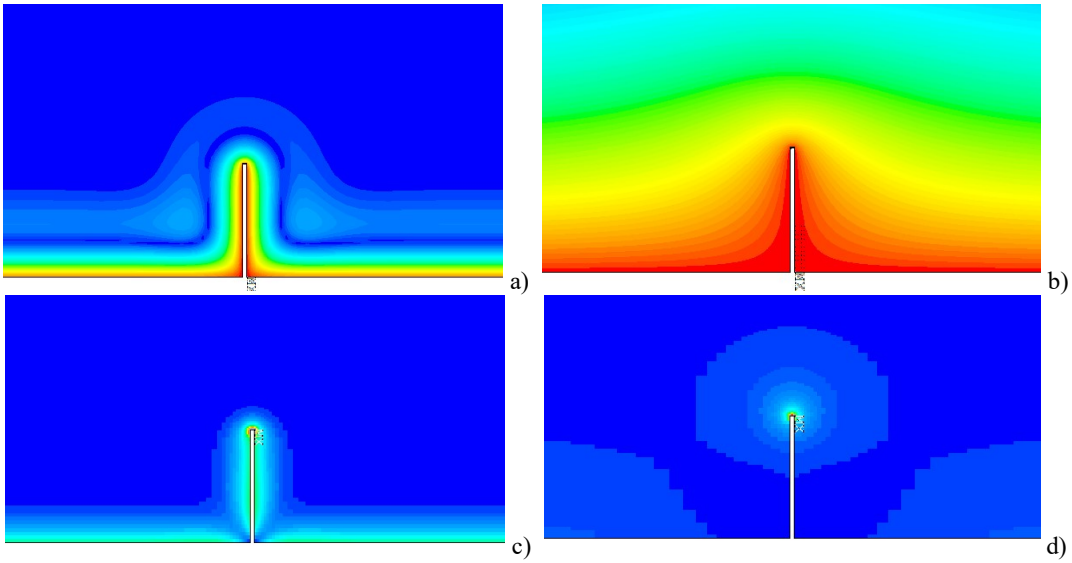

Abb. 2. Wirbelstromlinien (a, b) und Joule Wärme (c, d) um einen vertikalen Oberflächenriss mit einer Tiefe d=0.5mm; bei den Bildern (a) und (c) ist die Eindringtiefe δ=0.1mm und bei (b) und (d) beträgt sie δ=1mm.

4. Temperaturverteilung um einen vertikalen Riss

Im nächsten Schritt wird die durch die zugeführte Wärme entstandene Temperaturverteilung berechnet. Abb.3 zeigt für die gleichen zwei Fälle, wie in Abb.2, die Temperatur nach 0.1s Pulserwärmung. Ist die Eindringtiefe gering (Abb.2a, c und Abb.3a), dann folgt die Erwärmung die Linie des Risses und die Wärme staut sich in den Ecken. Damit wird der Riss an der Oberfläche durch höhere Temperatur sichtbar.

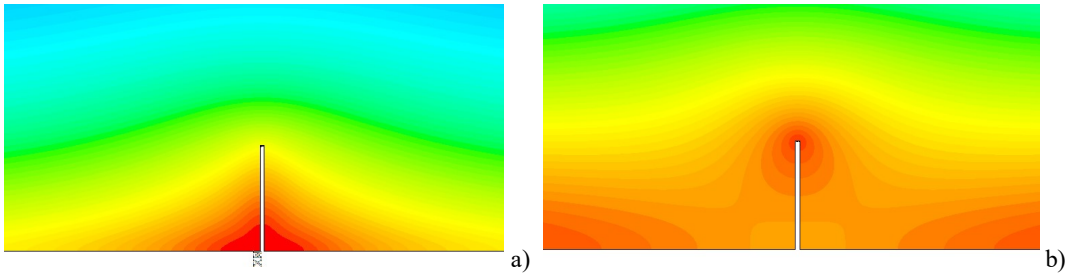

Abb. 3. Temperatur nach t=0.1s Pulserwärmung um einen Riss mit 0.5mm Tiefe; a: δ=0.1mm, b: δ=1mm.

Ist die Eindringtiefe des Wirbelstromes vergleichbar mit der Risstiefe oder größer (Abb.2b, d und Abb.3b), dann entsteht im Eckbereich des Risses kaum Wärme und dadurch erscheint der Rissbereich an der Oberfläche kühler als die fehlerfreie Oberfläche (Abb. 3b). Es ist anzumerken, dass diese Temperaturverteilung sich mit der Zeit durch die Wärmediffusion ständig ändert. Mit zunehmender Zeit fließt die Wärme in die Ecken hinein und kompensiert die ungleichmäßige Erwärmung.

Um dieses Verhalten zu charakterisieren, wird ein zeitabhängiger relativer Temperaturkontrast definiert:

$$C_R(t) = \frac{T_{Riss}(t) - T_{fehlerfrei}(t)}{T_{fehlerfrei}(t)} \tag{5}$$

Wenn dieser Kontrast positiv ist, ist die Rissposition wärmer als die fehlerfreie Oberfläche (kleine Eindringtiefe). Ist C_R negativ, dann ist der Rissbereich kühler (große Eindringtiefe). Abb.4a zeigt den relativen Kontrast für eine Risstiefe d=1mm für verschiedene Eindringtiefen. Um dieses Diagramm materialunabhängig darzustellen, wurde die x-Achse zu folgendem Wert normiert

$$t_{dth} = \left(\frac{d_0}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{\kappa}\ , \quad d_0 = 1mm \tag{6}$$

wo κ die Temperatur Leitfähigkeit bezeichnet, die in Tabelle 1 für die fünf Metalle aufgelistet ist. Im Allgemeinen kann ein Diffusionsprozess, wie auch die thermische Diffusion, durch die Diffusionslänge

$$d_{th} = 2\sqrt{\kappa t} \tag{7}$$

charakterisiert werden, welche den Abstand beschreibt, wie weit während der Zeit t die Konzentration fließt. Dementsprechend bezeichnet t_{dth} in Gleichung 6 die Zeit, in welcher die Wärme durch Diffusion in einen Abstand von 1mm fließt.

Aus den Kurven in Abb.4a ist es ersichtlich, dass für große Eindringtiefen und für kurze Pulsdauer der Kontrast negativ ist, aber mit der Zeit staut sich die Wärme in den Ecken des Risses und der Kontrast wird entweder leicht positiv (z.B. für δ=0.3 und 0.5mm) oder bleibt um 0 herum (wie z.B. bei δ=1mm). Abb.4b zeigt ein Beispiel, wo für kurze Erwärmungsdauer der Kontrast negativ ist, d.h. der Rissbereich ist kühler als die fehlerfreie Oberfläche. Nach längerer Heizdauer staut sich die Wärme in den Ecken um den Riss herum und der Kontrast wechselt zum positiven Wert.

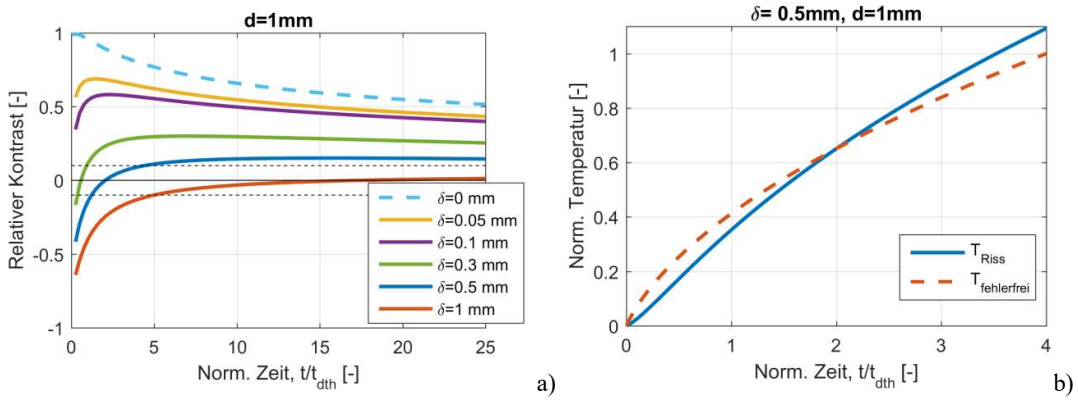

Abb. 4. a: Relativer Temperaturkontrast $C_R(t)$ abhängig von normierter Zeit, dargestellt für verschiedene Wirbelstromeindringtiefen; b: Temperaturverlauf an der Rissposition und weit weg vom Riss, der Kontrast wechselt mit der Zeit das Vorzeichen von negativ zu positiv.

Wenn die Wirbelstromeindringtiefe vernachlässigbar gering ist, wie es für ferro-magnetische Stähle mit hohen Anregungsfrequenz der Fall ist, kann ein analytisches Modell aufgestellt werden [2,11] um den Temperaturverlauf in der Rissumgebung zu berechnen. Das Ergebnis dieser Kalkulation ist mit Strichlinie in Abb.4a dargestellt. In diesem Fall ist der Kontrast bei sehr kurzer Heizdauer etwa 1, d.h. die Temperatur an der Rissposition ist etwa doppelt so hoch wie an der fehlerfreien Oberfläche. Mit längerer Pulsdauer gleicht sich dieser Unterschied ein wenig aus, und der Kontrast tendiert zu einem geringeren positiven Wert.

Risse kann man an der Oberfläche durch geringere oder durch höhere Erwärmung detektieren. Wird als Detektionslimit ein Kontrast von 0.1 angenommen, kann folgendes über die aufgelisteten 5 Metalle gesagt werden:

- Ferro-magnetischer Stahl: sowohl bei MF- als auch bei HF-Generatoren ist die Eindringtiefe sehr gering, damit können Risse mit einem hohen positiven Kontrast in weitem Heizdauerbereich detektiert werden.
- Nicht-magnetischer Stahl (AISI304): bei den üblichen Anregungsfrequenzen ist die Eindringtiefe groß ($\delta >$ 0.9mm), damit ist ein negativer Temperaturkontrast zu erwarten. Die Pulsdauer sollte unter $5t_{dth}$ liegen, damit $C_R(t) < -0.1$. Dies bedeutet eine maximale Pulsdauer von etwa 0.3s, berechnet mit dem t_{dth} Wert, angegeben in Tab.1.
- Titan: wenn die Frequenz kleiner als 140kHz ist, dann $\delta >$ 1mm, und Risse werden durch kühleren Temperaturbereichen detektierbar. Die Pulsdauer sollte unter $5t_{dth}$, d.h. unter 0.175s liegen, damit der Kontrast kleiner als -0.1 ist.
- Aluminium, Kupfer: bei niedrigerer Frequenz ($f <$ 5kHz) ist die Eindringtiefe um 1mm herum, aber wegen der sehr guten thermischen Leitfähigkeit beider Materialien $5t_{dth}$ entspricht einer sehr kurzen Pulsdauer von 0.01s. Während so kurzer Zeit ist in beiden Materialien kaum eine Erwärmung durch Induktion zu erreichen. Bei hohen Frequenzen ($f >$ 450kHz) ist $\delta <$ 0.1mm, was eine Rissdetektion ermöglichen könnte.

5. Rissdetektion mit Phasenbildern

Wenn statt einzelner Temperaturbilder der gesamte Zeitverlauf mittels Fourier Transformation ausgewertet wird, werden viel aussagekräftigere und zuverlässigere Ergebnisse erhalten [12]. Die so berechneten Phasenbilder sind kaum durch inhomogene Erwärmung oder durch inhomogene Oberflächeneigenschaften, wie Emissionsgrad beeinflusst und das Signal-Rausch Verhältnis ist auch deutlich höher.

Die Phasenunterschiede wurden für die gleichen ANSYS Simulationsmodelle, wie im vorherigen Absatz, für die Frequenz

$$f = \frac{1}{t_{Heizpuls} + t_{Abkühlung}} \tag{8}$$

berechnet, wobei $t_{Abkühlung} = t_{Heizpuls}$ gewählt wurde. Diese Phasenunterschiede sind in Abb.5 für die gleichen Eindringtiefen und mit der gleichen Normierung der x-Achse wie in Abb.4a dargestellt. Im Allgemeinen verursacht ein negativer Temperaturkontrast einen negativen Phasenunterschied, d.h. die Phase um den Riss herum ist geringer als an der fehlerfreien Oberfläche. Andererseits, wenn der Temperaturkontrast positiv ist, dann wird auch der Phasenunterschied positiv und der Riss kann durch höhere Phasenwerte detektiert werden. Aber nachdem bei der Phasenauswertung die gesamte Heizdauer und auch die Abkühlphase berücksichtigt werden, ist die Detektion in längeren Zeitbereichen möglich als beim Temperaturkontrast. Wenn für das Detektionslimit der Phasenunterschied 10° annimmt, dann kann man z.B. mit einer Eindringtiefe von δ=1mm etwa bis $15t_{dth}$ den Riss sichtbar machen, im Gegensatz zum Temperaturkontrast, wo nur $5t_{dth}$ möglich war.

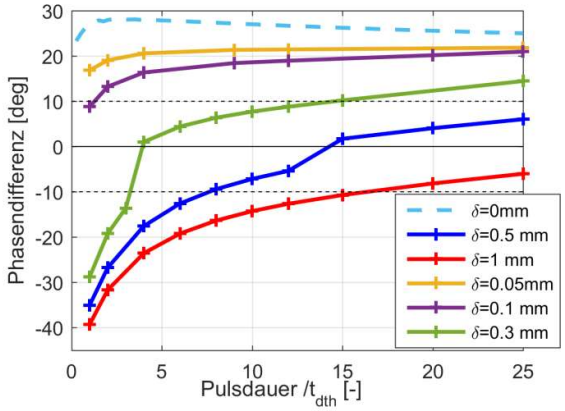

Abb. 5. Phasenunterschied zwischen Rissposition und fehlerfreier Oberfläche abhängig von Pulsdauer, normiert zu t_{dth}, dargestellt für verschiedene Wirbelstromeindringtiefen

6. Einfluss der Risstiefe

Die Risstiefe beeinflusst das detektierbare Signal [12]. Je tiefer der Riss, desto grösser als Absolutwert der Temperaturkontrast, bzw. der Phasenunterschied. In Abb.6 sind die Phasenunterschiede für die Risstiefe 0.5mm und 1mm dargestellt, simuliert mit der Eindringtiefe 0.1mm und 1mm. Auch der Verlauf entsprechend den analytischen Berechnungen für eine vernachlässigbar kleine Eindringtiefe wurde eingezeichnet. Bei allen Eindringtiefen ist der Phasenunterschied für die geringere Risstiefe (d=0.5mm) kleiner, nachdem diese eine geringere Barriere für die Wirbelstromverteilung und für die Wärmediffusion bedeutet.

Weiters ist es auch anzumerken, dass wenn die Eindringtiefe klein ist und die Phasendifferenz positiv ist, wird mit längerer Pulsdauer das Signal leicht höher und bleibt konstant. Demgegenüber, wenn die Eindringtiefe groß ist und die Phasendifferenz negativ, dann nimmt die Signalstärke ab. Dies ist das Resultat der Wärmediffusion, die die geringere Erwärmung in den Ecken des Risses und den Temperaturunterschied ausgleicht.

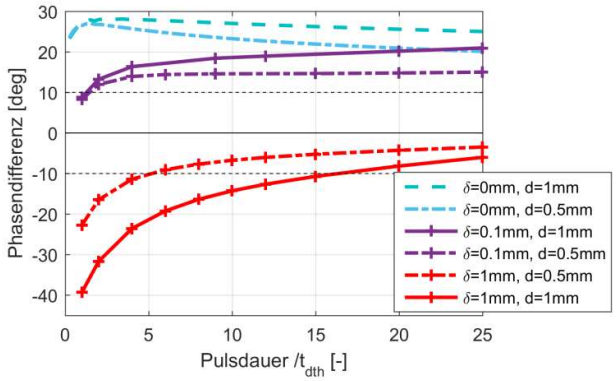

Abb. 6. Phasenunterschied zwischen Rissposition und fehlerfreier Oberfläche abhängig von Pulsdauer, normiert zu t_{dth}, für verschiedene Wirbelstromeindringtiefen und für die Risstiefe d=0.5 und 1mm

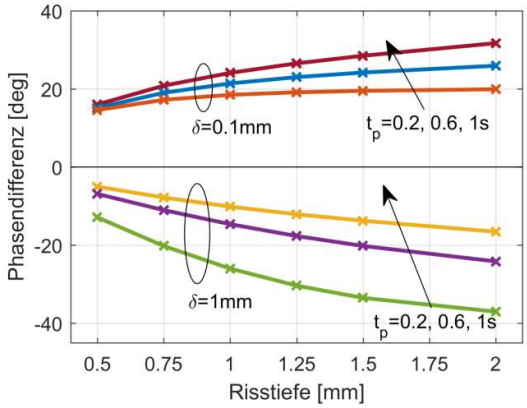

Abb. 7. Phasenunterschied in Abhängigkeit der Risstiefe, für drei verschiedene Pulsdauern und für zwei Eindringtiefen

In Abb.7 sind diese Ergebnisse noch deutlicher sichtbar:

- Je tiefer der Riss, desto grösser der Absolutwert der Phasendifferenz, was eine ausgezeichnete Möglichkeit bietet, die Risstiefe von der Signalstärke abzuschätzen;
- Wenn die Eindringtiefe gering ist (δ=0.1mm), dann nimmt mit zunehmender Heizdauer die Signalstärke geringfügig zu;
- Ist die Eindringtiefe groß (δ=1mm), dann wird mit zunehmender Heizdauer die Signalstärke weniger, d.h. die Risse können nur mit kurzen Heizpulsen detektiert werden.

7. Messergebnisse

Proben mit einem Außenmaß von 30 x 60 x 80 mm³ wurden aus ferromagnetischem und aus nicht-magnetischem (AIS304) Stahl gefertigt, und in beiden wurden mit Drahterosion vertikale Risse in Tiefen von 2, 1.5, 1, 0.75 und 0.5mm geschnitten. Die Teile wurden induktiv mit einer Anregungsfrequenz von 100kHz und mit verschieden langen Heizpulsen erwärmt und die Temperatur mit einer Infrarotkamera aufgenommen. Diese ist eine gekühlte Kamera mit InSb Detektor und die Aufnahmefrequenz war 380Hz. Von der IR-Bildsequenz wurden Phasenbilder berechnet. Ergebnisse sind in Abb.8 dargestellt. Diese stimmen mit den vorherigen simulierten Berechnungen sehr gut überein:

<u>Nicht-magnetischer Probekörper</u> (Abb.8 a und c):

- Die künstlichen Risse sind durch negative Phasenunterschiede erkennbar.
- Je tiefer der Riss, desto grösser ist im Absolutwert die Phasendifferenz.
- Mit kürzerem Heizpuls (t_p=0.2s) ist der Phasenunterschied grösser als bei längeren

Heizdauer (t_p=0.6s und 1s)

Magnetischer Probekörper (Abb.8 b und d):

- Die Risse zeigen höhere Phasenwerte, als die fehlerfreie Oberfläche.
- Je tiefer der Riss, desto grösser die Phasendifferenz.
- Mit längerem Heizpuls (t_p=1s) ist der Phasenunterschied grösser als bei kürzeren Heizdauer (t_p=0.6s und 0.2s).

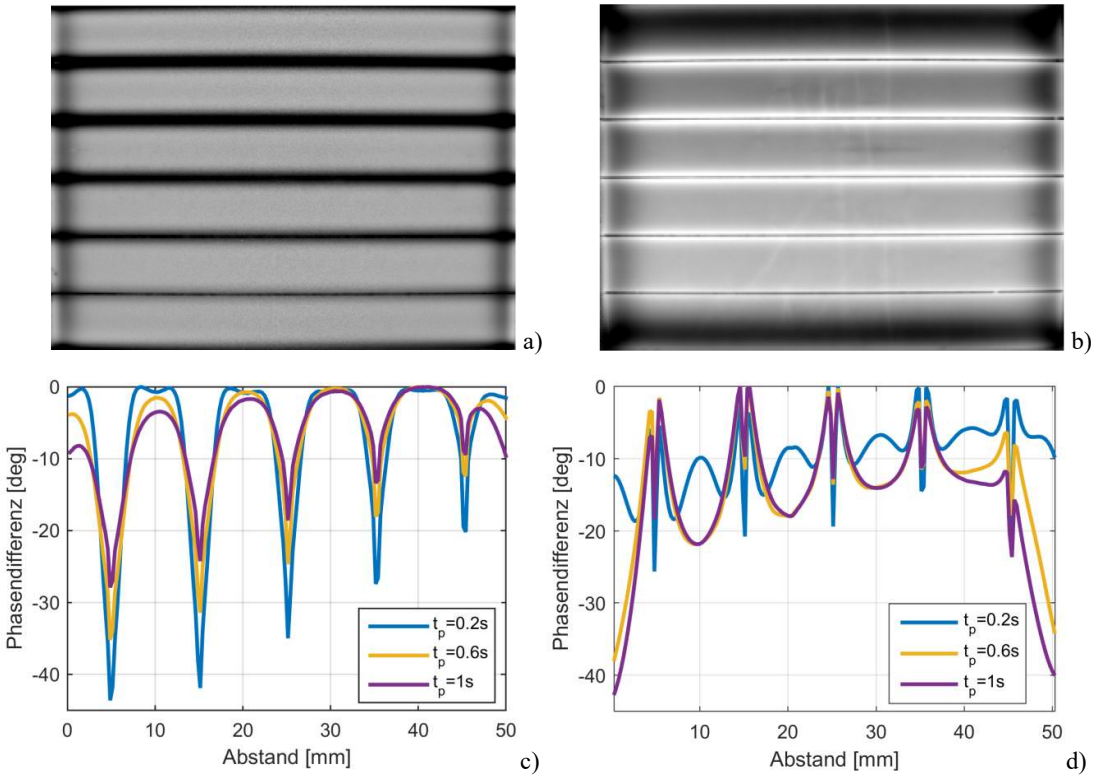

Abb. 8. Phasenbilder für nicht-magnetischen (a) und magnetischen Stahl (b), gemessen mit einem Heizpuls von 0.6s, die künstlichen Risse haben eine Tiefe von 2, 1.5, 1, 0.75 und 0.5mm, in der Reihenfolge von oben nach unten; Profil durch Phasenbild des nicht-magnetischen (c) und des magnetischen (d) Probekörpers mit drei verschiedenen Pulslängen, wobei die Risstiefe von links nach rechts abnimmt.

Die drahterodierten Risse sind etwa 0.3mm breit und die Schnitte selbst sind in den Phasenbildern erkennbar. Auffällig sind sie in den Ergebnissen für die ferro-magnetische Probe, in den Profilen sind da starke Einschnitte durch einen Pixel direkt an der Rissposition erkennbar. ‚Natürliche' Risse, die durch Produktionsfehler oder durch Ermüdung entstehen, weisen üblicherweise eine Breite von einigen µm auf [6], dadurch sieht die Kamera nicht in den Riss hinein.

8. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

In elektrisch leitfähigen Materialien können Oberflächenrisse durch induktiv angeregte Thermografie detektiert werden. Ferro-magnetischen Materialien kann sehr effizient Wärme zugefügt werden, aber auch in nicht magnetisierbaren Werkstücken wird Wärme erzeugt. Die Eindringtiefe des Wirbelstroms ist sehr unterschiedlich für die verschiedenen Materialien. Das Verhältnis von Risstiefe zur Eindringtiefe bestimmt, wie die Wärme um den Riss herum entsteht und dadurch ob eine höhere oder niedrigere Temperatur um den Riss herum zu erwarten ist. Dieser Temperaturkontrast ändert sich aber mit der Zeit wegen der Wärmediffusion und wird geringer.

Die Heizdauer und die Temperaturleitfähigkeit des Materials bestimmt die thermische Diffusionslänge, den Abstand, wie weit die Wärme durch Diffusion fließt. Das Verhältnis dieses Abstands und der Risstiefe bestimmt, in welcher Zeitdauer das stärkste Signal um den Riss herum auftritt.

Bei ferro-magnetischen Materialien wird mit der Anregungsfrequenz der üblichen Induktionsgeneratoren eine kleine Eindringtiefe erzeugt und damit sind die Risse durch positiven Temperaturkontrast, bzw. durch höhere Phasenwerte erkennbar. Mit längeren Pulsdauern, bis zu einem bestimmten Limit, wird die Signalstärke höher.

Bei nicht-magnetischen Materialien wird in einer größeren Eindringtiefe Wärme erzeugt, die etwa mit den zu detektierenden Risstiefen vergleichbar ist. Die Risse sind durch negativen Temperaturkontrast, bzw. durch negative Phasenunterschiede erkennbar. Dieser Unterschied gleicht sich durch die Wärmediffusion aus, deswegen erzeugt eine kürzere Heizdauer ein höheres Signal.

Je tiefer ein Riss ist, eine desto größere Barriere bedeutet er für den Wirbelstrom und für die Wärmediffusion. Damit nimmt die Signalstärke, sowohl als Temperaturkontrast als auch als Phasendifferenz, mit der Risstiefe zu. Dies ermöglicht nicht nur eine Lokalisierung des Risses, sondern auch eine Bestimmung der Risstiefe.

9. Referenzen

[1] B. Oswald-Tranta, "Thermo-inductive Crack Detection," Journal of Nondestructive Testing and Evaluation", 22(2), 137-153 (2007).

[2] B.Oswald-Tranta, “Automated thermographic non-destructive testing”, Habilitation, University of Leoben, Austria, (2012).

[3] U.Netzelmann, G.Walle, S.Lugin, A.Ehlen, S.Bessert, B.Valeske, “Induction thermography: principle, applications and first steps towards standardisation”, QIRT Journal 13(2), 170-181, (2016)

[4] B. Oswald-Tranta, “Untersuchungen zur Bestimmung der Risstiefe mit induktiver Thermografie“,Thermographie-Kolloquium, Stuttgart (2015).

[5] B. Oswald-Tranta, R. Schmidt, B. Buchmayr, „Detektion von Rissen und Bestimmung der Risstiefe mit induktiver Thermografie“, DACH Jahrestagung Salzburg, 2015.

[6] B. Oswald-Tranta, “Investigations for Determining Surface Crack Depth with Inductive Thermography”, Proc. WCNDT, Munich, (2016)

[7] B. Oswald-Tranta and G. Wally, “Thermo-inductive surface crack detection in metallic materials,” in Proc. 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, (2006).

[8] B. Oswald-Tranta, “Thermo-inductive crack detection,” J. Nondestructive Testing and Evaluation, vol. 22, no. 2, pp. 137–153, 2007.

[9] B. Oswald-Tranta, “Surface crack detection in different materials with inductive thermography”, in Proc. SPIE, Thermosense XXXIX, vol.10214, (2017).

[10] ANSYS, Inc., [Online]. Available: http://www.ansys.com

[11] B. Oswald-Tranta, "Thermoinductive investigations of magnetic materials for surface cracks", QIRT Journal 1(1), 33–46 (2004).

[12] B. Oswald-Tranta, "Time-resolved evaluation of inductive pulse heating measurements," QIRT Journal 6(1), 3–19 (2009).