

Induktive Puls-Thermografie in Reflexionsanordnung

Fabian HÖNL*, Martin KRASKA**, Jan RATHMANN*, Peter KÜHNER***

* inpro - Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH; fabian.hoenl@inpro.de

** FH Brandenburg

*** Audi AG

Kurzfassung. Mit Hilfe der Induktion von Wirbelströmen ist es möglich, in elektrisch leitfähigen Materialien schnell und berührungslos einen Temperaturgradienten zu generieren. Dies wird auch in der aktiven Thermografie zunehmend genutzt. Allerdings stoßen die üblichen Induktorgeometrien bei der immer wieder geforderten einseitigen Zugänglichkeit an ihre Grenzen. Dies äußert sich in Bereichen, die durch den Spulenkörper verdeckt werden und inhomogenen Temperaturprofilen. Nachfolgend soll ein neuartiges Induktorendesign vorgestellt werden, welches speziell für Messungen in Reflexionsanordnung geeignet ist und bei unterschiedlichen Prüfproblemen zum Einsatz kommen kann. Grundlegendes Prinzip ist das Schließen des Magnetfeldkreises über das zu prüfende Bauteil. Zunächst erfolgt die Darstellung der theoretischen Auslegung und Optimierung anhand von Finite-Elemente-Simulationen. Anschließend werden die Ergebnisse an zwei praxisrelevanten Fragestellungen erläutert - der Verbindungsprüfung einer Laserschweißnaht an Stahlblechen und der Detektion eines Schlagschadens in Kohlefaser-Verbundwerkstoff.

1 Einleitung

Die stetig wachsenden ökologischen und ökonomischen Anforderungen führten im Verkehrswesen zur heute weit verbreiteten Leichtbauphilosophie. Ein Schwerpunkt liegt hierbei auf alternativen Werkstoffen, welche die mechanischen Eigenschaften im Verhältnis zum Bauteilgewicht verbessern sollen. Allerdings reizen diese Materialien auch die konventionellen Fügeverfahren immer weiter aus oder verlangen nach gänzlich neuen. [1] Besonders unter dem Aspekt der fertigungsgerechten Konstruktion (engl.: design for manufacturing - DFM) wird deshalb nach Qualitätssicherungsmaßnahmen mit entsprechender Prüftechnik verlangt. Aber auch der Gesetzgeber fordert im Rahmen der Produkthaftung (PHG) eine lückenlose Dokumentation der Bauteilhistorie und eine mindestens zehnjährige Beobachtung, insbesondere von sicherheitsrelevanten Bauteilen. In diesem Kontext zahlen sich ein verringerter Ausschuss sowie der gezielte Wechsel von beschädigten Bauteilen direkt für den Hersteller aus. Unter dem Aspekt der Null-Fehler-Strategie bieten die zerstörungsfreien Prüfverfahren mit hundertprozentigen Prüfumfängen somit einen ganz erheblichen Mehrwert. Handelt es sich zusätzlich um bildgebende Methoden, sind Verfahren der klassischen Bilderkennung zur automatisierten Fehlerdetektion adaptierbar. Gleichzeitig ist eine schnelle und lückenlose Dokumentation



möglich. Da diese Anforderungen von der Thermografie erfüllt werden, erklärt sich auch ihre wachsende Verbreitung.

Besonders die aktive Thermografie bietet im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung ein hohes Potential. Dabei wird über eine externe Quelle die Wärme lokal, z. B. an der Oberfläche, in das Bauteil eingebracht. Die Störung des thermischen Gleichgewichtes führt zu einem Wärmefluss, welcher an Fehlstellen einen signifikant abweichenden Verlauf hat. Der resultierende Temperaturgradient kann mit einer Infrarotkamera aufgezeichnet werden. Als Anregungsquelle sind unterschiedliche Methoden denkbar, welche spezifische Vor- und Nachteile besitzen. Zu den gebräuchlichsten zählen die optischen Varianten mit Halogenstrahlern, Blitzlampen oder Lasern, die mechanische Stimulation mittels Ultraschall, die konvektive Anregung mit temperierten Gasen und die induktive Erwärmung durch Wirbelströme.

Im Folgenden ist der aktuelle Entwicklungsstand auf dem Gebiet der induktiven Thermografie dargestellt. Aufgrund der oftmals nur einseitig vorhandenen Zugänglichkeit wird das praxisrelevante Bedürfnis an geeigneten Induktoren abgeleitet. Der nächste Abschnitt erläutert die Entwicklung einer entsprechenden Geometrie mittels FEM-Simulation (Finite-Elemente-Methode). Mit dem realisierten prototypischen Induktoraufbau werden Messungen an einer nur teilweise angebondenen Schweißnaht und an einem Impactschaden in CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff; engl.: carbon-fiber-reinforced plastic - CFRP) durchgeführt. Basierend auf der Ergebnisdiskussion wird das Fazit gezogen und der Bedarf an weiterführenden Untersuchungen herausgestellt.

2 Kenntnisstand

Die induktive Anregung mit Wirbelströmen bietet eine Reihe von Vorzügen. Es lassen sich berührungslos relativ hohe Temperaturhübe in kurzen Zeitabschnitten generieren. Dies ist besonders für die Pulsthermografie an Materialien mit hoher Temperaturleitfähigkeit interessant, da ansonsten die Fehlerkontraste aufgrund von sofort einsetzenden Ausgleichsvorgängen verwaschen. Zusätzlich bietet eine Variation der Induktionsfrequenz f_{ind} die Möglichkeit der gesteuerten Heiztiefe. Generell sinkt die Eindringtiefe mit steigender Frequenz ($\omega = 2\pi \cdot f_{ind}$). Allerdings fließen in die Formel 1 zur Skintiefe δ_s noch die Konduktivität σ und die Permeabilität μ als elektrische und magnetische Leitfähigkeit des Werkstoffes ein.

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}}$$

Formel 1

Tabelle 1: Materialkennwerte zur Berechnung der Eindringtiefe

	Konduktivität in 10^6 S/m	Permeabilität in 10^{-6} H/m
Stahl	10,02	879,65
Aluminium	36,59	1,26
CFK	0,001	1,26

Somit handelt es sich sowohl um eine stoffspezifische als auch frequenzabhängige Größe, die in Abbildung 1 für Aluminium, Stahl und CFK doppelt logarithmisch dargestellt ist. Die zur Berechnung notwendigen Werte sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Die Permeabilität μ bildet das Produkt der stoffspezifischen Permeabilitätszahl μ_r und der magnetischen Feldkonstante μ_0 , welche die Permeabilität im Vakuum abbildet und $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m beträgt.

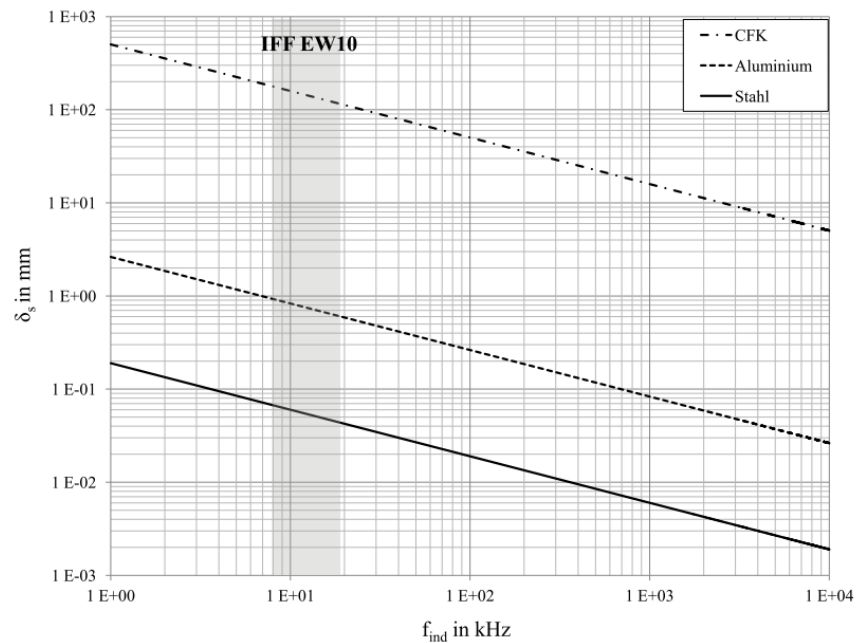


Abbildung 1: Eindringtiefe der Wirbelströme als Funktion der Induktionsfrequenz

Die Generierung der Wärme erfolgt direkt im Material. Folglich ist keine Übertragung mittels Konvektion, Strahlung oder Wärmeleitung erforderlich. Das Verfahren ist somit unabhängig von Materialparametern und Umgebungsbedingungen, wie dem Absorptionsgrad oder der Wärmeübergangszahl. Allerdings funktioniert die Induktion von Wirbelströmen nur an elektrisch leitfähigen Materialien, weshalb ferromagnetische Werkstoffe besonders geeignet sind. Aber auch die geringe Leitfähigkeit von Kohlenstoff liefert für CFK noch akzeptable Heizraten.

Hinsichtlich der frequenzabhängigen Heiztiefe kann die Induktions-Puls-Thermografie (IPT) in zwei große Gruppen aufgeteilt werden:

Bei der *Volumenheizung* wird die vollständige Durchdringung des Bauteils vom Magnetfeld angestrebt. Mit dieser Methode werden bevorzugt Risse aufgespürt (engl.: eddy therm thermography), da die induzierten Wirbelströme an den Spitzen zu einer stärkeren Erwärmung führen. Da also der Temperaturgradient am Fehler selbst entsteht, wird auch von einem defektselektiven Verfahren bzw. einer Dunkelfeldmethode gesprochen. Beachtet werden muss in diesem Zusammenhang die Orientierungsabhängigkeit, denn bei einer parallelen Ausrichtung von Riss zu Stromfluss wird keine thermische Signatur erreicht [2]. Eingesetzt wird das Verfahren seit vielen Jahren [3] und ist bereits mehrfach teilautomatisiert umgesetzt [4; 5]. Weiterführende Arbeiten belegen die Möglichkeit, sogar unterschiedliche Risswinkel zu detektieren [6].

Der zweite Fall die *Flächenheizung* erzeugt einen transversalen Wärmefluss durchs Bauteil. Deshalb wird hier eine möglichst oberflächennahe Erwärmung verfolgt, was sich in der Anwendung erheblich höherer Induktionsfrequenzen bemerkbar macht (engl.: tone burst eddy current thermography). Einsatz findet die Technik insbesondere bei der Prüfung von Fügeverbindungen. So lässt sich beispielsweise an Proben mit zweiseitiger Zugänglichkeit die fehlende Anbindung einer Schweißnaht („Falscher Freund“) oder eine mangelhafte Verklebung nachweisen [7]. Die Eingrenzung von verdünnten Wandstärken infolge Korrosion [8] und das Aufspüren von Delaminationen in CFK [9] sind weitere exemplarische Anwendungsfälle.

Die Temperaturerhöhung im Bauteil beruht auf mehreren Effekten infolge des durchdringenden Magnetfeldes, welche materialabhängig unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

Den aus der elektromagnetischen Induktion resultierenden Wirbelströmen wird im elektrisch leitfähigen Material der Widerstandsbelag entgegengesetzt. Das führt zum Verlust elektrischer Energie, welcher als Widerstands- bzw. Joule'sche Erwärmung bezeichnet wird. Mit der Frequenz steigen diese Verluste laut Induktionsgesetz quadratisch an. [10, S. 12]

In ferromagnetischen Materialien kommt es zusätzlich zur Erwärmung infolge Hystereseverluste. Bei der Ummagnetisierung wird unter Energieaufwand die Ausrichtung der Weiß'schen Bezirke verändert. Dabei kommt es zu einer Wärmeentwicklung im Material, welche linear frequenzabhängig ist. [10, S. 12]

An dielektrischen Werkstoffen mit geringer Permittivität existiert hingegen ein kapazitiver Heizeffekt. Dieser resultiert aus der zeitlich verzögerten Umpolarisation von Ladungsträgern bei Anliegen eines elektrischen Feldes und nimmt mit steigender Frequenz zu.

Bei ferromagnetischen Materialien, wie Eisen (unlegierte oder niederlegierte Stähle, Stahlguss, Gusseisen; aber keine austenitischen Legierungen), Kobalt und Nickel treten die beiden ersten Effekte auf. Im höherfrequenten Bereich verliert die Erwärmung infolge Hystereseverluste jedoch an Bedeutung und kann ab etwa 100 kHz vernachlässigt werden. Das Verhältnis der Verlustleistungen in Abhängigkeit von der Induktionsfrequenz ist für ferromagnetische Materialien in Abbildung 2 qualitativ dargestellt. [10, S. 12]

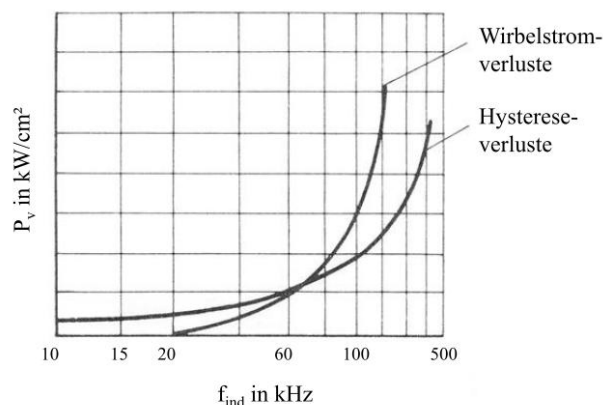


Abbildung 2: Hysterese- und Wirbelstromverluste als Funktion der Induktionsfrequenz für ferromagnetische Materialien [10, S. 12]

An CFK kommt es neben der Joule'schen Erwärmung entlang der Fasern zusätzlich zu kapazitiven Heizeffekten an den Kreuzungspunkten. Bei der Bildung globaler Leiterschleifen stellt der Matrixwerkstoff aufgrund seiner geringen Permeabilität ein Dielektrikum dar. Durch den Kontaktwiderstand zwischen den Fasern wird der elektrische Widerstand noch zusätzlich verstärkt. Es gibt widersprüchliche, mit Simulation und Experimenten untermauerte Untersuchungen, welcher thermische Effekt dominiert. Neben Matrixwerkstoff und elektrischen Eigenschaften der Fasern besitzt der Laminataufbau ebenfalls einen großen Einfluss auf die erzielbaren Heizraten. Unter identischen Bedingungen lassen sich UD-Faserhalbzeuge (unidirektional) deutlich langsamer erwärmen als Gewebestrukturen. Allgemein werden jedoch, im Vergleich zu ferromagnetischen Materialien, erheblich geringere Leistungen bei sehr viel höheren Eindringtiefen induziert. Eine Frequenzerhöhung führt unabhängig vom Lagenaufbau zu einer geringeren Homogenität des erwärmten Bereiches. [11, S. 12-15, S. 86-94]

3 Theoretische Analyse

Für die Berechnung des Induktorentwurfs wurden Finite-Elemente-Simulationen mit Comsol Multiphysics durchgeführt. Dabei erwies sich die zeitharmonische Analyse der Wirbelströme und die daraus ermittelte Verteilung der Heizleistungsdichte als ausreichend, denn es stand der gleichmäßige Temperaturhub über das gesamte Kamerasishtfeld im Fokus der Auslegung.

Das vorgestellte Modell der Abbildung 3 beinhaltet drei grundlegende Komponenten. Das Hauptelement stellt der Induktor dar, welcher sich aus den Wicklungen als stromführende Gebiete und dem Ferritmaterial zur Verstärkung der magnetischen Flussdichte zusammensetzt. Als zu erwärmendes Prüfobjekt dient ein ferromagnetisches Blech. Weiterhin muss ein ausreichend großes Volumenmodell des Luftraums definiert werden, in dem sich das elektromagnetische Feld ausbreitet. Für die zeitharmonische Berechnung sind als Eingangsgrößen noch die örtliche Verteilung des fließenden Stroms sowie seine Frequenz notwendig. Das rechte Modell der Abbildung 3 zeigt als Ergebnis die Ausprägung der Wirbelstromverluste auf der Blechoberfläche in W/m^2 .

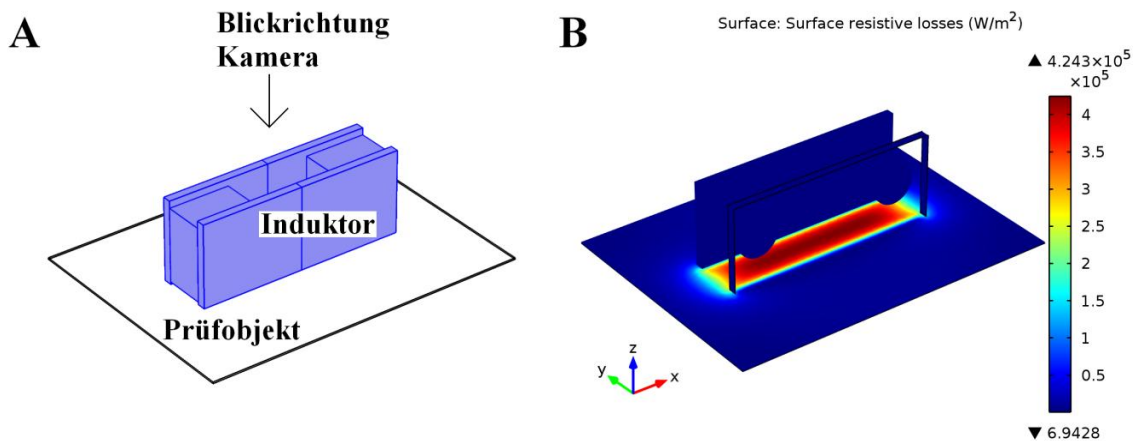


Abbildung 3: Prinzipskizze (A) und Simulationsmodell (B) der Induktorgeometrie

Die Hystereseverluste werden in der vorgestellten Simulation vernachlässigt. Allgemein sollte die Komplexität eines Modells so gering wie möglich gehalten werden, um die zeitaufwendige Berechnung zu verkürzen. Weitere vorliegende Vereinfachungen betreffen beispielsweise den Aufbau der Spulenumwicklungen. Diese sind zu einem ringförmigen Raumgebiet mit eingprägter Stromdichte zusammengefasst. Weiterhin ist die Zuleitung nicht berücksichtigt sowie die örtliche Verteilung der Wirbelströme. Sie bewegt sich nach Abbildung 1 für ferromagnetische Materialien im betrachteten Mittelfrequenzbereich bei wenigen Hundertstel Millimetern. Deshalb kann das Prüfobjekt durch eine Impedanzrandbedingung ersetzt werden, was zu einer Auslassung des Probeninneren in der Berechnung führt.

Die in der zeitharmonischen Analyse ermittelte flächige Verteilung der Heizleistungsdichte kann in den sich anschließenden transienten Berechnungsschritten als Startwert benutzt werden. Aus Komplexitätsgründen wird dabei lediglich die zeitabhängige Wärmeausbreitung, ausgehend von einer Beheizung des obersten Blechrandbereiches, ermittelt. Die elektro-magnetische Beheizung hingegen ist vernachlässigt, es erfolgt also keine gekoppelte Berechnung von Induktion und Wärmeerzeugung. Die Ergebnisse lassen aber erwarten, dass mit dem neuartigen Induktorentwurf gleichmäßige Erwärmungen realisierbar sind.

4 Versuchseinrichtung und -durchführung

Aufgrund der positiven FEM-Ergebnisse wurde mit Standardbauteilen ein Prototyp aufgebaut. Anschließend wurde der gesamte Aufbau mit Polyurethan vergossen, um eine größere Stabilität zu erlangen sowie die Komponenten zu isolieren und zu schützen. Das Sichtfenster für die Infrarotkamera ist etwa $50 \times 25 \text{ mm}^2$ groß. Entworfen wurde der Induktor zur Prüfung von Stepnähten. Es sind aber auch andere Fenstergrößen realisierbar.

Weiterhin wurde der Induktor bezüglich Drahtquerschnitt und Wicklungsanzahl so ausgelegt, dass er mit dem EW10 MF-Induktionsgenerator der Firma IFF arbeitet. Es handelt sich dabei um einen zwangsgeführten Umrichter, welcher aus Gleichrichter, DC-Filter und sich anschließendem Wechselrichter besteht. Großer Vorteil dieses Typs ist die freie Wahl der Arbeitsfrequenz im Mittelfrequenzbereich von 8-18 kHz, welcher auch in der Abbildung 1 gekennzeichnet ist. Die Ausgangsleistung ist über die Pulsweitenmodulation von 100-750 % und Anregungszeit von 0,01-30 s einstellbar. Die vorgestellten Untersuchungen wurden jeweils mit einem Induktions-Puls von 0,5 s bei 18 kHz und 750 % angeregt.

Für die Messungen ist eine temperaturkalibrierte FLIR SC 5500-M verwendet worden, welche im mittleren Wellenlängenbereich von 3,6 bis 5,1 μm arbeitet und eine maximale Auflösung von 320×256 Pixeln besitzt. Die Kamerafrequenz der gezeigten Aufnahmen beträgt 200 Hz, die Integrationszeit aufgrund der großen Temperaturhübe durchgängig 0,5 ms. Zur Auswertung wurde die Software Altair benutzt.

5 Ergebnisse

Da sich das Prüfobjekt im Magnetfeldkreis des Induktors befindet, sind seine ohmschen und induktiven Eigenschaften stark materialabhängig. Dies veranschaulicht Tabelle 2. Ermittelt wurden die Werte mit einem RLC-Meter bei einer Messfrequenz von 1 kHz. Diese ist zwar niedriger als die verwendete Induktionsfrequenz, die Ergebnisse zeigen jedoch sehr deutlich die Abhängigkeit zum angeregten Material auf.

Tabelle 2: Ohmsche / induktive Messwerte des Induktor an unterschiedlichen Materialien

	Impedanz in $\text{m}\Omega$	Induktivität in μH
Luft	110	256
Stahl	580	366
Aluminium	210	235
CFK	120	256

In Abbildung 4 werden die simulierten Wirbelstromverluste aus Abbildung 3 mit einem realen Thermogramm bei identischen Parametern verglichen. Dargestellt sind die jeweils erwärmten Bereiche des Prüfobjektes, wobei die hohe Übereinstimmung zwischen Simulation und realer Messung erkennbar ist. Der im Prüfobjekt induzierte Stromfluss findet in der waagerechten Ebene statt, was besonders bezüglich der bereits genannten Rissprüfung und an Kanten Berücksichtigung finden muss.

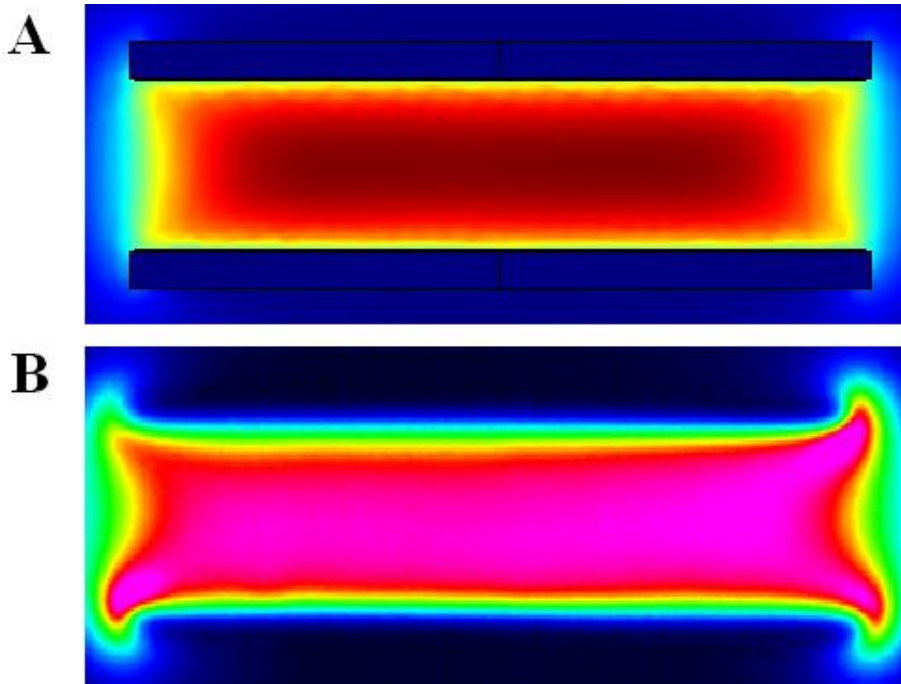


Abbildung 4: Qualitativer Vergleich der Heizleistung aus Simulation (A) und Messung (B)

Abbildung 5 zeigt den Erwärmungsbereich des optimierten Induktorprototyps. Angeregt wurde ein Stahlblech, welches eine Dicke von einem Millimeter besitzt. Dieses war zusätzlich geschwärzt, um Verfälschungen durch unterschiedliche Emissionsgrade auszuschließen. Im betrachteten Sichtfenster liegt die horizontale Temperaturschwankung bei unter 1 K, die vertikale Differenz beträgt laut des Temperaturprofils etwa 7 K. Zu vermessende Prüfbereiche, insbesondere Schweißnähte, sollten also möglichst horizontal positioniert werden.

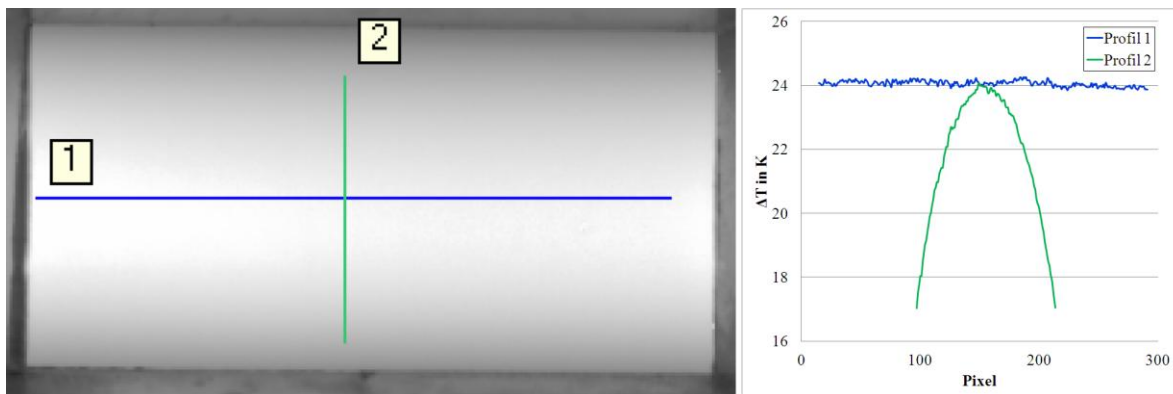


Abbildung 5: Homogenität des Anregungsbereiches

In weiterführenden Untersuchungen wurde der entwickelte Induktor an realitätsnahen Fragestellungen erprobt. Als erstes Prüfobjekt diente ein Realbauteil aus Stahl mit lediglich bereichsweise angebundener Laserschweißnaht. Dieser so genannte „falsche Freund“ ist äußerlich nicht erkennbar und sollte zerstörungsfrei detektiert werden. Die Abbildung 6 zeigt das Ergebnis der induktiven Anregung, bei der aufgrund des Pulses ein scheinbarer Temperaturhub von etwa 9 K gemessen wurde. Dies ist für eine thermografische Messung ausreichend, zeigt jedoch sehr deutlich den Einfluss des Emissionsgrades. Denn an der idealisierten Oberfläche des geschwärzten Stahlbleches konnte mit vergleichbaren

Parametern ein absoluter Temperaturhub von etwa 24 K generiert werden, was einer Heizrate von 48 K/s entspricht.

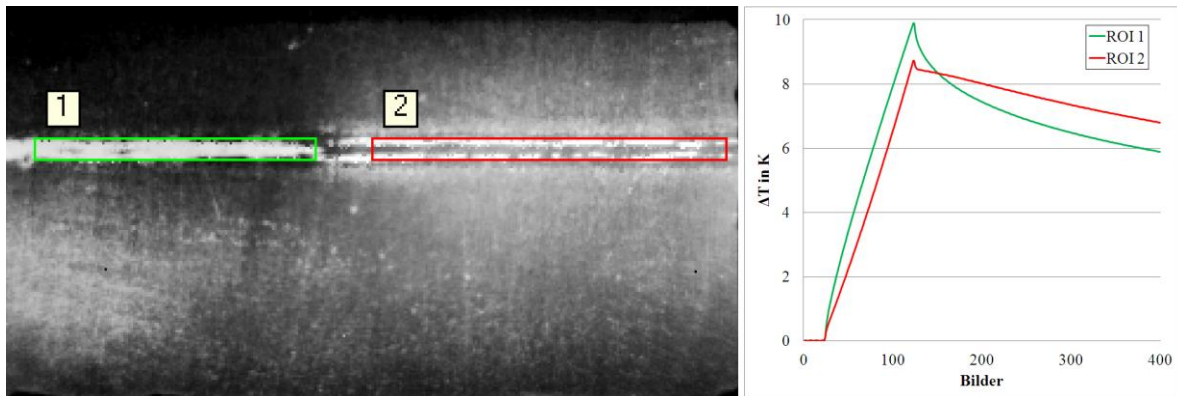


Abbildung 6: Temperaturverlauf an einer Schweißnaht mit bereichsweiser Anbindung

Es bietet sich an, diesen Wert mit dem Simulationsergebnis zu vergleichen. Wie im Abschnitt zur theoretischen Auslegung beschrieben, wird hierbei für die Dauer der Beheizung von 0,5 s die initiale Heizleistung am Blechrand aufgeprägt. Dies entspricht den realen Bedingungen nicht im vollen Umfang, da die Induktion und Wärmeerzeugung eigentlich parallel ablaufen und in der Simulation die Sättigungseffekte im Ferritmaterial sowie im Prüfobjekt unberücksichtigt bleiben. Trotzdem werden in der FEM-Analyse etwa 50 K/s ermittelt, was nach der qualitativen auch die quantitative Übereinstimmung zeigt.

Um das unterschiedliche Temperaturverhalten zu visualisieren, wurde in den entsprechenden Nahtbereichen eine sogenannte „region of interest“ (ROI) eingefügt. Auf der rechten Seite der Abbildung 6 sind die Temperaturverläufe über die Zeit bzw. Bilder für die Bereiche dargestellt. Die Anregungsphase erstreckt sich in etwa vom 25. bis zum 125. Bild. In diesem Zeitraum verhalten sich die beiden Bereiche beinahe gleich und es ist eine fast identische Erwärmung erkennbar. Interessanter ist die Abkühlphase. Hier fällt die Temperatur im Bereich von ROI 1 (grün) nach Anregungsende degressiv ab. Im Bereich von ROI 2 (rot) hingegen findet eine fast lineare Abkühlung statt. Dieses unterschiedliche Temperaturverhalten führt zu dem Schluss, dass die Schweißnaht im Bereich von ROI 1 angebunden und im Bereich von ROI 2 nicht angebunden ist.

Die angebundene Naht führt zu einer schnellen Abkühlung. Ursache ist der starke Wärmefluss auf den hinteren Fügepartner, während sich im nicht angebundenen Bereich ein Wärmestau ausprägt. Dieser Effekt ist interessanterweise nicht nur auf der Naht direkt, sondern aufgrund der homogenen Erwärmung auch im Bereich der Nahtumgebung festzustellen. Die aufgrund der thermografischen Messung vermutete Anbindungsqualität konnte mit einer Fühlerlehre bestätigt werden.

In der Flugzeugindustrie wird CFK bereits seit vielen Jahren eingesetzt. Angesichts der möglichen Gewichtseinsparung findet es mittlerweile auch in der Automobilbranche vermehrt Anwendung. Da die elektrische Leitfähigkeit der Kohlefasern ausreicht, um CFK induktiv zu erwärmen, soll die Eignung des Induktors dafür ebenfalls erprobt werden. Besonders problematisch sind bei diesem Leichtbaumaterial Schlagschäden (engl.: impact), die sich kegelförmig in die Tiefe ausbreiten und deren Ausmaß äußerlich nur schwer beurteilt werden kann. Die Struktur der Schädigung wird auch als tannenbaumförmig bezeichnet. Somit sind Schäden an verbauten CFK-Teilen ohne Zugang zur Rückseite leicht falsch interpretierbar. Da diese Problemstellung nach einer entsprechenden zerstörungsfreien Prüftechnologie verlangt, wurde in weiteren Untersuchungen die Tauglichkeit des Induktors zur Detektion von Impactschäden erprobt.

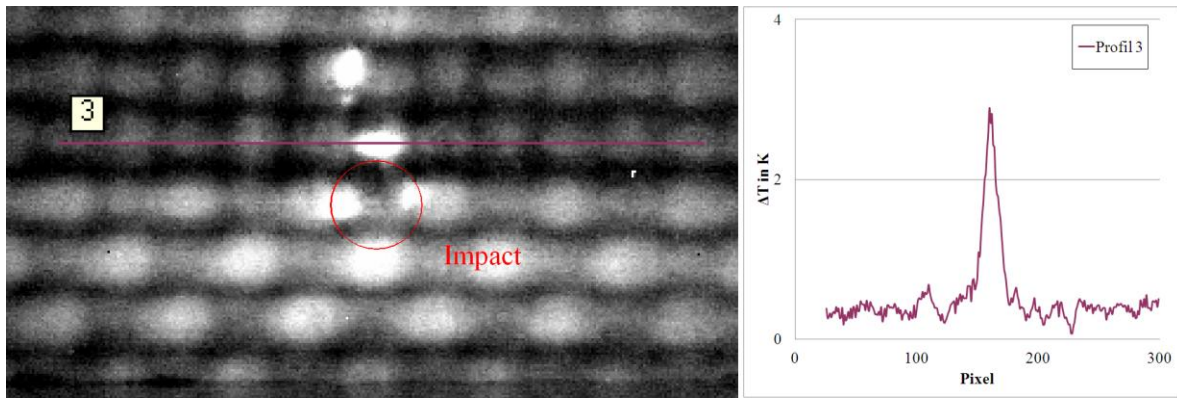


Abbildung 7: Temperaturprofil an CFK-Probe mit Impactschaden von 5,2 J

In Abbildung 7 ist die Thermografieaufnahme der Einschlagseite eines Impacts von 5,2 J zu sehen. Bei dem Prüfobjekt handelt es sich um CFK-Gewebe (400g/m^2) mit 3 Lagen. Diese Probenstruktur kommt der induktiven Thermografie entgegen. Im Randbereich des Defektes sind die Fasern stark beschädigt. Aufgrund der erhöhten Übergangswiderstände an den Bruchstellen erwärmen sie sich in der Anregungsphase deutlich schneller als die Umgebung. Dargestellt ist das Temperaturprofil nach etwa der Hälfte der Erwärmungszeit. Schon zum Ende der Anregungsphase von 0,5 s beginnen die Temperaturkontraste aufgrund von Ausgleichsvorgängen zu verschwimmen. Dies setzt sich im Abkühlvorgang fort und erschwert eine Fehlerdeutung.

Die durch den Schlag geschädigten Fasern führen zu einer lokalen Temperaturerhöhung von etwa 3 K, was im rechten Diagramm deutlich zu erkennen ist. Weiterhin folgt aus der Beschädigung infolge des Impacts, dass sich das gesamte Faserbündel weniger stark erwärmt als ein nicht unterbrochenes. Im Rahmen der Rissprüfung wird von einer Ortsverstärkung gesprochen, wenn der Bereich mit abweichendem thermischem Verhalten deutlich größer als der Defekt selbst ist [4]. Der in ähnlicher Form auch hier auftretende Effekt hat den Vorteil, dass selbst kleine Fehler zu einer großen Signatur führen, was die Wahrscheinlichkeit des Auffindens stark erhöht.

6 Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen den erfolgreichen Einsatz der induktiven Puls-Thermografie in Reflexionsanordnung an praxisrelevanten Fragestellungen. Somit sind die Vorteile der Erwärmung mittels Wirbelströmen auch bei einseitiger Zugänglichkeit nutzbar, was vollkommen neue Prüfscenarien ermöglicht. Es konnte der Nachweis erbracht werden, dass mit dem vorgestellten Induktor äußerlich nicht sichtbare Anbindungsfehler von lasergeschweißten Stahlblechverbindungen anhand des differenzierten Abkühlverhaltens nachweisbar sind. In diesem Zusammenhang ist höchst erwähnenswert, dass sich das typische Temperaturverhalten nicht auf die Schweißnaht allein beschränkt, sondern sich auf den gesamten Anregungsbereich erstreckt. Hier nicht vorgestellte Untersuchungen an Punktschweißverbindungen zeigten auch bei dieser Fügeverbindung das Potential zum Nachweis der Anbindungsqualität auf.

Die Detektion von Materialschädigungen an CFK-Gewebe, beispielsweise aufgrund eines Impacts, ist mit dieser Anregungsvariante ebenfalls möglich. Dabei ist besonders auffällig, dass sich aufgrund der gleichmäßigen Anregung im gesamten Sichtbereich die unterbrochenen Faserbündel weniger stark erwärmen. Dies vereinfacht das Auffinden von Fehlstellen und Inhomogenitäten erheblich.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde die Entwicklung einer neuartigen Spulengeometrie für induktive Puls-Thermografie vorgestellt und die Prinzipaugleichheit an ausgewählten Fragestellungen nachgewiesen. Im Rahmen einer Reihenuntersuchung muss ein größerer Stichprobenumfang geprüft werden, um belastbare Ergebnisse zu erzielen. Dabei sollte auch die Auswertung über die bisher vollzogene Betrachtung der Erwärmungshübe und Temperaturprofile hinaus gehen. Im Kontext einer Automatisierung ist die Verwendung etablierter Algorithmen wie Thermographic Signal Reconstruction (TSR) oder der Fourier Transformation (Puls-Phasen-Thermografie) denkbar.

Da die erzielbaren Heizraten besonders an ferromagnetischen Materialien mehr als ausreichend sind, ist eine Verkürzung der Anregungszeit von 0,5 s denkbar. Als Folge könnten sich noch schärfere Fehlersignaturen einstellen. Allerdings kann der große Temperaturhub auch genutzt werden, um Bolometerkameras mit einer geringen Temperaturauflösung einzusetzen. Diese bieten neben dem Kostenvorteil geringere Abmaße, kleineres Gewicht und größere Robustheit im industriellen Umfeld. Zur Quantifizierung des auftretenden Informationsverlustes sind allerdings vergleichende Erhebungen notwendig.

8 Anmerkungen

Der vorgestellte Induktor wurde am 07.04.2012 unter dem Aktenzeichen Az 102012008531.1 „Verfahren zum zerstörungsfreien Prüfen einer Fügeverbindung eines Bauteils mittels Induktions-Thermografie und Anordnung zur Durchführung“ beim Patentamt angemeldet.

9 Referenzen

- [1] Mücklich, S. (2008): Leichtbaupotenziale durch Einsatz von Leichtmetallen. Habilitation. Technische Universität Chemnitz. Fakultät für Maschinenbau, Lehrstuhl für Verbundwerkstoffe.
- [2] Noethen, M.; Jia, Y; Meyendorf, N. (2011): FEM-Simulation induktiv angeregter Thermografie. DGZfP-Jahrestagung 2011. Fraunhofer IZFP Dresden. Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung. Bremen, 2011.
- [3] Kremer, K. J. (1984): Das Therm-O-Matic-Verfahren. Ein neues Prüfverfahren für die On-line-Prüfung von Knüppeln und Rundstahl auf Oberflächenfehler. In: *Sie & Wir* (14), S. 1–4.
- [4] Carl, V.; Zenzinger, G. (2005): Automatische Rissprüfung mit induktiv angeregter Thermografie. Vortrag 58. DGZfP-Jahrestagung 2005. T-ZfP Carl Messtechnik Dinslaken; MTU Aero Engines München. Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung. Rostock, 2005.
- [5] Mooshofer, H.; Goldammer, M.; Heine, W.; Rothenfusser, M.; Bass, J.; Lombardo, E.; Vrana, J. (2009): Induktionsthermographie zur automatischen Prüfung von Generatorkomponenten. DGZfP-Jahrestagung 2009. Siemens. Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung. Münster, 2009.
- [6] Abidin, I. M. Z. (2010): Modelling and experimental investigation of eddy current distribution for angular defect characterisation. Dissertation. Newcastle University, Newcastle. School of Electrical, Electronic and Computer Engineering.
- [7] Šrajbr, C.; Dilger, K.; Dehaan, S.; Lammel, C.; Dillenz, A. (2011): Zerstörungsfreie Prüfung von Fügeverbindungen mit Induktions-Puls-Phasen-Thermografie. Thermographie-Kolloquium 2011. IFS. Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung. Stuttgart, 2011.
- [8] Libin, M. N.; Balasubramaniam, K.; Krishnamurthy, C. V.; Engelbart, R. (2012): Tone Burst Eddy Current Thermography for estimation of corrosion defects in aircraft components. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, S. 425–432.

- [9] Pan, M.; He, Y.; Tian, G.; Chen, D.; Luo, F. (2012): Defect characterisation using pulsed eddy current thermography under transmission mode and NDT applications. In: *NDT&E International* (52), S. 28–36.
- [10] Benkowsky, G. (1990): Induktionserwärmung. Härten, Glühen, Schmelzen, Löten, Schweißen; Grundlagen und praktische Anleitungen für Induktionserwärmungsverfahren, insbesondere auf dem Gebiet der Hochfrequenzerwärmung. 5. Aufl. Berlin: Technik.
- [11] Frauenhofer, M. (2010): Schnellhärtung struktureller Verbundklebungen mittels elektromagnetischer Wechselfelder. Dissertation. Technische Universität Braunschweig.