

Vergleich der induktiv angeregten Shearografie und Thermographie zur Fehlerdetektion an hochfesten Strukturklebungen und elastischen Dickschichtklebungen

Igor KRYUKOV¹, Martin KAHLMEYER¹, Stefan BÖHM¹

¹ Universität Kassel - Fachgebiet für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren (tff), Kassel

Kontakt E-Mail: i.kryukov@uni-kassel.de

Kurzfassung. Zum Fügen von unterschiedlichen Materialien vor dem Hintergrund des werkstoffoptimierten Leichtbaus hat das Kleben in den vergangenen Jahren in den industriellen Anwendungen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Der Klebprozess ist jedoch ein empfindlicher Fertigungsprozess, bei dem ein hohes Maß an Überwachung notwendig ist. Die 2016 in Kraft getretene DIN 2304 definiert vier Sicherheitsklassen von Klebverbindungen und benennt Anforderungen an die Überwachung von Mess- und Prüfmittel. Als Möglichkeit zum Nachweis einer fehlerfreien Klebnaht bietet sich die zerstörungsfreie Prüfung an. Die beiden etablierten Verfahren Ultraschall- und Durchstrahlungsprüfung sind aufgrund der hohen Prüfdauer nur in wenigen Fällen innerhalb der Serienfertigung einsetzbar. Hier rücken die aktive Thermografie und die Shearografie zunehmend in den Blickpunkt der Klebindustrie.

Beide Prüfverfahren arbeiten berührungslos und können große Flächen in kurzer Zeit erfassen, messen jedoch unterschiedliche physikalische Größen. Während bei der aktiven Thermografie das thermische Gleichgewicht des Prüfkörpers gestört und die thermische Diffusivität betrachtet wird, wird bei der Shearografie der Verformungsgradient der Oberfläche des Prüfobjekts als Reaktion auf eine Belastung ausgewertet. Aus einer lokalen Abweichung der thermische Diffusivität beziehungsweise des Verformungsgradienten lässt sich auf Fehler in der Klebnaht schließen.

Im Rahmen dieser Untersuchung wird das Einsatzpotential der Shearografie mit dem der aktiven Thermografie zur zerstörungsfreien Prüfung von Klebverbindungen verglichen. Als Anregungsart wird bei beiden Verfahren die Induktionsanregung verwendet. Untersucht werden unterschiedliche Fehlerarten (z. B. fehlender Klebstoff, Lufteinschlüsse sowie „Kissing Bonds“) bei artungleichen Struktur- und Dickschichtklebungen. Bewertet werden die Detektierbarkeit der einzelnen Fehlertypen pro Prüfmethode sowie der Mehrwert einer möglichen Kombination beider Systeme.

1. Einführung

Das Kleben gewinnt durch seine zahlreichen Vorteile wie einer flächigen Krafteinleitung und der Möglichkeit zur Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe und -dicken gegenüber alternativer Füge-technologien zunehmend an Bedeutung. Dennoch bleibt diese Füge-technologie noch immer unter ihrem Potential. Ein Grund für diese Tatsache ist, dass der sensible Klebprozess eine erhöhte Fehleranfälligkeit aufweist und somit Qualitätssicherungsmaßnahmen voraussetzt. Insbesondere für Verbindungen mit hoher Sicherheitsrelevanz oder für Fügeprozesse, die mit einer hohen Wertschöpfung verbunden sind bzw. zu Beginn von aufwändigen Prozessketten liegen, wäre oftmals eine 100%-Kontrolle sinnvoll. [1]

Um wirtschaftlich derartige Qualitätskontrollen durchzuführen, eignen sich ausschließlich Methoden der zerstörungsfreien Verbundprüfungen. Etablierte Methoden wie Ultraschall- und Durchstrahlungsprüfung erlauben in vielen Fällen hochpräzise Aussagen zu Inhomogenitäten und Defekten [2]. Diese sind jedoch aufgrund ihres finanziellen und organisatorischen Aufwandes für zahlreiche Klebanwendungen im industriellen Maßstab kaum sinnvoll umsetzbar.

Verfahren der Thermografie und Shearografie setzen genau hier an [3, 4]. Diese sind kostengünstiger und lassen sich aufgrund ihrer hochsensiblen, berührungslosen, schnellen, robusten und reproduzierbaren sowie bildgebenden Funktionsweise deutlich einfacher in Produktionsprozesse integrieren. [5, 6]

Besonderer Vorteil der Thermografie ist die Möglichkeit des sehr schnellen, zerstörungsfreien Nachweises von Schäden durch Delamination an großen und komplexen Bauteilen. [7] Die Methode der Shearografie hat bereits gezeigt, dass thermoelastische Effekte auf diese Weise präzise und kosteneffizient zerstörungsfrei quantifiziert werden können und sogar indirekt Rückschlüsse auf die Adhäsionseigenschaften im geklebten Werkstoffverbund möglich werden. [5]

Dennoch können derzeit die einzelnen Verfahren nicht sämtliche relevanten Fehler erkennbar machen. Da Thermografie und Shearografie jedoch divergente physikalische Prinzipien nutzen, beschäftigt sich diese Veröffentlichung mit der Frage, inwieweit durch eine Kopplung von Thermografie und Shearografie eine Erweiterung des Fehlerdetektionsspektrums möglich wird.

2. Prüfkörpergeometrie

Für die Durchführung der Untersuchung wurden Prüfkörper mit simulierten Defekten hergestellt. Der obere Fügepartner bestand aus einer Aluminiumlegierung (EN AW 6082, 2 mm Dicke), das untere Substrat aus einem Tiefziehstahl (DC04, 1 mm Dicke). Die Substrate mit einer Länge von 120 mm und einer Breite von 50 mm wurden einschnittig überlappend (20 mm Überlappungslänge) miteinander verklebt, sodass sich eine Klebfläche von 120 mm x 20 mm ergab.

Untersucht wurden zwei Klebstoffarten. Für die strukturellen Klebungen wurde ein 2K-PUR Klebstoff in einer Klebschichtdicke von 0,25 mm verwendet (E-Modul 1000 MPa, Zugfestigkeit 23 MPa, Reißdehnung 17 %, Shore-D Härte 65, Glasübergangstemperatur 48 °C, Temperaturbeständigkeit bis +125 °C). Zur Einstellung der gewünschten Klebschichtdicke wurden Glaskugeln mit einem Durchmesser von 0,25 mm eingesetzt. Als elastischer Klebstoff wurde ein geboosteter 1K-PUR Klebstoff eingesetzt (E-Modul 30 MPa, G-Modul 7 MPa, Zugfestigkeit 10 MPa, Reißdehnung 300 %, Shore-D Härte 30, Glasübergangstemperatur -55 °C, Temperaturbeständigkeit bis +80 °C) [8]. Die

Klebschichtdicke wurde, sofern nicht anders angegeben, durch spezielle PTFE-Formen auf eine konstante Höhe von 5 mm eingestellt.

Die relevanten Fehlertypen wurden für diese Untersuchung mit einer Ausdehnung von 10 mm und über die gesamte Breite der Klebnaht eingebracht (siehe Abb. 1). Ausnahme dieser Geometrie war das Fehlerbild der ungleichmäßige Klebstoffdicke. Dafür wurden Prüfkörper hergestellt, bei denen sich kontinuierlich und über die gesamte Länge der Klebnaht die Schichtdicke von ca. 0 mm bis auf 0,25 mm bei strukturellen bzw. bis auf 5 mm bei elastischen Klebungen erhöhte.

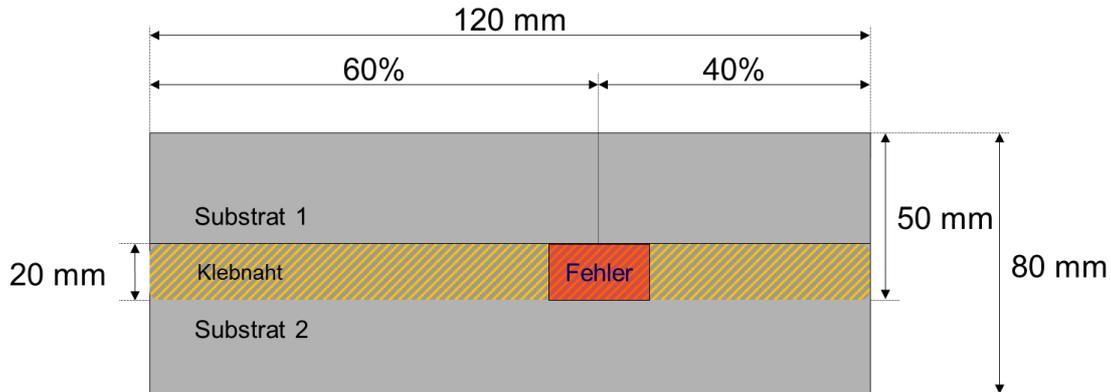


Abb. 1: Schematische Darstellung der allgemeinen Prüfkörpergeometrie sowie der Positionierung der eingebrachten Fehler

Zur Erzeugung einer gleichförmigen diffusen Reflexion der kohärenten Beleuchtung bei der Shearografiemessung sowie zur Reduzierung von thermischen Reflexionen auf der metallischen Substratoberfläche für die Thermografiemessung, wurde auf allen Prüfkörpern ein weißer Decklack appliziert.

3. Relevanten Fehlertypen und ihre Erzeugung

Für die Untersuchung wurden sieben realitätsnahe Fehlertypen der Klebtechnik definiert und reproduzierbar erzeugt. Der Fehlernachweis erfolgte nach zerstörungsfreier Prüfung durch zerstörende Prüfung. Zur Referenzierung wurden fehlerfrei verklebte Prüfkörper verwendet.

Folgende Fehlertypen wurden definiert und, wie beschrieben, hergestellt:

- fehlender Klebstoff, simuliert durch (PTFE-)Einleger in Klebschichtdicke, die nach Vernetzung des Klebstoffs wieder entfernt wurden
- Lufteinschluss im Klebstoff, simuliert durch runde Styroporeinleger (\varnothing 10 mm), die nach Klebstoffapplikation in den noch flüssigen Klebstoff eingebracht wurden
- ungleichmäßige Klebstoffdicke, simuliert durch Nichtverwenden von Glaskugeln bzw. einseitiges Entfernen der Abstandshalter (PTFE-Form)
- inhomogene Durchmischung bzw. variierende Klebstoffeigenschaften, simuliert durch ein verändertes Verhältnis von Harz und Härter (nur bei strukturellen Klebungen betrachtet)
- falsches Mischungsverhältnis bzw. fehlende Aushärtung, simuliert durch das Auftragen von nur einer Komponente (Harz oder Härter) bei strukturellen Klebungen bzw. durch die Verwendung von ungeboostetem Klebstoff bei elastischen Klebungen
- Delaminationen als Ablösungen des Klebstoffs vom Substrat, simuliert durch Einlegen von PTFE-Streifen zwischen Klebstoff und Aluminiumsubstrat, die nach fortschreitender Aushärtung entfernt wurden
- „Kissing Bonds“ als aufliegende aber nicht am Substrat haftende Klebstoffschicht, simuliert durch das gezielte Auftragen einer dünnen Silikonschicht auf dem

Aluminiumsubstrat bei Strukturklebungen bzw. eines dünnen PTFE-Films bei Dickschichtklebungen

4. Prüfaufbau

Die Shearografiemessung wurde mit einem SE2-Sensor mit 5 Megapixel CCD-Chip der Firma isi-sys GmbH durchgeführt. Zur kohärenten Beleuchtung wurden Laserdioden mit einer Wellenlänge von 658 nm verwendet. Als Scherparameter wurden ein Winkel von 45° und ein Scherabstand von 3 mm gewählt.

Zur Thermografiemessung wurde die FLIR SC5600-M eingesetzt. Gemessen wurden in Vollbildauflösung (640 Pixel x 512 Pixel) bei einer Aufnahmefrequenz von 100 Hz und einer Integrationszeit von 1 ms.

Die induktive Anregung zur homogenen Erwärmung der gesamten Klebfläche erfolgte mittels eines Koaxialinduktors mit einer Induktionsfläche von 25 mm x 110 mm. Der verwendete Induktionsgenerator hatte eine Ausgangsleistung von 5 kW. In dieser Systemkonfiguration konnten Induktionsfrequenzen zwischen 12,5 kHz und 30 kHz realisiert werden.

Zur shearografischen bzw. thermografischen Untersuchung der Prüfkörper wurde der in Abb. 2 dargestellte Prüfaufbau verwendet.

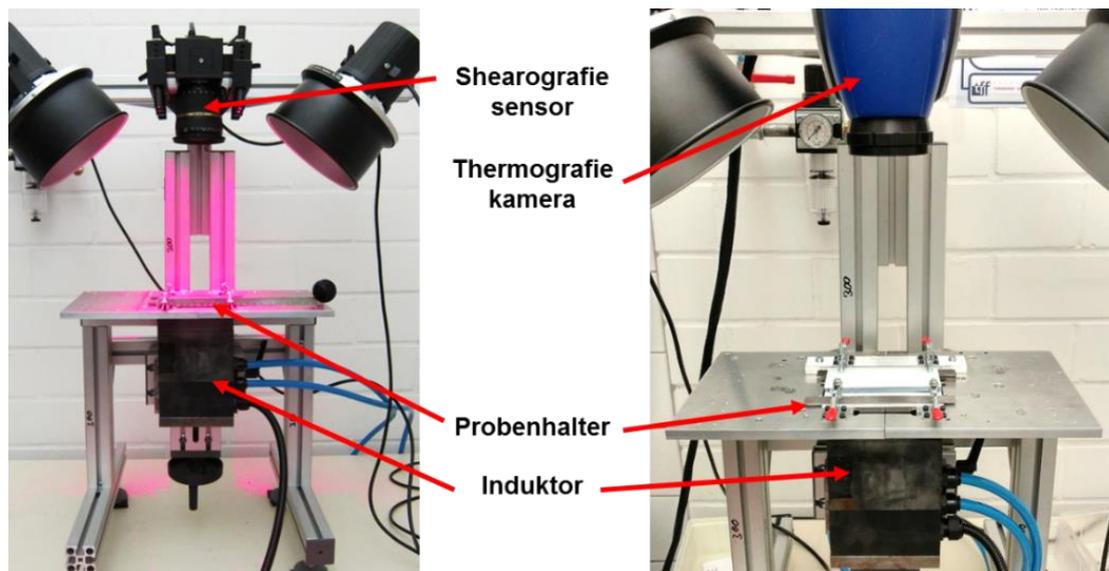


Abb. 2: Darstellung des Prüfaufbaus beider Messsysteme mit Probenhalter und Induktor

Die Prüfkörper wurden zur Prüfung auf die Auflage gelegt und zum jeweiligen Messsystem ausgerichtet. Während der Induktionsanregung wirkten durch die Lorentzkraft hervorgerufene Abstoßungskräfte auf die elektrisch leitfähigen Substrate, die kompensiert werden mussten. Damit die Prüfkörper sich während der Messungen nicht verschieben und eine Störung der Messung verursachen, wurden diese mittels Probenhaltern fixiert. Dazu wurden 4 Spanner sowie 2 zwischen den Spannern verlaufende Spannleisten verwendet (siehe Abb. 3). Neben der Verhinderung einer Bewegung der Prüfkörper und Einhaltung des Kopplungsabstandes zum Induktor von 0,2 mm konnte auch die Gesamtdeformation der Prüfkörper an sich reduziert und gleichzeitig die Detektierbarkeit von Fehlern insgesamt verbessert werden.

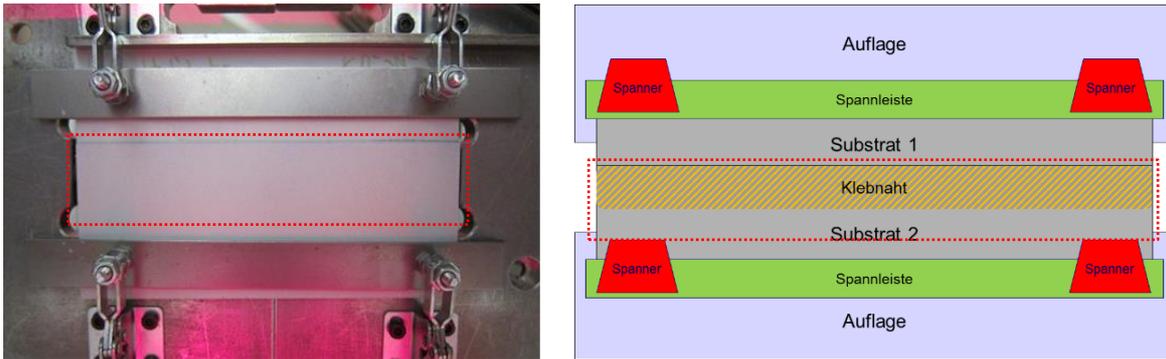


Abb. 3: Fixierung der Prüfkörper auf dem Messaufbau mit Messbereich (rote Umrandung), links: Fotografie, rechts: schematische Darstellung

Der untersuchte Messbereich ist in Abb. 3 rot umrandet dargestellt. Das Messfenster wurde jeweils so definiert, dass der Rand des Messbereichs sowohl im Shearogramm als auch im Thermogramm an der oberen Kante des oberen Substrates verlief. Ausgewertet wurde der Bereich oberhalb der Klebnaht sowie ein Teil des oberen Substrates.

5. Fehlerdetektion mittels induktiv angeregter Shearografie und Thermografie

Die Prüfung erfolgte zuerst durch Shearografie und anschließend durch Thermografie. Dabei wurden die Prüfkörper zunächst so geprüft, dass das Aluminiumsubstrat zum Induktor orientiert und das Stahlsubstrat zum Messsystem ausgerichtet war. Anschließend wurden die Prüfkörper gewendet und in umgekehrter Orientierung vermessen. Auf diese Weise konnte der Einfluss der Orientierung auf die Messung evaluiert werden.

Als Induktionsparameter wurden eine kurze Anregungsdauer von 0,1 s und eine Frequenz von 12,5 kHz zur Erzielung einer für diese Systemkonfiguration maximalen Eindringtiefe verwendet [9]. Die Pulsweitenmodulation (PMW) lag bei der Shearografiemessung bei 200 % und wurde für die Thermografiemessung auf 525 % (Anregung des Tiefziehstahlsubstrats) bzw. 750 % (Anregung des Aluminiumsubstrats) erhöht. Eine Schädigung der Klebschicht konnte jedoch selbst bei diesen Induktionsparametern durch die geringe Erwärmung (25 K bei Erwärmung des Tiefziehstahls bzw. 2 K bei Erwärmung des Aluminiums) ausgeschlossen werden. Die maximale Prüfdauer wurde mit Hinblick auf eine mögliche industrielle Umsetzung für beide Verfahren auf 10 Sekunden begrenzt.

Zur Auswertung wurden nach der Shearografiemessung Hoch- bzw. Tiefpassfilter eingesetzt. Bei Bedarf erfolgte eine Demodulation. Bei der Thermografie wurde eine Lockin-Anregung verwendet. Die Auswertung erfolgte über Phasenbilder bei einer Auswertefrequenz von 0,1 Hz.

5.1. Auswertung der hochfesten Strukturklebungen

Für die Auswertung der Fehlerbilder wurden Referenzmessungen mittels Shearografie und Thermografie an fehlerfreien Prüfkörpern durchgeführt (siehe Abb. 4). Abweichungen von den Referenzmessungen stellten dabei Hinweise auf Unregelmäßigkeiten in der Klebnaht dar.

Im Shearogramm war die Klebnaht gleichförmig dargestellt. Begrenzt wurde die Klebnaht durch eine horizontale dunkle Linie, die die Klebkante darstellte (siehe Abb. 4 oben). Das Phasenbild des Thermogramms zeigte einen gleichmäßigen Phasenverlauf oberhalb der Klebnaht (siehe Abb. 4 unten).

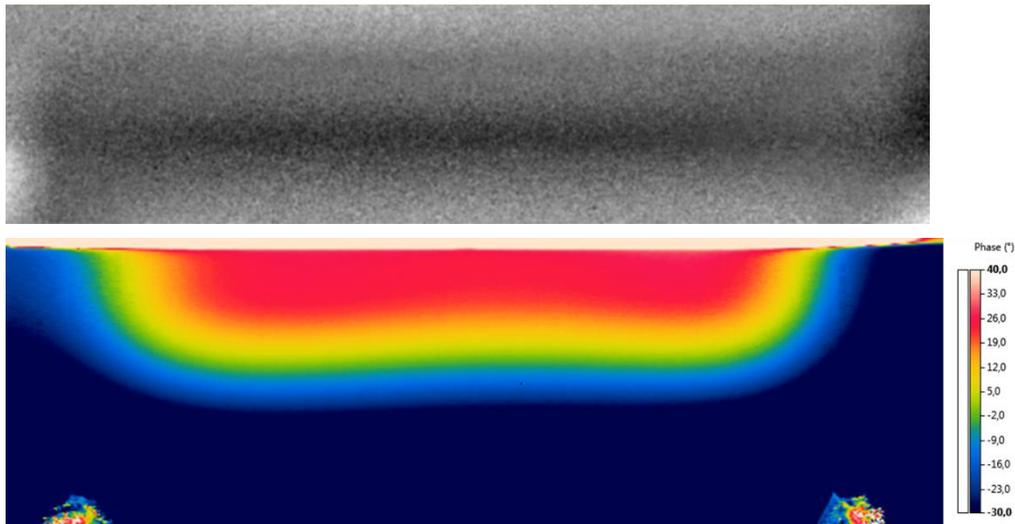


Abb. 4: Shearogramm und Thermogramm eines fehlerfreien Prüfkörpers, Strukturklebung, stahlseitige Anregung

Der Fehlertyp **fehlender Klebstoff** konnte in der Untersuchung sowohl mittels Shearografie als auch mittels Thermografie eindeutig detektiert werden (siehe Abb. 5), wobei bei aluminiumseitiger Anregung eine Erkennung ungleich schwerer fiel. Im Bereich des fehlenden Klebstoffes ist davon auszugehen, dass im Vergleich zu einer intakten Klebnaht lokale Steifigkeitssprünge an den Randbereichen des Defektes auftreten, die sich durch Shearografie leicht erfassen lassen. Zudem ist lokal von einer reduzierten Wärmeleitfähigkeit des primär induktiv erwärmten unteren Substrates in das obere Substrat auszugehen. Thermografisch sind diese eingebrachten Fehler daher ebenfalls einfach detektierbar.

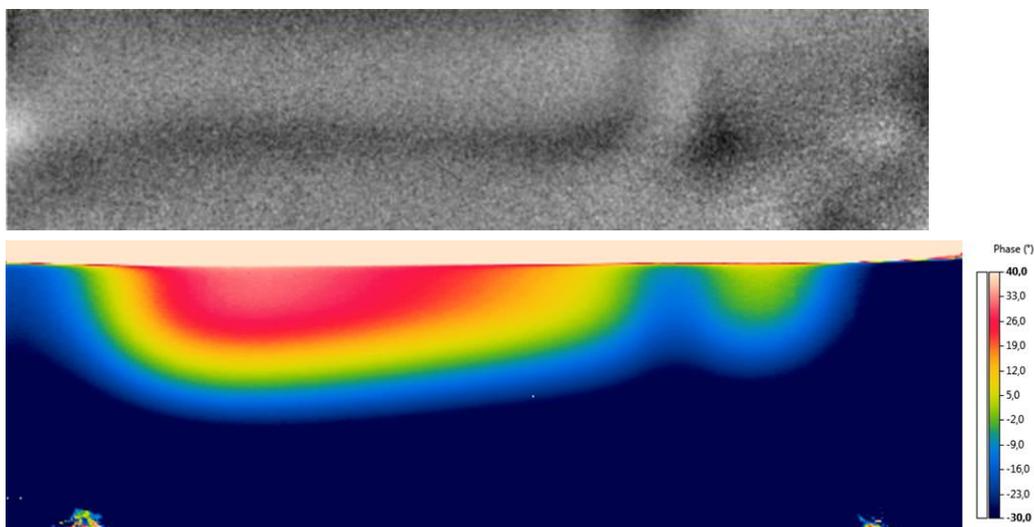


Abb. 5: Shearogramm und Thermogramm eines Prüfkörpers mit fehlendem Klebstoff, Strukturklebung, stahlseitige Anregung

Lufteinschlüsse konnten, analog zu Bereichen mit fehlendem Klebstoff, ebenfalls mit beiden Verfahren von beiden Anregungsseiten eindeutig detektiert werden (siehe Abb. 6). Der Lufteinschluss verringerte sowohl die lokale Steifigkeit in dem Prüfkörper als auch den Wärmeleitung durch den Klebstoff.

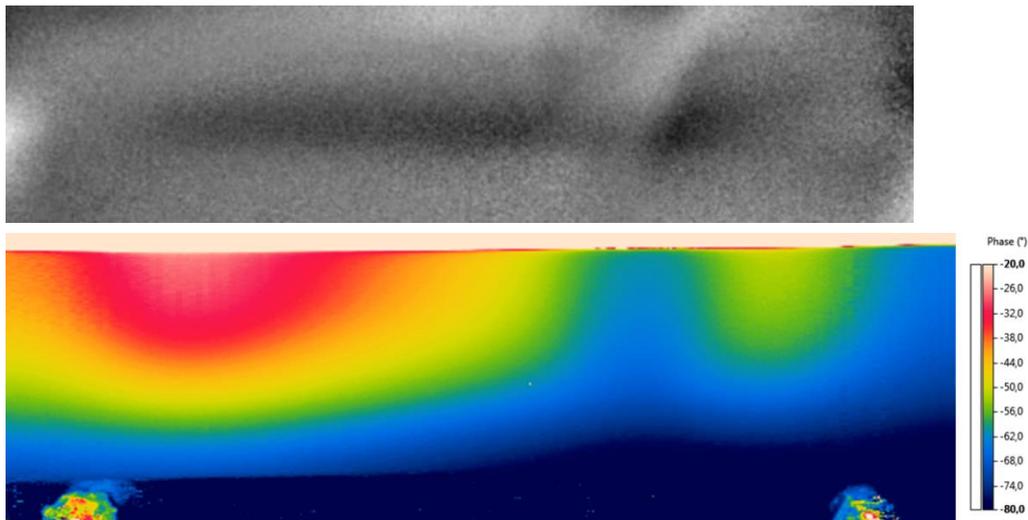


Abb. 6: Shearogramm und Thermogramm eines Prüfkörpers mit Lufteinschluss, Strukturklebung, stahlseitige Anregung

Die **ungleichmäßige Klebstoffdicke** konnte nur mittels Thermografie detektiert werden. Die Anregungsseite hatte dabei keinen signifikanten Einfluss auf die Detektion des Fehlers. Die Änderung der Wärmeleitung entlang der zunehmenden Klebstoffdicke konnte durch Variation des Phasenwinkels leicht sichtbar gemacht werden (siehe Abb. 7 unten). Eine Detektion der ungleichmäßigen Klebstoffdicke war mittels Shearografie mit den gewählten Messparametern von beiden Anregungsseiten nicht möglich (siehe Abb. 7 oben). Eine kontinuierliche Änderung der Steifigkeit entlang des Scherwinkels verhindert eine Detektion des Fehlertyps.

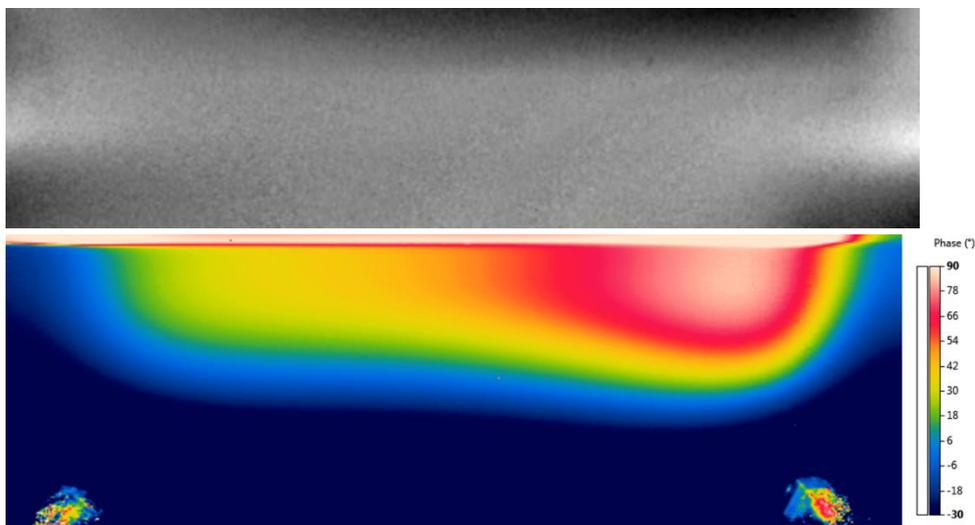


Abb. 7: Shearogramm und Thermogramm eines Prüfkörpers mit ungleichmäßiger Klebstoffdicke, Strukturklebung, stahlseitige Anregung

Der Fehlertyp der **inhomogenen Durchmischung** konnte mittels Shearografie von beiden Anregungsseiten eindeutig detektiert werden. Aufgrund des lokal ungünstigen Verhältnisses von Harz und Härter entstanden mittels Shearografie detektierbare Steifigkeitsänderungen in der Klebnaht (siehe Abb. 8 oben). Mittels Thermografie war dieser Fehlertyp nicht detektierbar. Die Abweichungen der Wärmeleitfähigkeit beider Klebstoffkomponenten bzw. unterschiedlicher Klebstoffzusammensetzungen waren nicht groß genug, um eine detektierbare Änderung im Phasenwinkel zu bewirken (siehe Abb. 8 unten).

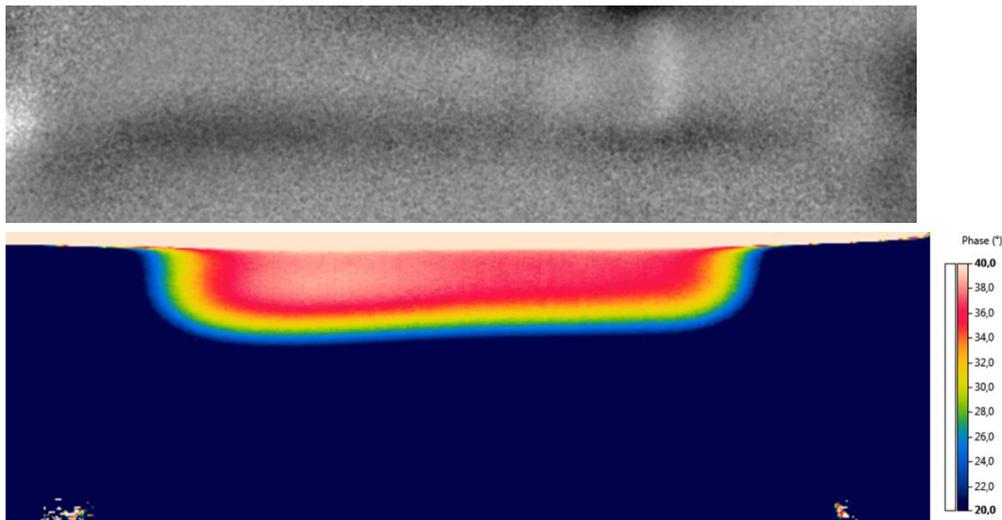


Abb. 8: Shearogramm und Thermogramm eines Prüfkörpers mit inhomogener Durchmischung, Strukturklebung, stahlseitige Anregung

Das Fehlerbild des **falschen Mischungsverhältnisses** konnte mittels Shearografie eindeutig detektiert werden. Die Anregungsseite hatte keinen großen Einfluss auf die Fehlerdetektion. Das Fehlen von Harz oder Härter reduzierte die Steifigkeit signifikant (siehe Abb. 9 oben). Im Thermogramm konnte dieser Fehlertyp nur bei Anregung vom Aluminiumsubstrat mit viel Aufwand detektiert werden. Eine Detektion bei stahlseitiger Anregung konnte nicht erzielt werden. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeitsunterschiede zwischen dem Klebstoff und seinen einzelnen Komponenten konnte dieser Fehler nur bei der Prüfung vom Stahlsubstrat aus detektiert werden (siehe Abb. 9 unten).

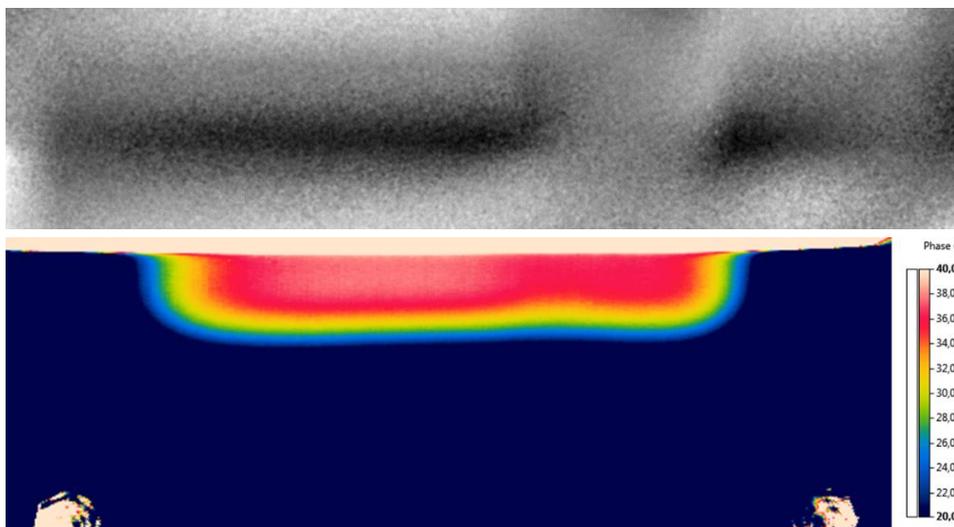


Abb. 9: Shearogramm und Thermogramm eines Prüfkörpers mit falschem Mischungsverhältnis, Strukturklebung, stahlseitige Anregung

Delaminationen konnten mittels Shearografie und Thermografie, unabhängig von der Anregungsseite, gleich gut detektiert werden (siehe Abb. 10). Durch die fehlende Anbindung in Folge der Delamination verringerte sich die Steifigkeit im Bereich der Fehlstelle, sodass erhöhte Deformationen bei induktiver Anregung im Shearogramm sichtbar wurden. Gleichzeitig führt die Ablösung des Klebstoffes vom Substrat zu einer Reduzierung der Wärmeleitung zwischen Klebstoff und Substrat und folglich zu einer inhomogenen Erwärmung der vermessenen Substratoberfläche.

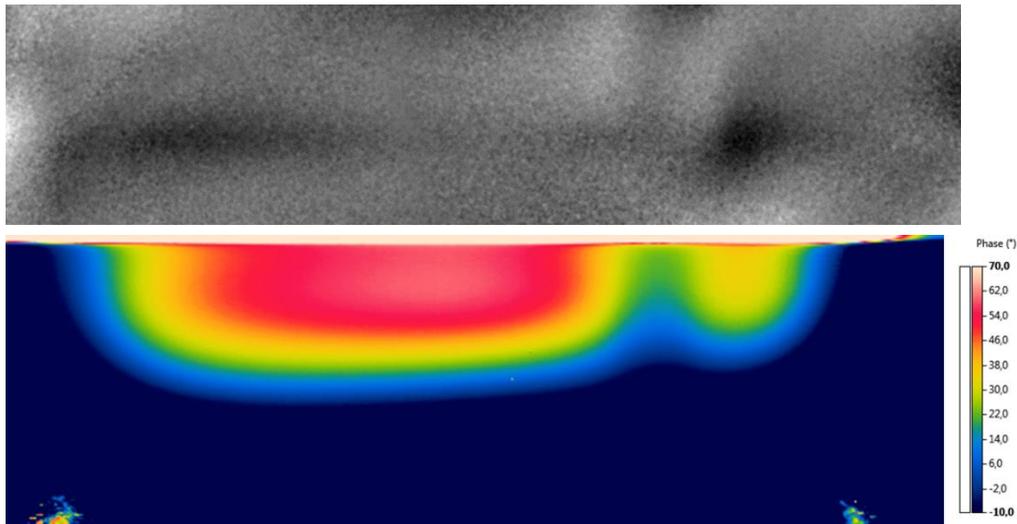


Abb. 10: Shearogramm und Thermogramm eines Prüfkörpers mit Delamination, Strukturklebung, stahlseitige Anregung

Die simulierten „Kissing Bonds“ konnten mittels Shearografie von beiden Anregungsseiten detektiert werden, allerdings nicht ganz so eindeutig wie die übrigen Fehlertypen. Das Shearogramm, welches indirekt Rückschlüsse auf die Steifigkeit zulässt, ist in Abb. 10 (oben) dargestellt. Im Gegensatz zu Delaminationen ohne Kontakt von Klebstoff und Substrat ist bei „Kissing Bonds“ eine ungleichmäßige Erwärmung im Thermogramm nicht erkennbar. Die lässt darauf schließen, dass die Wärmeleitung der Fehlstelle der einer intakten Klebung entspricht (siehe Abb. 10 unten).

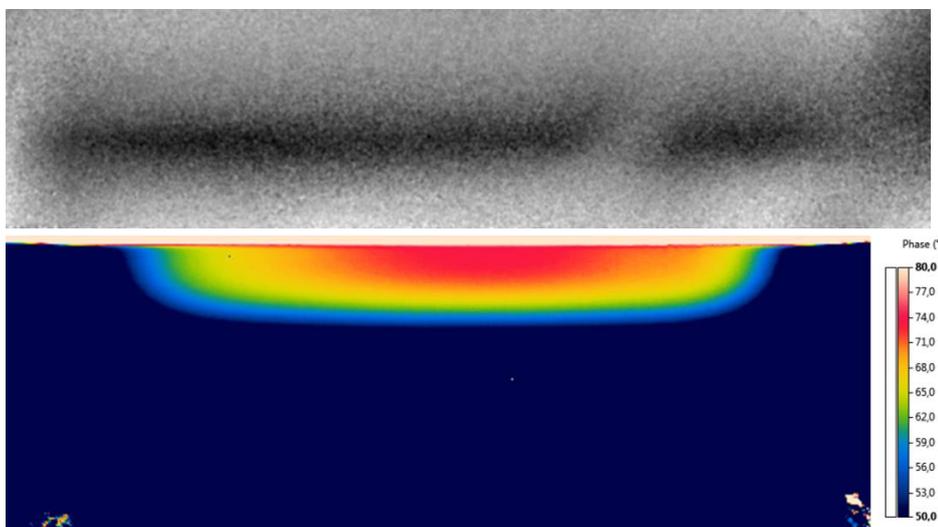


Abb. 11: Shearogramm und Thermogramm eines Prüfkörpers mit „Kissing Bond“, Strukturklebung, stahlseitige Anregung

5.2. Auswertung der elastischen Dickschichtklebungen

Die zerstörungsfreie Prüfung der elastischen Dickschichtklebungen war für beiden Verfahren eine größere Herausforderung. Der Grund dafür lag in den Eigenschaften der elastischen Klebstoffe. Diese Klebstoffe sind deutlich weicher als strukturelle Klebstoffe. [10] Die Detektion von Steifigkeitssprüngen in der Klebnaht mittels Shearografie war deutlich schwieriger, da in fehlerhaften Bereichen keine großen Steifigkeitssprünge auftreten konnten. Zudem werden diese Klebstoffe in Schichtdicken von mehreren Millimetern eingesetzt. Bei den geringen Wärmeleitkoeffizienten dieser Klebstoffe ist es somit auch mittels Thermografie anspruchsvoll, fehlerhafte Bereiche zu detektieren.

Die Detektion der Fehlertypen **fehlender Klebstoff**, **Luftabschluss** sowie **ungleichmäßige Klebstoffdicke** war mit beiden Verfahren von beiden Anregungsseiten möglich. Während die Fehlerdetektion mittels Shearografie dabei anspruchsvoller war, konnten mittels Thermografie die Fehler fehlender Klebstoff (bei Anregung des Aluminiums) und ungleichmäßige Klebstoffdicke eindeutig detektiert werden.

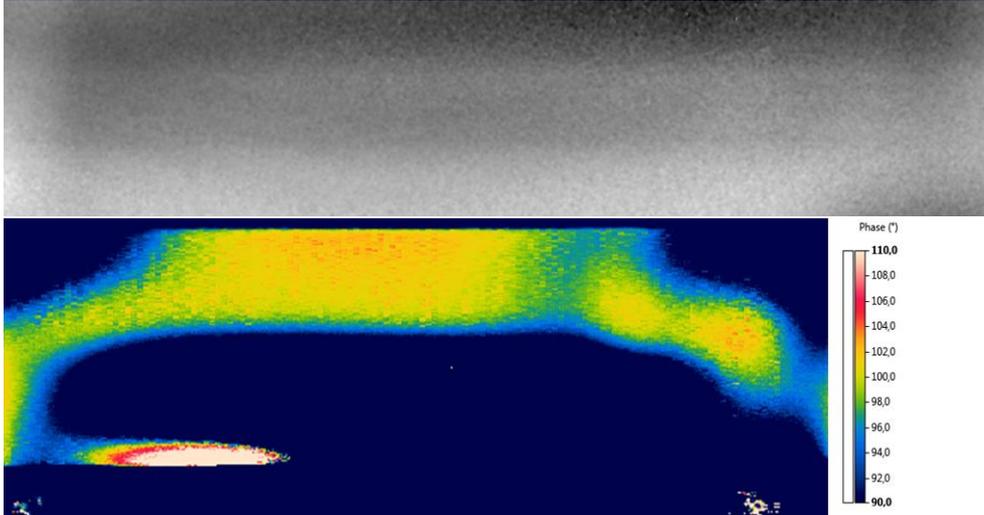


Abb. 12: Shearogramm und Thermogramm eines Prüfkörpers mit Delamination, Dickschichtklebung, aluminiumseitige Anregung

Der Fehlertyp **falsches Mischungsverhältnis** konnte nur mittels Shearografie detektiert werden. Die Anregungsseite hatte dabei keinen Einfluss auf die Fehlerdetektion. **Delaminationen** konnten hingegen nur mittels Thermografie mit aluminiumseitiger Anregung detektiert werden (siehe Abb. 12). Die Detektion des „**Kissing Bonds**“ konnte bei dieser Prüfanordnung nur mittels Shearografie erfolgen (siehe Abb. 13).

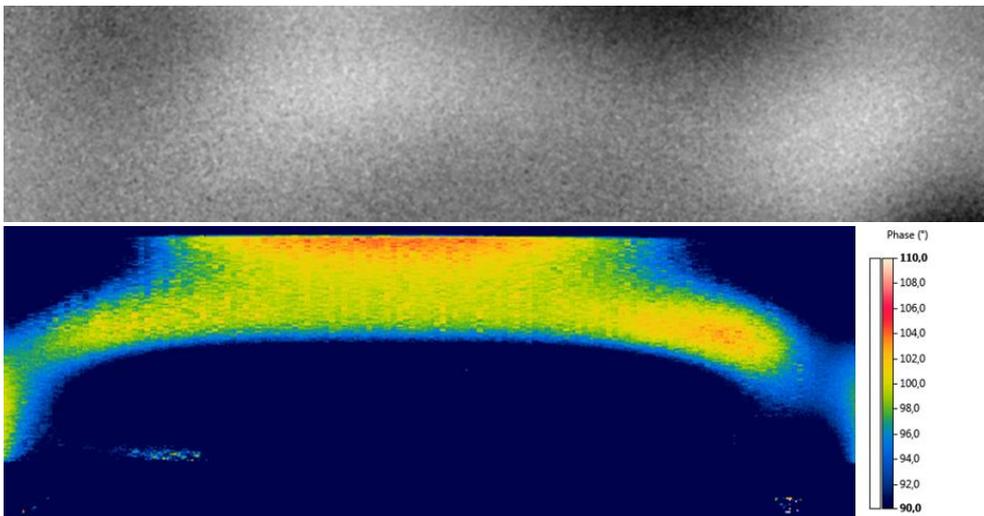


Abb. 13: Shearogramm und Thermogramm eines Prüfkörpers mit „Kissing Bond“, Dickschichtklebung, aluminiumseitige Anregung

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Fehlerdetektion der beiden zerstörungsfreien Prüfverfahren Shearografie und Thermografie vorgestellt und miteinander verglichen. Als thermische Anregung wurde dabei die Induktionsanregung verwendet. Untersucht wurden

Aluminium-Stahl-Prüfkörper, in denen gezielt Fehlstellen wie Lufteinschlüsse, Delaminationen und „Kissing Bonds“ eingebracht worden sind. Betrachtet wurden zwei unterschiedliche Klebstofftypen: hochfeste Strukturklebung sowie elastische Dickschichtklebung. Die Ergebnisse der Fehlerdetektion in Anhängigkeit der Anregungsseite bei Strukturklebungen können Tabelle 1 bzw. bei Dickschichtklebungen Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Fehlerdetektion von induktionsangeregter Shearografie und Thermografie an hochfesten Aluminium-Stahl-Strukturklebungen

Fehlerart	Anregungsseite	Shearografie		Thermografie	
		Aluminium	Stahl	Aluminium	Stahl
fehlender Klebstoff		+	0	+	+
Lufteinschluss		+	+	+	+
ungleichmäßige Klebstoffdicke		---	---	+	+
inhomogene Durchmischung		+	+	---	---
falsches Mischungsverhältnis		+	+	0	---
Delamination		+	+	+	+
Kissing Bond		0	0	---	---

Detektierbarkeit: gut + schlecht 0 nicht realisiert ---

Insgesamt zeigten beide Verfahren bei den strukturellen Klebungen ähnlich gute Ergebnisse. Mittels Thermografie war eine eindeutige Detektion der ungleichmäßigen Klebstoffdicke möglich, während mittels Shearografie ein Nachweis bei den genannten Parametern nicht möglich war. Offen ist, ob ein anderer Scherwinkel hier eine Detektion ermöglichen würde. Mit Shearografie war es allerdings möglich, Fehler wie inhomogene Durchmischung, falsches Mischungsverhältnis sowie „Kissing Bonds“ zu erkennen, die mittels Thermografie nur schwer oder gar nicht detektierbar waren.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Fehlerdetektion von induktionsangeregter Shearografie und Thermografie an elastischen Aluminium-Stahl-Dickschichtklebungen

Fehlerart	Anregungsseite	Shearografie		Thermografie	
		Aluminium	Stahl	Aluminium	Stahl
fehlender Klebstoff		0	0	+	0
Lufteinschluss		0	0	0	0
ungleichmäßige Klebstoffdicke		0	0	+	+
falsches Mischungsverhältnis		0	0	---	---
Delamination		---	---	+	---
Kissing Bond		0	---	---	---

Detektierbarkeit: gut + schlecht 0 nicht realisiert ---

Bei den elastischen Klebungen führte die Thermografie für viele Fehlertypen zu besseren Messergebnissen als die Shearografie, wobei selbst der Fehlertyp Delamination erfasst werden konnte. Fehlertypen, die sich fast ausschließlich auf die Aushärtung des Klebstoffes auswirken, sind auch hier nur durch Shearografie nachweisbar.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, dass beide Verfahren aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Messgrößen in der Lage sind, unterschiedliche Fehler in Klebverbindungen zu detektieren. Während Fehler, die signifikant zu einer Veränderung der

Steifigkeit führen, einfach durch Shearografie nachgewiesen werden können, sind alle Fehlertypen, die eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit bzw. Erwärmung bewirken, thermografisch besser zu erfassen. Daraus ergibt sich, dass sich für einzelne Fehlertypen die jeweiligen Verfahren unterschiedlich eignen.

Durch eine Kombination beider, apparativ jedoch ähnlich aufgebauter Verfahren könnte somit ein Messsystem entwickelt werden, welches die Anforderungen einer industriellen Prozesskontrolle (z. B. kurzen Messdauer) erfüllt und gleichzeitig eine deutlich erhöhte Fehlererkennbarkeit ermöglicht.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben „Einsatz der Optisch, Mechanisch und Induktiv angeregten Shearografie für die ZfP von hochfesten Strukturklebungen und elastischen Dickschichtklebungen“, IGF-Projekt Nr. 18.709 N, der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Förderung sei gedankt. Weiterhin gilt unser Dank dem projektbegleitenden Ausschuss für die konstruktive Unterstützung während der Projektbearbeitung.

Referenzen

- [1] Thiemann, C.; Zäh, M. F.: Zerstörungsfreie Prüfung durch aktive Thermografie im kontinuierlichen Bauteildurchlauf. In: Thermographie-Kolloquium, 2011.
- [2] Roye, W.; Michaloudaki, M.: Methoden zur zerstörungsfreien Qualitätssicherung von Klebverbindungen. In: Adhäsion, 3, 2004, Seite 32–38.
- [3] Zäh, M. F.; Mosandl, T.; Schlickerieder, K.: Stark im Verbund. Zerstörungsfreie Prüfverfahren in der Klebtechnik. In: Qualität und Zuverlässigkeit, Jahrgang 49, Heft1, 2004, Seite 58–59.
- [4] Zäh, M. F.; Kostas, D.; Lammel, C.; Mosandl, T.; Michaloudaki, M.; Dirscherl, F.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren – Erzielbare Resultate und industrielle Umsetzbarkeit. In: Adhäsion, 8, 2003, Seite 18–23.
- [5] Wilhelm, T.; Hinnen, M.; Schmidt, W.; Montnacher, J.; Verl, A.: Zerstörungsfreie Prüfung von Klebverbindungen. Produktionstaugliche Methode zur Quantifizierung der Adhäsionsseigenschaften. In: Adhäsion, 6, 2010, Seite 14–21.
- [6] Zäh, M. F.; Schlickerieder, K.; Mosandl, T.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren und ihre Eignung für die Klebtechnik. In: Adhäsion, 6, 2003, Seite 26–30.
- [7] Krell, T.; Wetzel, M.; Holtmannspötter, J.: Zerstörungsfrei, schnell und bildgebend. Thermografische Untersuchungen in der Klebtechnik. In: Adhäsion, 11, 2011, Seite 14–18.
- [8] Grimm, J.; Zahn, A.: High strength for multi-material bonding. Ultra-Highmodulus and fast-curing 1C PUR adhesives. In: adhesion ADHESIVES & SEALANTS, 4, 2013, Seite 33–36.
- [9] Benkowsky, G.: Induktionserwärmung. Härten, Glühen, Schmelzen, Löten, Schweißen. 5., stark bearbeitete Auflage. VEB Verlag Technik, Berlin, 1990.
- [10] Silva, L. F. M.; Öchsner, A.; Adams, R. D.: Handbook of adhesion technology. Springer, Berlin, London, 2011.