

# Anwendung der Induktionsthermografie im industriellen Umfeld

Christian SRAJBR<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> edevis GmbH, Stuttgart

**Kurzfassung:** Die Induktionsthermografie weist mit deren leistungsfähigen und berührungslosen Wirkprinzip eine ideale Grundlage zur Anwendung als zerstörungsfreie Prüfmethode im industriellen Umfeld auf. Somit besteht das Potential, Forderungen nach neuen Qualitätssicherungssystemen vor allem in der Fertigung von Fahrzeugkomponenten aus der Automobil- und Zulieferindustrie mit den dort vorhandenen Randbedingungen, hohen Stückzahlen und (voll-)automatisierten Prozessen, zu erfüllen. Die Induktionstechnik ist jedoch in der Regel nicht für die Anforderungen der Thermografie optimiert und somit ist bis dato eine Umsetzung der Prüfung nur in sehr speziellen Prüffällen möglich gewesen.

Die Firma edevis hat hier in den letzten Jahren neue Wege beschritten und in Zusammenarbeit mit deren Partnern die Prüftechnik bis zur Serienreife entwickelt, sodass mehr und mehr Anwendungsfelder für die Induktionsthermografie erschlossen werden können, die bislang nicht oder mit anderen, begrenzt automatisierbaren, Verfahren der Qualitätssicherung überwacht wurden.

Es wird das Funktionsprinzip sowie die Weiterentwicklung der Induktionsanregung beschrieben – insbesondere der Induktoren – für Anwendungsfälle in der Rissprüfung und der Prüfung von Fügeverbindungen. Vorgestellt werden dabei sowohl generelle Anwendungsfälle in Verbindung mit Prüfergebnissen, als auch konkrete Umsetzungen von automatisierten Prüfsystemen anhand von Beispielen der Rissprüfung von Schmiedeteilen und der Prüfung von Laserschweißverbindungen.

## 1. Einführung

Ressourceneffizienz ist zentrales Thema in der Fahrzeugentwicklung und somit von Komponenten aus der Automobil- und Zulieferindustrie. Die hierfür notwendige Optimierung lastabtragender Strukturen bezüglich hoher Werkstoffausnutzung kann dabei allerdings zu zunehmend kritischen Fertigungsprozessen führen. Jedoch muss besonders in den modernen kleinteiligen Herstellungsprozessen mit vielen Schnittstellen unterschiedlicher Zulieferer und den OEMs die Qualität der Einzelkomponenten sichergestellt werden, um die geforderte Qualität des Gesamtsystems zu erreichen. Besonders sicherheitsrelevante Bauteile und hochbelastete Motor- bzw. Getriebekomponenten werden daher in der Regel durch zerstörungsfreie Prüfungen oder Prozesskontrollen beurteilt. Diese können jedoch häufig nur manuell durchgeführt werden (z. B. Rissprüfung mit dem Magnetpulververfahren) oder nicht alle qualitätsrelevanten Merkmale erfassen (z. B. Emissionsüberwachung bei Laserschweißprozessen). Ein Einsatz von aussagekräftigeren, zerstörungsfreien Prüfverfahren scheidet bisher häufig an der Umsetzbarkeit der Prüfungen. Gefragt sind hier neue Ansätze bezüglich robuster, berührungsloser und schneller Verfahren.

Ein Ansatz zur Erfüllung des Anforderungsprofils ist die Nutzung der aktiven Thermografie mit induktiver Anregung. Neben der berührungslosen Messung der transien-

ten Oberflächentemperatur kann auch die benötigte Erwärmung des Prüfbereichs berührungslos und mit einer hohen Leistungseffizienz in metallische Prüfkörper eingebracht werden. Dies ermöglicht die Etablierung einer automatisierbaren und, aufgrund der guten Signal- zu Rausch-Verhältnisse, gut auswertbaren Prüftechnik. Zudem konnte die grundsätzliche Eignung der Technik zur Detektion von Oberflächenrissen und Fehlstellen in Fügeverbindungen in diversen Forschungsarbeiten nachgewiesen werden [1], [2], [3], [4].

Für die Umsetzung der Prüftechnik muss jedoch eine Anlagentechnik zur Verfügung stehen, die in der Lage ist, die Anregungsenergie reproduzierbar und homogen einzubringen. Des Weiteren müssen die Kompetenten des Prüfsystems robust sowie sicher für die Benutzer sein und den Anforderungen der Automatisierung entsprechen. Mit der MF-Induktionstechnik konnte hier eine Lösung gefunden werden, die all diese Anforderungen erfüllt und somit die Induktionsthermografie zunehmend in neue Anwendungsfelder der Qualitätssicherung im industriellen Umfeld vordringt.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Funktionsweise der beiden Varianten der Induktionsthermografie – der Rissmethode und der Wärmeflussmethode – erläutert sowie konkrete Umsetzungen anhand der Prüfung von Laserschweißverbindungen und der Oberflächenrissprüfung beschrieben.

## 2. Induktions-Wärmeflussthermografie

### 2.1 Funktionsprinzip der Induktions-Wärmeflussthermografie

Die Funktionsweise der Wärmeflussthermografie basiert auf einer gezielten – meist impuls- oder sinusförmigen – Erwärmung des Prüfbereichs, die dem Prüfkörper einen instationären Wärmetransport aufprägt. Inhomogenitäten oder Fehlstellen des Prüfobjekts stören den Wärmefluss und erzeugen somit kurzzeitig auftretende Temperaturunterschiede an der Oberfläche, die mit einer Infrarotkamera aufgezeichnet und bezüglich deren Stärke bzw. transienten Eigenschaften bewertet werden. Die Einbringung der Anregungsenergie kann dabei durch unterschiedlichste Erwärmemechanismen erfolgen, typischerweise werden Anregungsquellen mit optischer (Halogen-, Blitzleuchten, Laser), konvektiver (Heiß-/Kaltluft) oder eben, wie hier beschrieben, elektrischer (Induktion, Konduktion) Wirkungsweise verwendet. [5], [6], [7]

In Abb. 1 sind der prinzipielle Aufbau der Prüfung und das Prinzip der Fehlerdetektion mit Induktions-Wärmeflussthermografie dargestellt.

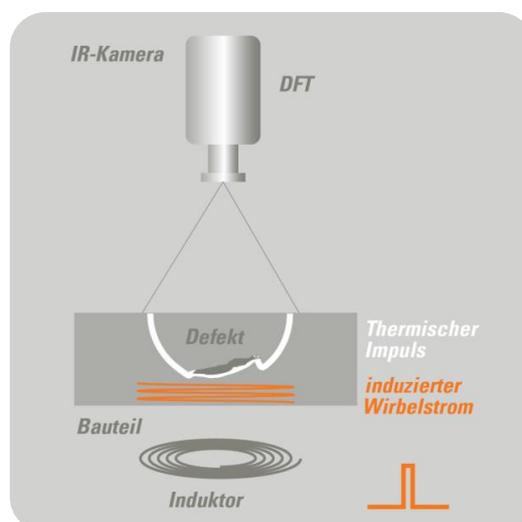


Abb. 1: Prinzip der Fehlerdetektion mit Induktions-Wärmeflussthermografie

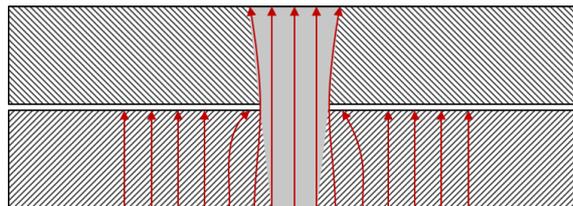
Mithilfe eines Induktors wird gezielt im Prüfbereich ein Wirbelstrompuls in eines der (metallischen) Fügeteile induziert, der dieses aufgrund von elektrischen Verlusten bzw. zusätzlichen Ummagnetisierungsverlusten (nur bei ferromagnetischen Werkstoffen) erwärmt. Die lokale Erwärmung prägt dem Prüfbereich einen konduktiven Wärmetransport auf, der durch Bereiche mit hohen thermischen Impedanzen (Grenzflächen) oder thermisch isolierenden Eigenschaften (Leerräume) gestört werden kann. Mit der Infrarotkamera wird das Temperaturfeld der Oberfläche visualisiert und aufgezeichnet. Störungen im Wärmetransport können in diesen Aufnahmen als transiente Temperaturunterschiede zu Bereichen eines ungestörten Wärmetransports unterschieden werden. Die Auswertung erfolgt anhand einer frequenzabhängigen Amplituden- oder Phasendarstellung, die durch eine pixelweise durchgeführte diskrete Fouriertransformation (DFT) der Aufnahmesequenzen erzeugt wird.

## 2.2 Prüfung von Laserschweißverbindungen mit der Induktions-Wärme-fluss-thermografie

Das Potential der Induktions-Wärme-fluss-thermografie soll am Beispiel des Laserschweißens erläutert werden. Die hohen Prozessgeschwindigkeiten und der geringe Wärmeverzug prädestinieren das Laserschweißen zum Fügen dünner Blechkomponenten. Es lassen sich hiermit insbesondere Überlappstöße schnell und kostengünstig herstellen. Die Nutzung der Vorteile des Verfahrens erfordert jedoch häufig ein Optimum von Nahtqualität und Anbindungsquerschnitt. Laserschweißnähte können bei Abweichungen im Schweißprozess diverse visuell detektierbare Fehlstellen, wie z. B. Schmelzbadauswürfe, Risse und Poren, aber auch reduzierte Anbindungsquerschnitte aufweisen. Besonders kritisch sind die nicht visuell erkennbaren sog. „Falschen Freunde“. Diese können bei Überlappstößen u. a. durch zu große Spaltmaße zwischen den zu fügenden Blechen entstehen. Der Laserstrahl schmilzt dann zwar beide Blechlagen auf, die Schmelzbäder von oberer und unterer Lage verbinden sich jedoch nicht. [8], [9]

Ein Prüfverfahren zur Qualitätssicherung von Laserschweißprozessen sollte in der Lage sein, sämtliche fertigungsrelevanten Fehlstellen zu detektieren, vergleichbare Prüfgeschwindigkeiten (normiert über die Nahtlänge) zum Laservorschub haben, unempfindlich gegen äußere Störgrößen sein und möglichst zeitnah im Anschluss an den Fügeprozess prüfen zu können.

Die Induktions-Wärme-fluss-thermografie ist dabei besonders gut geeignet, den tatsächlichen Anbindungsquerschnitt – oder im Extremfall das Fehlen der Verbindung – zu bestimmen. Genutzt wird dabei zumeist die Transmissionsanordnung. Entsprechend wird der Prüfbereich der Naht rückseitig erwärmt und die lokale Erwärmung des vorderseitigen Fügeteils bewertet. Die Ausprägung der Erwärmung der Vorderseite steht in einem direkten Zusammenhang mit dem vorhandenen Anbindungsquerschnitt der Naht. Nur durch diesen kann der Wärme-fluss überhaupt gelangen, nicht verbundene Bereiche sind durch Luftspalte getrennt und damit thermisch isolierend [10]. Abb. 2 verdeutlicht das Funktionsprinzip anhand einer Prinzipskizze.

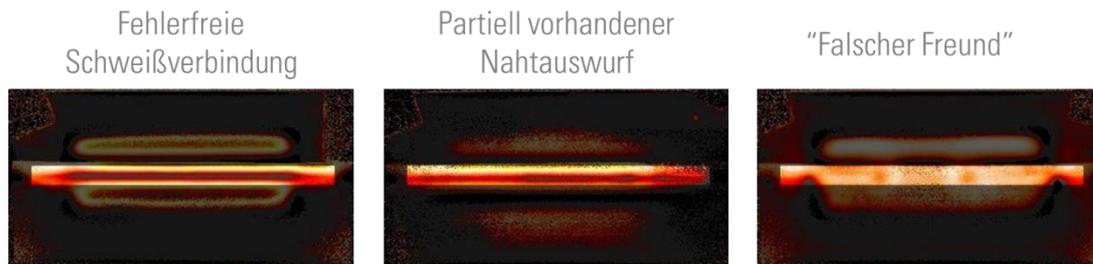


**Abb. 2:** Bestimmung des Anbindungsquerschnitts von Laserschweißverbindungen

Mit der Induktions-Wärme-fluss-thermografie lassen sich zudem auch Nahtauswürfe detektieren. Diese führen (lokal im Bereich der Naht) zu einer Reduktion der thermischen Dicke, was wiederum einen direkten Einfluss auf die transiente Oberflächentemperatur hat. Die

Erwärmung findet hier entsprechend zu einem etwas früheren Zeitpunkt als im Bereich der einwandfreien Naht statt.

Abb. 3 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Prüfung von fehlerhaften Laserschweißnähten einer Überlappverbindung zweier Stahlbleche der Dicke  $t_B=0,75$  mm im Vergleich zu einer fehlerfreien Verbindung. Erkennbar ist, dass neben den visuell an der Probenoberfläche beurteilbaren Fehlstellen, hier am Beispiel eines partiellen Schmelzbaudauswurfs dargestellt, auch die nicht visuell beurteilbaren Abweichungen der Ausprägung des Anbindungsquerschnitts zu einer einwandfreien Verbindung detektierbar sind. So sind die „Falschen Freunde“, bei denen keine innere Verbindung vorhanden ist, in den thermografischen Aufnahmen aufgrund des nicht vorhandenen Wärmeflusses zwischen den Blechen mit einem hohen Kontrast von einer fehlerfreien Verbindung unterscheidbar.



**Abb. 3:** Ergebnis der Prüfung von Laserschweißverbindungen mit Induktions-Wärmefluss thermografie

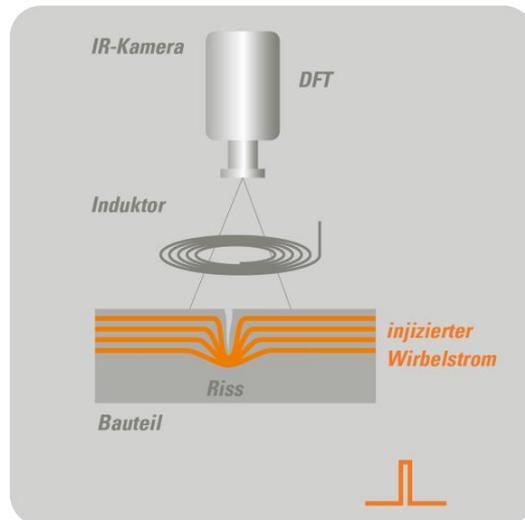
Auch die übrigen Anforderungen an ein Prüfverfahren für Laserschweißverbindungen werden erfüllt. Die Prüfgeschwindigkeit liegt im beschriebenen Fall bei einer halben Sekunde über die Nahtlänge von 100 mm, die Prüfung kann innerhalb von wenigen Sekunden nach dem Schweißprozess durchgeführt werden (sobald das Bauteil in einem stabilen Abkühlstadium ist) und Störungen durch äußere Einflüsse, Oberflächenveränderungen oder kleinere Bauteil- oder Positionierungstoleranzen verschlechtern die Ergebnisse der Prüfung nicht.

Neben Laserschweißverbindungen lassen sich auch andere Fügeverbindungsarten prüfen, wenn die relevanten Fehlstellen ebenso thermisch isolierende Eigenschaften aufweisen. Beispiele sind Ablösungen in Kleb-, Löt- und mechanischen Fügeverbindungen sowie deren geometrische Ausprägung (Fläche der Anbindung). Begrenzt ist die Induktions-Wärmefluss thermografie – wie alle anderen Varianten der Wärmefluss thermografie auch – bezüglich der Detektion von nicht verbundenen, aber berührenden Grenzflächen. Diese weisen keine oder nur sehr geringe Änderungen der thermischen Impedanzen gegenüber verbundenen Bereichen auf. Die Störungen des Wärmeflusses sind damit zu gering um auf der Bauteiloberfläche detektiert werden zu können.

### 3. Induktions-Rissthermografie

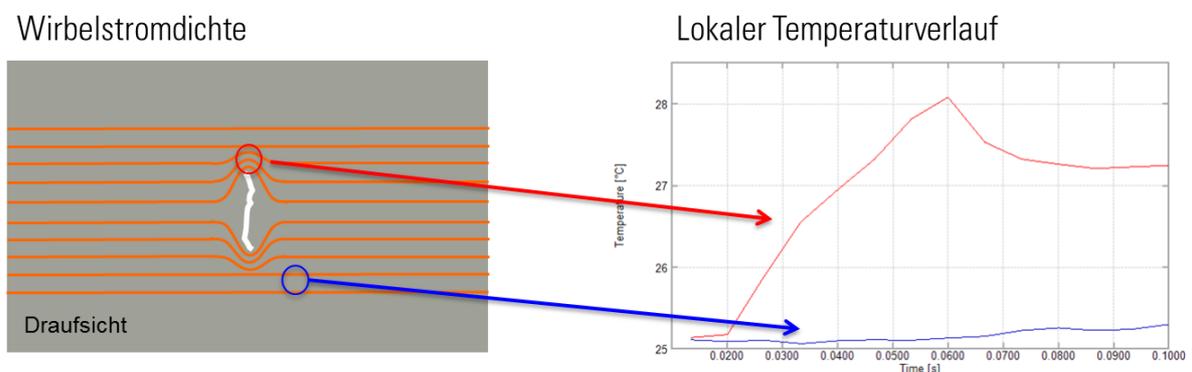
#### 3.1 Funktionsprinzip der Induktions-Rissthermografie

Für die Detektion von Rissen mittels Induktions-Rissthermografie hingegen tritt das in die Bauteiloberfläche eingebrachte Wirbelstromfeld mit dem Defekt in eine direkte Wechselwirkung. Im Idealfall erwärmen sich hierbei nur die Risse (bzw. deren Spitzen), umgebende, unbeschädigte Bereiche erwärmen sich deutlich weniger bzw. überhaupt nicht. Es liegt somit eine sog. defektselektive Wirkungsweise vor. Eine vergleichbare Wirkungsweise hat unter den thermischen Methoden nur die Ultraschallthermografie, die zwar potentiell zusätzlich auch auf verdeckte Risse empfindlich ist, aber wesentlich geringere Signalamplituden erzeugt als die Induktions-Rissthermografie. In Abb. 4 sind der prinzipielle Aufbau der Prüfung und das Prinzip der Fehlerdetektion mit Induktions-Rissthermografie dargestellt.



**Abb. 4:** Prinzip der Fehlerdetektion mit Induktions-Rissthermografie

Die Wirbelströme werden zur Rissdetektion durch einen geeigneten Induktor, der ein Sichtfeld für die Kamera bietet, in Reflektionsanordnung in die Prüfteiloberfläche eingebracht. Risse, die das Wirbelstromfeld queren, verändern die Wirbelstromverteilung und nehmen somit direkten Einfluss auf die aus der induktiven Anregung resultierende Erwärmung. Während sich die Bereiche um die Risspitzen, also die Bereiche mit einer Einengung der Wirbelströme und somit erhöhten Stromdichte aufgrund von elektrischen Verlusten effektiv erwärmen, bleiben die unbeschädigten Bereiche nahezu unbeeinflusst. Diese Unterschiede in der Erwärmung (bzw. deren Verlauf) werden mit der Infrarotkamera visualisiert. [1], [2] In Abb. 5 wird dieses Verhalten anhand zweier hierfür exemplarischer Bereiche der Bauteiloberfläche, der Risspitzen bzw. im intakten Bereich, dargestellt.



**Abb. 5:** Zusammenhang von Wirbelstromdichte und lokalem Temperaturverlauf der Oberfläche

Voraussetzung für die Anwendung der Induktions-Rissthermografie ist, dass das Bauteil metallisch (oder zumindest elektrisch leitfähig) ist. Die Induktions-Rissthermografie ist bei metallischen Werkstoffen in der Regel auf die Detektion von Oberflächenrissen beschränkt, da die effektive Eindringtiefe der Wirbelströme durch eine der eingebrachten Wirbelströme entgegenwirkende Selbstinduktion begrenzt wird. Dieser Effekt wird als Skin-Effekt, die daraus resultierende maximale Eindringtiefe der Wirbelströme als Skintiefe bezeichnet. Diese liegt abhängig vom genutzten Frequenzspektrum und von den magnetischen Eigenschaften des geprüften Metalls in etwa zwischen  $\delta_s = 0,1 \dots 1$  mm. [1], [2]

Auch bei der Induktions-Rissthermografie erfolgt die Auswertung zumeist anhand einer frequenzabhängigen Amplituden- oder Phasendarstellung, die durch eine pixelweise durchgeführte diskrete Fouriertransformation (DFT) der Aufnahmesequenz erzeugt wird.

### 3.2 Detektion von Oberflächenrissen mit der Induktions-Rissthermografie

Oberflächenrisse können bei der Fertigung metallischer Komponenten in Bauteilbereichen auftreten, in denen die Werkstoffe hohen thermischen oder mechanischen Beanspruchungen durch die Herstellungsprozesse ausgesetzt sind. Solche Beanspruchungen können durch Umformprozesse (Schmieden, Ziehen, Walzen usw.) oder auch Randschichthärtprozesse (Induktiv-, Einsatz- oder Nitrierhärten) auftreten. Auch bei Urformprozessen (z. B. Feinguss) können Risse entstehen. Häufig ist die Rissentstehung jedoch von sehr spezifischen lokalen Ungängen des Werkstoffs abhängig, so dass nur ein sehr geringer Prozentsatz der hergestellten Teile überhaupt einen Oberflächenriss ausprägt. Die wenigen fehlerhaften Bauteile müssen dann aus der großen Menge einwandfreier Bauteile selektiert werden.

Stand der Technik für das Aussortieren rissbehafteter Bauteile sind manuelle Prüfprozesse, z. B. meist eine Magnetpulverprüfung oder auch eine visuelle Prüfung ggf. kombiniert mit Farbeindringmethoden. Neben dem manuellen Prüfablauf durch geschulte Prüfer, verbunden mit hohen Personalkosten, stellt auch die subjektive Beurteilung der Prüfergebnisse ein Risiko von Schlupf und Pseudoausschuss dar. Hier ist die Induktionsthermografie deutlich im Vorteil. Zum einen lässt sich ein vollautomatisierter Prüfablauf realisieren, zum anderen auch eine vollautomatisierte Ergebnisbeurteilung mittels Bildverarbeitung.

Auch für die Induktions-Rissthermografie soll das Potential der Methode anhand von Prüfergebnissen verdeutlicht werden. Abb. 6 zeigt zwei Ergebnisse der Induktionsthermografie an einem sog. Testkörper MTU Nr. 3, dem Vergleichskörper 1 der Norm der Magnetpulverprüfung. Mittig zu den Phasenbildern der Induktions-Rissthermografie ist das Referenzergebnis der Magnetpulverprüfung dargestellt.



**Abb. 6:** Ergebnis der Prüfung mit Induktions-Rissthermografie am Vergleichskörper 1 (DIN EN ISO 9934-2)

Der Vergleich der Ergebnisse macht zwei Unterschiede beider Verfahren deutlich, nämlich dass die Ergebnisse der Induktionsthermografie richtungsabhängig sind, dafür aber eine stärkere Abgrenzung der Risse von der Umgebung ermöglichen. Die Richtungsabhängigkeit resultiert aus der starken Orientierung des Wirbelstromfelds des verwendeten Induktors. Dies erhöht die Signalamplitude, macht die Prüfung allerdings insensitiv zu parallel verlaufenden Rissen. Für die Detektion von Rissen in beliebiger Richtung müssen also zwei Messungen mit jeweils um  $90^\circ$  gedrehter Feldorientierung durchgeführt werden. Für eine direkte Vergleichbarkeit mit dem Ergebnis der Magnetpulverprüfung müssen dann beide Ergebnisse der Induktions-Rissthermografie zu einem vereinigt werden. Für die Zeitdauer der Prüfung ist dies nahezu vernachlässigbar, da die Messdauer der Einzelmessungen im vorliegenden Fall nur bei einer Zehntelsekunde liegt. Der stärkere Kontrast der Ergebnisse der Induktionsthermografie gegenüber dem der Magnetpulverprüfung resultiert aus den Eigenschaften der Rissignale, die aufgrund der direkten Interaktion von Wirbelströmen und Rissgeometrie einen sehr unregelmäßigen Verlauf haben. Die perlenschnurähnliche Ausprägung (Aneinanderreihung von Hell-Dunkel-Feldern) ermöglicht sowohl eine gute visuelle Erkennbarkeit, als auch eine zuverlässige Beurteilung mittels Bildverarbeitung.

Mit der Induktions-Rissthermografie lassen sich auch Risse detektieren, die keine Öffnung zur Oberfläche hin aufweisen. Hinreichend für den Wirkmechanismus ist die elektrische Trennung angrenzender Bereiche. Solche Gegebenheiten findet man an Überwzungen bzw. Schmiedefalten mit den dort vorliegenden Oxideinschlüssen. Somit können auch solche Fehlstellen detektiert werden. Des Weiteren können auch dünnwandige Bauteile, z. B. Blechtiefziehteile auf Risse geprüft werden. Die Oberflächeneigenschaften der Bauteile spielen dabei eine untergeordnete Rolle. Bis auf wenige Ausnahmen können die Bauteile in jeglichem Oberflächenzustand (z. B. walzblank, oxidiert, verzündert, spanend bearbeitet) geprüft werden. Auch Kratzer in der Oberfläche sind bezüglich Pseudoanzeigen unkritisch, da diese kein vergleichbares Signal zu Rissen erzeugen und somit gut von diesen zu unterscheiden sind.

## 4. Industrielle Anwendung

### 4.1 Anlagentechnik der Induktionsthermografie

Für eine Weiterentwicklung des Prüfsystems bezüglich der Optimierung der Induktionsthermografie auf die Belange der Anwendung im industriellen Umfeld sind insbesondere zwei Ansatzpunkte zu nennen: Der Generator, aber auch die Induktoren. Als Generator wird ein Mittelfrequenzinduktionsgenerator mit einer Leistung von 3 kW bzw. 5 kW und einem Frequenzspektrum von  $f_{\text{Ind}} = 8 \dots 50 \text{ kHz}$  verwendet, der für die Belange der aktiven Thermografie weiterentwickelt wurde. Dieser Generator bietet neben der Unabhängigkeit von einer Wasserkühlung den Vorteil, dass durch die Steuerung der Induktionspulse mittels Pulsweitenmodulation sehr definierte und zeitlich diskrete Anregungssignale abgegeben werden können. Die Vorgabe der Induktionsfrequenz erfolgt unabhängig vom verwendeten Induktor. Aufgrund der Kompaktheit des Generators, aber auch der Peripheriegeräten, ergibt sich ein kompaktes System, das gut in Fertigungsanlagen integrieren ist, siehe Abb. 7.



**Abb. 7:** Kompakter 9 HE Schaltschrank zur Aufnahme von Induktionsgenerator und Peripheriegeräten

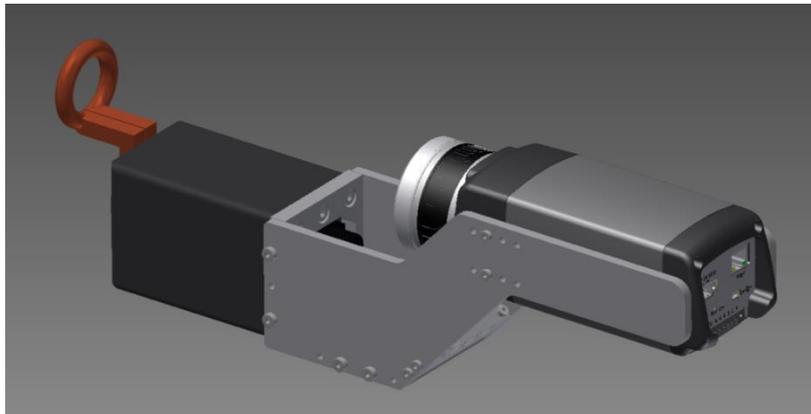
Auch die Induktoren des Prüfsystems sind i. d. R. luftgekühlt, vollständig gekapselt und haben flexible elektrische Zuleitungen von bis zu 12 m Länge. Somit lassen sich diese gut in bewegte Prüfeinheiten, z. B. mittels eines Roboters, integrieren. Für verschiedene Anwendungsbereiche wurden maßgeschneiderte Induktoren entwickelt. Die Induktoren zur Prüfung von Fügeverbindungen mit der Wärmefluss thermografie haben ein auf deren Belange angepasstes Erwärmfeld, das deren geometrischen Randbedingungen (linien-, punktförmig flächig) abbildet. Die Prüfbereiche müssen mit den Induktoren möglichst homogen erwärmt werden, da inhomogene Erwärmungen laterale Wärmeflüsse im Prüfbereich zur Folge haben und damit evtl. zu einer Überlagerung von Fehlerbildern führen [3]. Für die Rissprüfung müssen die Induktoren hingegen ein möglichst starkes Wirbelstromfeld in Be-

reichen ausprägen, die für die Kamera sichtbare sind. Auch diesbezüglich stehen geeignete Induktoren zur Verfügung. Wenn sich mit den vorhandenen Induktoren ein Prüfproblem nicht lösen lässt, so können allerdings auch speziell angepasste Induktoren zum Einsatz kommen.

#### 4.2 Beispiele für induktionsthermografische Prüfköpfe

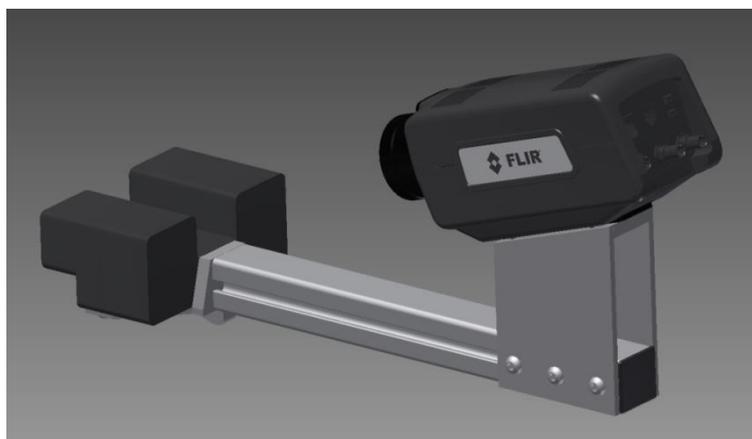
In vielen Anwendungsfällen, insbesondere wenn mehrere Bereiche an einem Bauteil geprüft werden müssen und daher Kamera und Instruktor von Prüfbereich zu Prüfbereich bewegt werden müssen, macht es Sinn, beides zu einer Einheit zu verbinden. Der so entstehende Prüfkopf lässt sich dann mit der Handlingseinheit (z. B. Linearachse oder Mehrachsenroboter) verbinden und sorgt so für ein vereinfachtes Handling.

In Abb. 8 ist ein solcher Prüfkopf dargestellt, der für die Bewertung von mehreren ringförmigen Laserschweißnähten an einem Blechteil aus dem Fahrzeuginnenraum entwickelt wurde. Damit kann die Integrität und Durchgängigkeit der Nähte beurteilt werden. Neben einem speziell angefertigtem Induktor zur Anregung der kreisförmigen Prüfbereiche konnte auf eine Bolometerkamera zurückgegriffen werden. Dies ist neben der wirtschaftlicheren Anschaffung auch bezüglich Betriebs- und Wartungskosten von Vorteil.



**Abb. 8:** Induktionsthermografischer Prüfkopf zur Bewertung von Laserschweißnähten

Als weiteres Beispiel zeigt Abb. 9 einen Universalprüfkopf für die Detektion von Rissen in Schmiedeteilen. Auch hier wurde wieder der Induktor – ein Standardinduktor für die Rissdetektion – mit der Infrarotkamera zu einer Einheit verbunden. Wenn nun größere Bereiche als der dem Kamerablickfeld zugängliche Bereich des Wirbelstromfelds (ca. 40 mm x 50 mm zwischen den Induktorfüßen) geprüft werden müssen, so kann diese Einheit Messschritt für Messschritt über den Prüfkörper bewegt werden.



**Abb. 9:** Induktionsthermografischer Prüfkopf zur Rissdetektion

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die induktionsangeregte Thermografie ist ein probates Mittel zur Lösung von automatisierten Prüfaufgaben im industriellen Umfeld. Die Technik kann als Wärmefluss-thermografie für die Bewertung von Fügeverbindungen, insbesondere Laserschweißverbindungen, eingesetzt werden und eignet sich als Riss-thermografie für die Prüfung von metallischen Bauteilen bezüglich Oberflächenrissen.

Es können auf Grundlage der entwickelten Anlagentechnik zuverlässige und sehr gut funktionierende Prüfsysteme aufgebaut werden, die nahezu keinen Wartungsbedarf aufweisen. Die hohen erzielbaren Signalstärken gewährleisten eine gute Bewertbarkeit und somit eine geringe Empfindlichkeit gegen äußere Störungen. Mit den angepassten Induktoren lassen sich die Prüfbereiche sehr gezielt anregen, sodass die Vorteile der lokalen Wirkungswiese ausgenutzt werden können. Sowohl in der Prüfung von Fügeverbindungen als auch bei der Rissprüfung müssen häufig nur Teilbereiche der Bauteile geprüft werden. Zudem lässt sich die Prüftechnik sehr gut in kompakte und mobile Prüfköpfe integrieren, was der Automation der Bewegung entgegenkommt.

## 6. Referenzen

- [1] Vrana, J.: *Grundlagen und Anwendungen der aktiven Thermographie mit elektromagnetischer Anregung*. Saarbrücker Reihe Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Bd. 18, Aachen : Shaker, 2009. – ISBN 978-3-8322-8497-8
- [2] Walle, G. ; Valeske, B. ; Netzelmann, U. ; et al: *Eine thermische Prüftechnik zur Oberflächenrissprüfung leitfähiger Materialien*. In: MP 51 (2009) 9; S. 293-602
- [3] Šrajbr, C.: *Zerstörungsfreie Prüfung von Fügeverbindungen mit Induktions-Puls-Phasen-Thermografie*. Forschungsberichte des Instituts für Füge- und Schweißtechnik, Bd. 34, Aachen : Shaker, 2014. – ISBN 978-3-8440-3023-5
- [4] Riegert, G.: *Induktions-Lockin-Thermografie - ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung*. Dissertation am IKT der Universität Stuttgart, 2007
- [5] Maldague, X. P. ; Moore, O.: *Infrared and Thermal Testing-Volume 3: Nondestructive Testing Handbook*. 3. Aufl. Columbus, Ohio : American Society for Nondestructive Testing, 2001. – ISBN 1-571-17044-8
- [6] Busse, G.: *Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal*. In: Applied Phys. Lett., Bd. 35 (1979) Heft 10, S. 759-760
- [7] Wu, D.: *Lockin-Thermografie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung*. Dissertation am IKT der Universität Stuttgart, 1996
- [8] F. von Alvensleben et al.: *Laserstrahlschweißen: Prozesse, Werkstoffe, Fertigung und Prüfung*. Handbuch des BMBF Projektkonsortiums „Qualifizierung von Laserverfahren“ des geförderten Projekts Laser 2000; Editor: U. Dilthey; Düsseldorf; DVS-Verlag, 2000
- [9] Spellenberg, B.: *"Falschen Freunden" auf der Spur. Laserschweißnähte zerstörungsfrei prüfen*. In: Qualität und Zuverlässigkeit, Bd. 51 (2006) Heft 3, S. 4-48
- [10] Kröger, T.: *Hundertprozentiger Qualitätsnachweis – Zerstörungsfreie Schweißnahtprüfung mit aktiver Thermografie*; In: Der Praktiker 2/2010; S. 62 - 63