

Zerstörungsfreie Prüfung von Fügeverbindungen mit Induktions-Puls-Phasen-Thermografie

Christian ŠRAJBR^{*}, Klaus DILGER^{*}, Simon DEHAAN^{**}, Christian LAMMEL^{**},
Alexander DILLENZ^{***}

^{*} Institut für Füge- und Schweißtechnik, Technische Universität Braunschweig
^{**} IFF GmbH, Ismaning
^{***} edevis GmbH, Stuttgart

Kurzfassung. Die Induktionsanregung bietet der aktiven Thermografie eine leistungsfähige und gleichzeitig berührungslose Anregungsquelle. Die induktionsangeregte Thermografie eignet sich damit nach einigen Anpassungen sehr gut für eine automatisierte ZfP von Bauteilen. Es werden die Optimierung und Anwendung dieser Technik für die Qualitätsbewertung von Fügeverbindungen erläutert, da hierfür in der Regel keine vollständig automatisierbaren Prüfverfahren zur Verfügung stehen, die in der Lage sind sämtliche relevanten Fehlstellen zu detektieren.

Beschrieben werden die Ergebnisse der Prüfung von typischen Fügeverbindungen des Automobilbaus (Schweiß-, Kleb-, und mechanische Fügeverbindungen) anhand der Darstellung exemplarischer Ergebnisse der Bestimmung des Potentials und der Grenzen der Induktions-Puls-Phasen-Thermografie von verschiedenen Fügeverbindungen.

1. Einführung

Leichtbau ist aufgrund von steigenden Anforderungen an die Ressourceneffizienz das zentrale Thema in der Entwicklung von Strukturen bewegter Massen. Die daraus resultierende Optimierung lastabtragender Strukturen auf eine hohe Werkstoffausnutzung führt oftmals zur Verwendung von differentiellen Bauweisen. Diese Strukturen müssen jedoch prozesssicher und zuverlässig gefügt werden. Sichergestellt wird die Qualität der Fügeverbindungen in der Regel durch manuelle Prüfungen oder Prozesskontrollen. Ein Einsatz von aussagekräftigeren zerstörungsfreien Prüfverfahren scheidet bisher in der Regel 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 auf Basis einer induktiven Anregung. Neben der berührungslosen Messung der transienten 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. Da die Fügeverbindungen im modernen Automobilbau i. A. mindestens einen metallischen Fügepartner aufweisen, bietet es sich an, diese Technik für deren Qualitätsbewertung zu nutzen. Für die Umsetzbarkeit einer Prüftechnik muss jedoch eine Anlagentechnik vorhanden sein, die in der Lage ist, die Anregungsenergie reproduzierbar und homogen einzubringen. Des Weiteren müssen Erkenntnisse der allgemeinen Detektierbarkeit der Fehler und Grenzen der Be-

stimmbarkeit der Fehlergrößen vorliegen. Im Folgenden sollen exemplarische Ergebnisse hierzu erörtert werden.

2. Induktions-Puls-Phasen-Thermografie

2.1 Prinzip der Fehlerdetektion bei Fügeverbindungen

Die aktive Thermografie basiert auf der puls-, sinus- oder rechteckförmigen Beaufschlagung eines Prüfkörpers mit einer thermischen, elektrischen oder mechanischen Energie, die einen konduktiven Wärmetransport durch den Körper bzw. eine lokale Wärmeproduktion zur Folge hat. Dabei ist das Ziel, durch Inhomogenität oder Fehlstellen des Prüfobjekts transiente Temperaturunterschiede an der Oberfläche zu erzeugen, die mit Infrarotkameras aufgezeichnet und anschließend bewertet werden können. [1]

Für die Prüfung von Fügeverbindungen können prinzipiell nahezu sämtliche Anregungsquellen verwendet werden, typischerweise werden eine optische oder eine Anregung mit Ultraschall genutzt. Jedoch scheitert die Umsetzung der optischen Techniken in Prüflösungen von Fügeverbindungen häufig an der ineffizienten Energieabsorption von Metallen, die der Ultraschallanregung an der Problematik der berührenden Ankopplung der Sonotrode und der teilweise inhomogenen Anregung des Prüfbereichs bei dünnwandigen Bauteilen. Zudem kann auch die mechanische Dämpfung von Fügeverbindungen (vor allem Klebverbindungen) problematisch sein. Im Rahmen der hier dargestellten Untersuchungen wurde daher die Induktionsanregung als Anregungsquelle einer pulsförmigen Erwärmung genutzt. Diese Technik ermöglicht bei metallischen Werkstoffen eine energieeffiziente und vollständig berührungslose Erwärmung. Weiterhin ist deren lokale Wirkungsweise bei der Prüfung von Fügeverbindungen aufgrund der meist nur lokalen Anordnung auf zu prüfenden Bauteilen von Vorteil. [2]

In Abbildung 1 ist der prinzipielle Aufbau des verwendeten Messsystems und des Prinzips der Fehlerdetektion von Fügeverbindungen mit induktiv angeregter Thermografie, hier am Beispiel einer Klebverbindung, dargestellt.

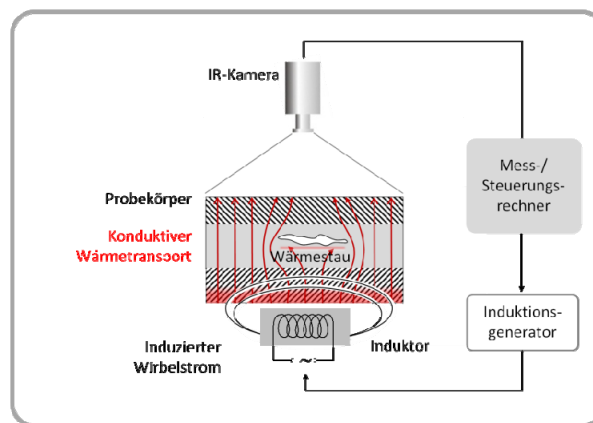


Abbildung 1. Prinzip der Fehlerdetektion an Klebverbindungen mit Induktionsthermografie

Mithilfe eines Induktors wird im Prüfbereich ein Wirbelstrompuls in eines der Füge-teile induziert, der dieses aufgrund von elektrischen Verlusten bzw. zusätzlich durch Ummagnetisierungsverluste (nur bei ferromagnetischen Werkstoffen) erwärmt. Die Erwärmung prägt dem Prüfbereich einen konduktiven Wärmetransport auf, der lokal durch Bereiche mit hohen thermischen Impedanzen (Grenzflächen) oder thermisch isolierenden Eigenschaften (Leerräume) gestört werden kann. Mithilfe der Infrarotkamera wird das Temperaturfeld der Oberfläche visualisiert und aufgezeichnet. Störungen im Wärmetransport können in diesen Aufnahmen als transiente Temperaturunterschiede zu Bereichen ei-

nes ungestörten Wärmetransports unterschieden werden. Die Auswertung erfolgt anhand einer frequenzabhängigen Phasendarstellung, die durch eine pixelweise durchgeführte diskrete Fouriertransformation (DFT) der Aufnahmesequenzen erzeugt wird. [1]

Fehlstellen von Fügeverbindungen weisen in der Regel die thermischen Eigenschaften auf, die zu Störungen im Wärmetransport durch den Prüfkörper führen. Beispiele für thermisch isolierende Eigenschaften sind Ablösungen in Klebverbindungen, Lufteinschlüsse und für hohe thermische Impedanzen z. B. nur berührende, aber nicht verbundene Grenzflächen, die als Fehlstellenart in nahezu jeder Fügeverbindung auftreten können. Weiterhin kann durch den Wärmetransport im Prüfbereich die Ausprägung der Fügeverbindung bestimmt werden. Der Anbindungsquerschnitt bei Überlappverbindungen ist ein Maß der Verbindungsfestigkeit und korreliert mit dem Bereich in dem der Wärmetransport stattfindet. Bei Klebverbindungen hängen die mechanischen Eigenschaften zudem von der Klebschichtdicke ab, die über unterschiedliche Laufzeiten der thermischen Wellen in den Phasenbildern der Puls-Phasen-Thermografie zu evaluieren sind.

2.2 Anpassung der Induktionsanlage

Für eine Weiterentwicklung des Prüfsystems bezüglich der Optimierung der Induktionsthermografie für die Belange der Prüfung von Fügeverbindungen sind zwei vordergründige Punkte zu nennen. Zum Einen wurde ein luftgekühlter Mittelfrequenzinduktionsgenerator der Fa. IFF mit einer Maximalleistung von $P_{\text{Nenn}}=5 \text{ kW}$ und einem Frequenzspektrum von $f_{\text{Ind}}=8 \dots 30 \text{ kHz}$ verwendet. Dieser Generator bietet neben der Unabhängigkeit von einem aktiven Kühlsystem den Vorteil, dass durch die Steuerung der Induktionspulse mittels Pulsweitenmodulation definierte Erwärmepulse abgegeben werden können. Zudem kann die Induktionsfrequenz unabhängig vom verwendeten Induktor vorgegeben werden. Desweiteren sind maßgeschneiderte Induktoren für verschiedene Anwendungsbereiche erhältlich. Im Gegensatz zu typischen Anwendungsfällen der Induktion, bei denen eher lange Erwärmepulse abgegeben werden und die Erwärmfelder durch stationäre Wärme Flüsse homogenisiert werden, müssen für die induktionsangeregte Thermografie die Anregungsbereiche innerhalb sehr kurzer Zeitintervallen (10-500 ms) homogen erwärmt werden. Inhomogene Erwärmungen haben laterale Wärme Flüsse im Prüfbereich zur Folge und führen damit evtl. zu einer Überlagerung von Fehlerbildern [3]. Es wurden daher die Erwärmbereiche verschiedener Induktoren untersucht, bezüglich der Anwendbarkeit zur Prüfung von Fügeverbindungen bewertet und z. T auf deren Belange weiterentwickelt.

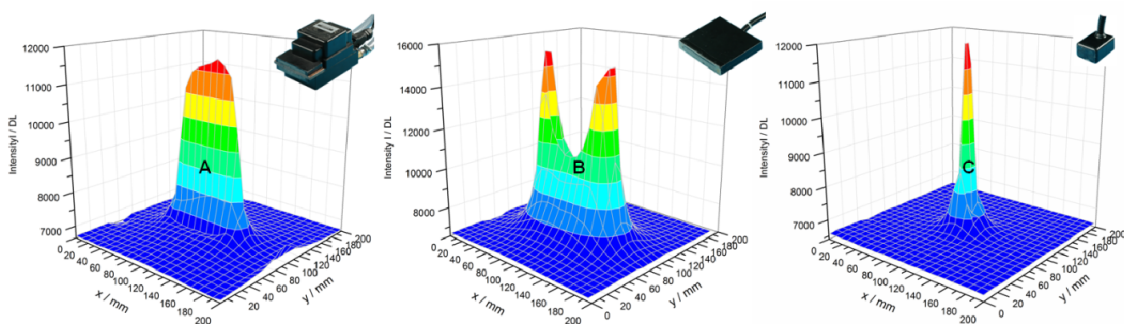


Abbildung 2. Erwärmfelder untersuchter Induktoren nach einem Erwärmepuls von $t_{\text{imp}}=50 \text{ ms}$

In Abbildung 2 sind die Erwärmfelder an einem Stahlblech am Ende eines Erwärmepulses mit der einer Länge von $t_{\text{imp}}=50 \text{ ms}$ von drei untersuchten Induktoren dargestellt. Induktor A erwärmt eine Fläche von ca. $100 \text{ mm} * 15 \text{ mm}$ relativ homogen und eignet sich damit gut für die Prüfung von linienförmigen Fügeverbindungen, Beispiele sind Laserschweißnähte und typische Klebverbindungen im Automobilbau. Induktor B weist eine etwas größere Erwärmfläche auf, diese ist jedoch nicht homogen ausgeprägt. Die Ma-

xima dieser Erwärmung überlagern die Ergebnisse der Thermografie, daher kann dieser Induktor nur in Ausnahmefällen genutzt werden. Induktor C weist hingegen einen eher punktförmigen Erwärmebereich innerhalb einer Kreisfläche von ca. 30 mm Durchmesser auf. Dieser Induktor kommt daher bei der Prüfung von punktförmigen Fügeverbindungen zum Einsatz, z. B. Widerstandspunktschweißungen oder mechanischen Fügeverbindungen.

3. Ergebnisse der Prüfung von Fügeverbindungen

Im Rahmen des zugrunde liegenden Projekts wurden verschiedene Fügeverbindungen bezüglich der Detektion von Fehlstellen mithilfe der induktionsangeregten Puls-Phasen-Thermografie mit Fokus auf die Automobilfertigung untersucht. Dies beinhaltete neben der Auswahl von - für die jeweilige Fügeverbindung relevanten - Fehlstellen die Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Erzeugung der Fehlstellen, die Probenerstellung und die Prüfung der generellen Detektierbarkeit der Fehlstellen und deren Fehlergrößen.

In den nachfolgenden Abschnitten soll die Anwendbarkeit der Induktionsthermografie zur Prüfung von Fügeverbindungen an exemplarischen Beispielen von Kleb-, Schweiß- und mechanischen Fügeverbindungen erläutert werden.

3.1 Klebverbindungen

Klebverbindungen werden in steigendem Maße für die Verbindung von Komponenten im Automobilbau eingesetzt. Gründe dafür sind neben Festigkeitsaspekten wie zum Beispiel dem flächigen Lastabtrag und der guten Eigenschaften im Crashfall auch die vielen positiven Sekundäreigenschaften von Klebverbindungen, z. B. die Dichtwirkung, die Verbindbarkeit hybrider Werkstoffkombinationen und die Reduktion des Steifigkeits-sprungs bei artverschiedenen Halbzeugen.

Analog zu anderen Fertigungsverfahren kann es bei Abweichungen im Prozessablauf bei der Herstellung von Klebverbindungen zu Fehlstellen innerhalb der Verbindung kommen. Relevant sind in der Regel Delaminationen in der Klebschicht oder in der Grenzfläche von Klebstoff zu den Fügeteilen, Poren und Lufteinschlüsse, eine verringerte bzw. nicht vorhandene Adhäsion zwischen Fügeteil und Klebstoff (sog. „Kissing Bonds“) und Abweichungen in der geometrischen Ausprägung der Klebung (Klebnahtbreite und Klebschichtdicke). [4]

Dargestellt werden die Ergebnisse der generellen Detektierbarkeit von Fehlstellen in strukturellen Klebverbindungen. Des Weiteren soll aber auch das Potential für thermografisch ungünstigere Fälle, d. h. anderer Fügeteilwerkstoffe und -dicken bzw. Klebstoffchemien und -dicken erläutert werden.

3.1.1 Detektierbarkeit von Fehlstellen bei strukturellen Klebverbindungen

Strukturelle Klebverbindungen werden in der Automobilfertigung aufgrund der hohen Steifig- und Festigkeiten der verwendeten Klebstoffe zur Verbindung von lastabtragenden Strukturen eingesetzt. Es werden hierfür i. A. heißhärtende, einkomponentige Epoxidklebstoffe eingesetzt, die in den nachfolgenden KTL-Trocknungsprozessen vernetzen.

Zur Prüfung der Detektierbarkeit von Fehlstellen in diesen Klebverbindungen wurden einschnittig überlappte Probekörper mit einer Überlappung von $l_{\text{Ü}} = 20$ mm hergestellt. Als Fügeteile wurden, wie in der klassischen Schalenbauweise des Automobilbaus üblich, verzinkte Stahlbleche mit einer Blechdicke von $t_{\text{B}} = 0,8$ mm gewählt. Die Klebschichtdicke des einkomponentigen Epoxidklebstoffs wurde mittels Abstandshalter auf $t_{\text{KS}} = 0,3$ mm eingestellt. Es wurden Probekörper von sämtlichen relevanten Fehlstellen hergestellt. Delaminationen bzw. fehlender Klebstoff wurden durch PTFE-Folien erzeugt, die aus der

Klebverbindung nach dem Abbinden des Klebstoffs wieder herausgezogen wurden, Luft-einschlüsse durch das partielle Einlegen von Polystyrol-Kügelchen, die bei der Heißhärtung des Klebstoffs durch Ausgasen zu einer Porosität der Klebschicht führen, eine graduelle Änderung der Klebschichtdicke durch spezielle Abstandshalter und „Kissing Bonds“ durch einen partiell aufgetragenen PTFE-Film, der die Adhäsion zwischen Klebstoff und Füge-teilen verhindert. Als Referenz dienten Probekörper mit einer idealisierten Klebschicht, die keine Fehler aufweist. Bei sämtlichen Probekörpern mit Fehlstellen (mit Ausnahme der Probekörper mit fehlerhafter Dicke der Klebschicht) wurden drei Fehlergrößen eingebracht, jeweils über eine Breite von $b_{F,g} = 20 \text{ mm}$, $b_{F,m} = 10 \text{ mm}$ und $b_{F,k} = 5 \text{ mm}$.

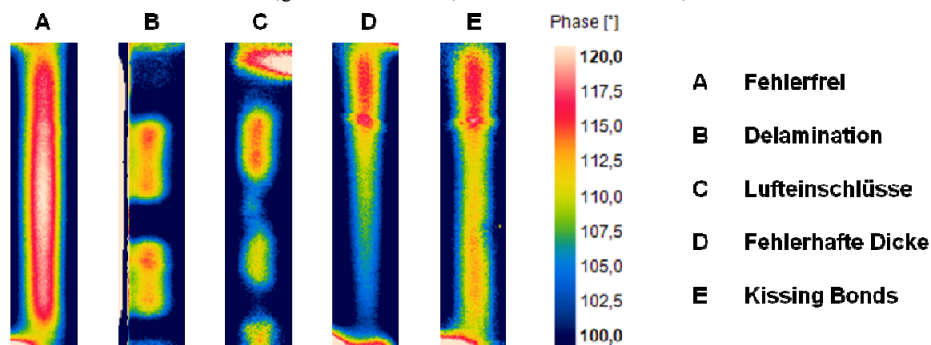


Abbildung 3. Ergebnisse d. Induktions-Puls-Phasen-Thermografie an strukturellen Klebverbindungen

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis (dargestellt als Phasenbild) der induktiv angeregten Puls-Phasen-Thermografie unter der Verwendung eines Induktors mit linienförmigem Erwärmfeld (Abbildung 2: Induktor A). Mit Ausnahme der „Kissing Bonds“, die nahezu keinen Kontrast gegenüber der fehlerfreien Klebverbindung liefern, sind bei sämtlichen fehlerbehafteten Klebverbindungen die Fehlstellen zu erkennen. Die Proben mit Delaminationen und Porositäten zeigen eine starke Änderung des Kontrasts in den Bereichen der eingebrachten Fehlstellen, die Klebnaht mit einer graduierten Änderung der Klebschichtdicke einen ebenso abfallenden Kontrast der Klebschicht. Die Breite der Klebnaht ist desweiteren über den Kontrast zum unverklebten Bereich bestimmbar.

3.1.2 Prüfbarkeit von Klebverbindungen mit ungünstigeren thermografischen Verhältnissen

Weiterhin wurden auch Proben mit Werkstoffen und Klebstoffen mit weniger optimalen thermografischen Eigenschaften geprüft. Im Bereich der strukturellen Klebverbindungen sind das zum Einen Proben die zwar ebenso mit dem einkomponentigen Klebstoff gefügt, bei denen jedoch Aluminiumfügeteile mit einer Dicke von $t = 1,2 \text{ mm}$ verwendet wurden. Desweiteren wurden Stahlverbindungen mit einem Klebstoff mit einer etwas geringeren Steifigkeit, einem modernen zweikomponentigem Polyurethanklebstoff, gefügt. Beide Varianten haben in Untersuchungen mit ultraschallangeregter Thermografie zu deutlich schlechteren Detektierbarkeit geführt. [5]

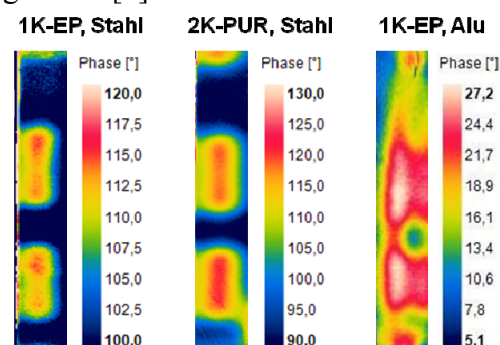


Abbildung 4. Vergleich der Detektierbarkeit von Delaminationen in Klebverbindungen mit unterschiedlichen thermografischen Eigenschaften

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Prüfung von Proben mit solchen thermischen Eigenschaften im Vergleich am Beispiel des Fehlers „Delaminationen“ dargestellt. Nach einer Anpassung der Prüfparameter (Anregungspulsdauer und Frequenz der DFT) bei den Aluminiumproben sind die drei Fehlstellen unterschiedlicher Größe generell bei jeder der Verbindung detektierbar. Dabei ist bei den 2 K-PUR-Klebstoffen eine Verbesserung des Fehlerkontrasts festzustellen. Die Aluminiumverbindung zeigt hingegen einen deutlich schwächeren Fehlerkontrast und durch die hohe thermische Leitfähigkeit des Materials nimmt zudem die Bestimmbarkeit des Fehlerorts ab.

Eine weitere prüfrelevante Klebverbindung ist die sog. semistrukturale Klebverbindung. Diese werden vorwiegend zur Verbindung von Glasbauteilen mit der Karosserie von Fahrzeugen genutzt. Aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der verbundenen Werkstoffe werden hier elastische Dickschichtklebungen eingesetzt. Diese Klebverbindungen sind weniger festigkeitsrelevant, Fehlstellen führen hier allerdings zu Undichtigkeiten, die auszuschließen sind. [6]

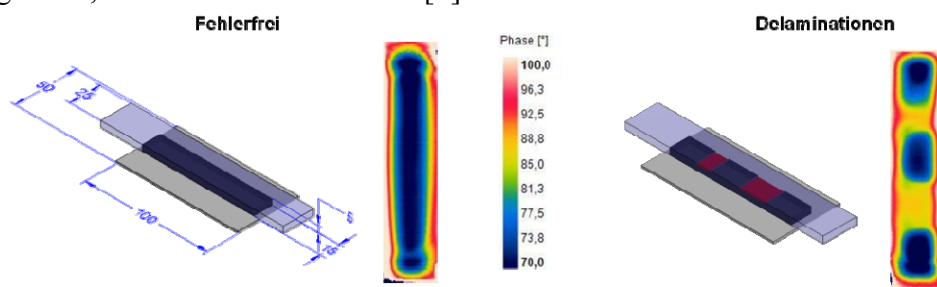


Abbildung 5. Ergebnis der Prüfung einer Dickschichtklebung von Glas und Metall, dargestellt jeweils Probekörper und Ergebnis der Thermografie von fehlerfreier und Klebung mit Delaminationen

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Prüfung von Probekörpern, die typische Eigenschaften einer solchen Klebung aufweisen. Es wird ein KTL-beschichtetes Karosserieblech mit einer Dicke von $t_B = 1,1$ mm mit einem Glasfügeteil der Dicke $t_G = 4,9$ mm verbunden. Die Klebung wird mit einem einkomponentigen Polyurethanklebstoff mit einer Klebschichtdicke von $t_{KS} = 5$ mm ausgeführt. Auch bei diesen Klebverbindungen mit thermografisch relativ ungünstigen Verhältnissen können die relevanten Fehlstellen detektiert werden. In der Abbildung ist dies am Beispiel einer Delamination zwischen Glas und Klebstoff dargestellt.

3.2 Schweißverbindungen

Im Rahmen des Projekts sind diverse Schweißverbindungen die im Automobilbau relevant sind untersucht worden. Neben der klassischen Verbindungstechnik, den Widerstandspunktschweißverbindungen, sind Bolzenschweiß- und Laserschweißverbindungen untersucht worden. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Prüfung des Anbindungsquerschnitts, da dieser ein Maß der Festigkeit der Verbindung ist. Aber auch andere Fehler, wie z. B. Poren und Schmelzbadauswürfe, wurden untersucht.

Das Potential der Induktions-Puls-Phasen-Thermografie soll nachfolgend am Beispiel des Laserschweißens dargestellt werden. Die hohen Prozessgeschwindigkeiten und der geringe Wärmeverzug prädestinieren dieses Verfahren zum Fügen dünner Blechkomponenten. Es lassen sich hiermit sich insbesondere Überlappstöße schnell und kostengünstig herstellen. Die Nutzung der Vorteile des Verfahrens erfordert jedoch häufig ein Optimum der Nahtqualität und Anbindungsquerschnitt. Laserschweißnähte können bei Abweichungen in Schweißprozess diverse visuell detektierbare Fehlstellen, wie z. B. Schmelzbadauswürfe, Risse und Poren, aufweisen. Besonders kritisch sind aber die nicht visuell detektierbaren 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. [7]

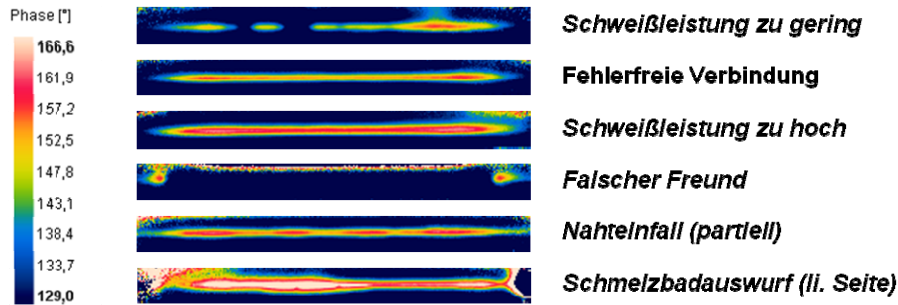


Abbildung 6. Ergebnis der Prüfung von Laserschweißverbindungen von dünnen Stahlblechen

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Prüfung von Laserschweißnähten einer Überlappverbindung zweier Stahlbleche der Dicke $t_B=0,75$ mm im Vergleich zu einer fehlerfreien Verbindung. Erkennbar ist hier, dass neben den visuell an der Probenoberfläche detektierbaren Fehlstellen, hier am Beispiel eines partiellen Nahteinfalls und eines Schmelzbadauswurfs dargestellt, auch die nicht visuell detektierbaren Abweichungen zu einer einwandfreien Verbindung detektierbar sind. So ist der Unterschied im Anbindungsquerschnitt der beiden Blechlagen, der durch eine Variation der Schweißleistung entsteht, in der Ausprägung des Phasenkontrasts eindeutig zu identifizieren. Auch die „Falschen Freunde“, bei denen gar keine Ausprägung der inneren Verbindung vorhanden ist, sind in den thermografischen Aufnahmen aufgrund der sehr schlechten Wärmeleitung zwischen den Blechen klar von einer fehlerfreien Verbindung unterscheidbar.

3.3 Mechanische Fügeverbindungen

Die Untersuchungen der Detektierbarkeit von Fehlstellen in mechanischen Fügeverbindungen umfassten die im Automobilbau typischerweise bei der Verbindung hybrider Werkstoffe zur Anwendung kommenden Verfahren, das Halbhohlstanznieten und das Clinchen.

Als Beispiel der Anwendbarkeit werden hier die Ergebnisse an Clinchverbindungen dargestellt. Das Clinchen ist ein umformtechnisches Fügeverfahren bei dem eine form- und kraftschlüssige Verbindung mittels Durchsetzen und Einsenken des oberen Bleches und einem anschließenden Stauchen erreicht wird. Es bietet, wie alle mechanischen Fügeverfahren, die Verbindungsmöglichkeit artungleicher Werkstoffe (z. B. Stahl mit Aluminium) ohne eine thermische Belastung der Fügepartner mit gleichzeitig guten Eigenschaften unter dynamischer Belastung. Es wird daher im Automobilbau zunehmend als Fixierung von unausgehärteten Klebverbindungen aber auch als eigenständiges Fügeverfahren eingesetzt. Relevante Fehler sind bei diesem Fügeverfahren geometrische Abweichungen im Clinchpunkt, die dann global oder lokal zu einer Reduktion von Hinterschnitt oder Halsdicke führen und somit die Verbindungsfestigkeit herabsetzen können. [8]

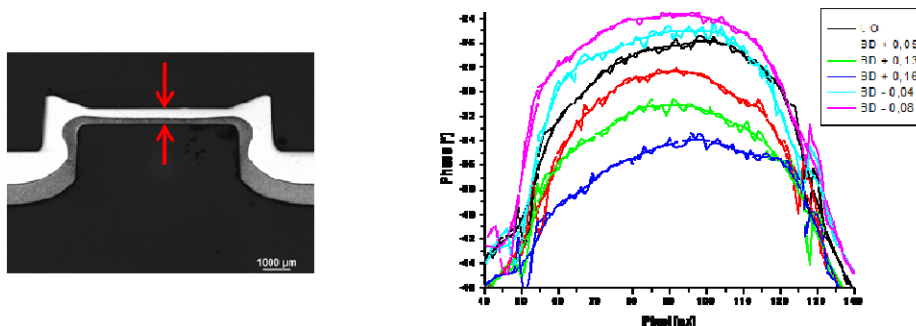


Abbildung 7. Ergebnis der Bestimmung der Bodendicke von Clinchpunkten

Globale geometrische Abweichungen des Clinchpunkts entstehen in der Serienproduktion in der Regel durch eine Änderung von Reibungswerten der Bleche (z. B. Beölung oder Änderungen der Beschichtungen) oder Abweichungen der Kennwerte von verschiedenen Werkstoffchargen. Dadurch entsteht bei gleicher Fügekraft eine geringere oder größere Bodendicke, die ein Maß für Hinterschnitt und Halsdicke des Clinchpunkts ist. Durch die Anpassung der Induktions-Puls-Phasen-Thermografie ist es möglich, diese sonst nur manuelle taktil messbare Größe auch bei geringen Abweichungen automatisiert und berührungslos zu bestimmen. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse einer linienförmigen Auswertung der Phasenwerte durch die Mitte von Clinchpunkten einer Verbindung von Stahl ($t_B=0,8$ mm) und Aluminium ($t_B=1,2$ mm) mit unterschiedlichen Bodendicken dargestellt. Es ist zu erkennen, dass selbst geringe Abweichungen von minimal 0,04 mm zu detektieren sind.

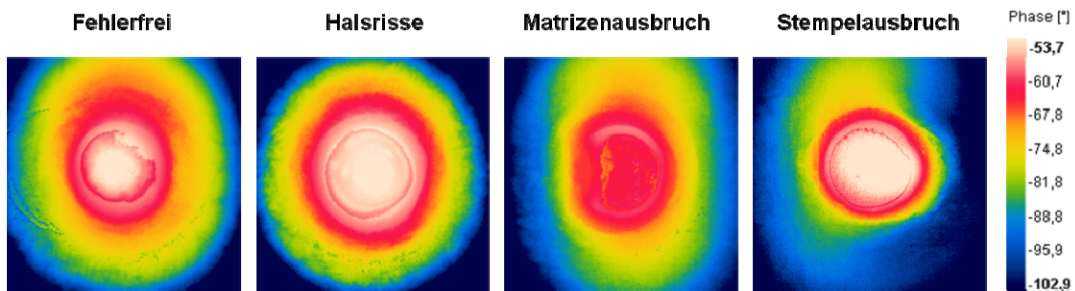


Abbildung 8. Bestimmung lokaler Fehler von geclinchten Stahl / Aluminium Verbindungen

Auch andere Abweichungen in der geometrischen Ausprägung dieser Clinchverbindungen sind in den Phasenbildern zu detektieren. Abbildung 8 stellt hierfür exemplarische Ergebnisse dar. Die fehlerfreie Verbindung zeigt eine Ausbildung von nahezu konzentrischen Abstufungen der Phasenlage um die Clinchpunktmitte. Tritt in dem Hals des Clinchpunkts ein Riss oder eine Einschnürung auf, so ändert sich die Verteilung der Phasenlagen drastisch. Noch eindeutiger lassen sich lokale Abweichungen des Clinchpunkts detektieren, die z. B. bei Beschädigungen der Clinchwerkzeuge auftreten können. Sowohl bei einem Ausbruch aus Stempel als auch der Matrice ändert sich der Hinterschnitt der Verbindung lokal stark, was die konzentrische Ausprägung der Phasenlagenunterschiede stört.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die induktionsangeregte Puls-Phasen-Thermografie ist ein probates Mittel zur Detektion von Fehlstellen in einer Vielzahl von Fügeverbindungen die im Automobilbau, aber auch in anderen Industriebereichen eingesetzt werden. Mit Ausnahme von „Kissing Bonds“ in Klebverbindungen können nach einer Anpassung der Induktionsanregung bezüglich Anregungsimpulsen und der Auswahl eines Induktors mit einem geeigneten Erwärmfeld sämtliche Fehlstellen in den untersuchten Kleb-, Schweiß- und mechanischen Fügeverbindungen detektiert werden. Es können mit dieser Anregung des Wärmetransports im Bauteil aufgrund der energieeffizienten lokalen Erwärmung auch Fügeverbindungen geprüft werden, die mit anderen thermografischen Verfahren nicht prüfbar sind. Für eine Umsetzung von Prüfeinrichtungen im Umfeld einer Serienproduktion ist zudem die berührungslose Wirkungsweise von Vorteil. Somit ist diese Technik im Herstellungsprozess von Fügeverbindungen mit relativ hohen Prüfgeschwindigkeiten und automatisierbaren Verfahren anwendbar, aber aufgrund des geringen apparativen Aufwands auch als mobile, manuelle Prüflösung.

5. Danksagung

Die dargestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des laufenden ZIM-KOOP-Projekts (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) „*AkThIndu – Optimierung der Induktions-thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung von Fügeverbindungen*“, Förderkennzeichen: KF2012203JT9, Laufzeit: 01.10.2009 bis 30.09.2011, mit finanzieller Förderung durch die AiF durchgeführt. Für die Förderung des Projektes sei an dieser Stelle ausdrücklich gedankt.

6. Referenzen

- [1] Maldague, X. P. V: *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, New York: John Wiley and Sons, Inc., 2001
- [2] Kröger, T.: *Hundertprozentiger Qualitätsnachweis – Zerstörungsfreie Schweißnahtprüfung mit aktiver Thermografie*; In: *Der Praktiker* 2/2010; S. 62 - 63
- [3] Vrana, J.: *Grundlagen und Anwendungen der aktiven Thermographie mit elektromagnetischer Anregung*; Saarbrücker Reihe Materialwissenschaft und Werkstofftechnik * Band 18 (Dissertation), Aachen: Shaker, 2009
- [4] Adams, R.D.; Drinkwater, B.W.: *Non-destructive testing of adhesively-bonded joints*; In: *Int. J. of Materials and Product Technology*; Vol. 14 (1999); Nos 5/6; pp. 385-398
- [5] Hasenberg, D.: *Zerstörungsfreie Prüfung geklebter Verbindungen mittels Ultraschall angeregter Thermografie*; Forschungsberichte des Instituts für Füge- und Schweißtechnik, Band 18 (Dissertation), Aachen: Shaker, 2006
- [6] Habenicht, G.: *Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen, 3. erw. Auflage*; Berlin: Springer Verlag; 1997
- [7] 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
- [8] Hahn, O.; Klemens, U.: *Fügen durch Umformen: Nieten und Durchsetzfügen, Innovative Verbindungsverfahren für die Praxis*; Stahl-Dokumentation, Studiengesellschaft Stahlanwendung; Band 707 (1996); Düsseldorf