

Praktische Aspekte der Automatisierung thermografischer Schweißnahtprüfung

Guido MAHLER¹, Paul-Michael MICKEL², Sven BEIER²

¹ InfraTec GmbH, 01217 Dresden, g.mahler@infratec.de

² Volkswagen Sachsen GmbH, 08058 Zwickau, paul-michael.mickel@volkswagen.de,
sven.beier@volkswagen.de

Kurzfassung. Der praktische Einsatz der Wärmeflussthermografie zur Prüfung von Schweißverbindungen ist stets mit großen Erwartungen an dieses Verfahren verbunden. Ausgehend von seinen typischen Merkmalen wie Berührungslosigkeit, kurzer Prüfzeit, Vermeidung von Strahlungsgefährdung sowie guter Automatisierbarkeit soll das Verfahren gleich mehrere Limitierungen der in der Automobilfertigung üblichen Prüfverfahren überwinden und dabei gleichzeitig eine hohe Prüfsicherheit bei größtmöglicher Flexibilität gewährleisten.

Dass eine Erfüllung all dieser Ansprüche auf gleichermaßen hohem Niveau eine Herausforderung ist, die insbesondere beim Einsatz für die Serienprüfung im Karosseriebau erhebliche Entwicklungsressourcen und Ausdauer erfordert, ist eine Erkenntnis aus mehrjährigen praktischen Erfahrungen der Autoren mit der Umsetzung des Verfahrensprinzips an einer automatisierten robotergestützten Prüfanlage.

Ausgehend von den speziell bei Laserschweißnähten zu prüfenden Kriterien werden die prinzipiellen Möglichkeiten von visueller und thermografischer Prüfung hierfür beleuchtet sowie deren verfahrensbedingte Vorzüge und Nachteile gegenübergestellt.

Für das beim Anwender Volkswagen Sachsen GmbH installierte Thermografie-Prüfsystem werden dessen Aufbau und die schrittweise Funktionserweiterung von den Anfängen bis zum heutigen automatisierten Prüfbetrieb erläutert und dabei besonders auf jene Aspekte eingegangen, die sich im Zuge der im Automobilbau vollzogenen Entwicklung der vergangenen Jahre ergeben haben.

Für das Erreichen der Prüffizienz erforderliche Komponenten der Blitzthermografie werden ebenso vorgestellt wie ein einfach zu parametrierendes Verfahren zur Ermittlung des angebotenen Bereichs aus der Thermobildfolge.

Diskutiert werden abschließend die Möglichkeiten für eine weitere Erhöhung der Leistungsfähigkeit, die sich aus den zu erwartenden Verbesserungen gerätetechnischer Parameter von Kamera- und Anregungstechnik ergeben.

1. Einführung

Begünstigt durch immer leistungsfähigere und kostengünstigere Gerätetechnik hat sich die Infrarot-Thermografie (TT) in den zurückliegenden Jahren von einer nur wenigen Anwendern vorbehaltenen Technologie zu einer mittlerweile in breitem Maße zugänglichen und ernst zu nehmenden Alternative gegenüber anderen, bereits langjähriger etablierten zerstörungsfreien Prüfverfahren entwickelt. Mit zunehmender Breite und Tiefe der Erfahrungen der Anwender kristallisieren sich über deren Vorzüge typische Anwendungsgebiete heraus, in denen die Vorteile gegenüber klassischen Verfahren



überwiegen. Andererseits hat sich aufgrund von Limitierungen physikalischer bzw. technischer Art herausgestellt, dass sie die anfänglich in sie gesetzten, zuweilen zu hoch angesetzten Erwartungen nicht in allen Fällen erfüllen kann, was ihre Verbreitung auf Anwendungsfälle konzentriert, in denen die Vorteile der Thermografie besonders zum Tragen kommen. Ein solcher kann die Prüfung von Schweißverbindungen an Blechen mittels aktiver Thermografie sein, insofern bestimmte Bedingungen vorliegen. Vorteilhaft sind die im Falle des häufig vorkommenden Überlappstoßes bestehenden übersichtlichen Bedingungen für den der Prüfung zugrunde liegenden Wärmefluss aufgrund der materialbedingten thermischen Diffusionslängen und zu berücksichtigenden Blechstärken. Allerdings hat man es im Gegensatz zu Kunststoffen häufig mit Oberflächen zu tun, die einen geringen, teilweise auch deutlich variierenden Emissionsgrad aufweisen, welcher einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor bei thermografischen Untersuchungen darstellen oder im Extremfall diese unmöglich machen kann.

Eine Massenanwendung des Schweißens von Stahlblech, verbunden mit dem Bedarf einer zuverlässigen Überwachung der Fügequalität zur Sicherung der Festigkeit der Schweißverbindungen, besteht im Automobilbau, wo insbesondere das Widerstandspunkt- sowie das Laserstrahl-Schweißen zum Einsatz kommen. Beide Fügeverfahren bewirken unterschiedliche Herausbildungen der Emissionsgrade der Fügepartner in den Fugestellen und derer unmittelbaren Umgebung. Beim Punktschweißen unterliegt dieser einer breiten Streuung. Die Schmelzendynamik des Laserstrahlschweißens verursacht stärkere Erhöhungen des Emissionsgrades mit geringeren Streuungen. Abhängigkeiten bestehen von den Stahlsorten und Oberflächenbeschichtungen der verschweißten Bleche.

Im Jahr 2007 wurde im Fahrzeugwerk Zwickau der Volkswagen Sachsen GmbH die Thermografie zur Serienprüfung von Laserschweißnähten eingeführt. Nachfolgende Darstellungen beziehen sich auf das hierfür durch die InfraTec GmbH Dresden gelieferte und seitdem in mehreren Punkten aktualisierte Prüfsystem.

2. Prüfgegenstand und Aufgabenstellung

Die ursprüngliche Aufgabenstellung bestand in der berührungslosen und zerstörungsfreien Prüfung von Schweißnähten an Baugruppen, Anbauteilen und Karosserien auf einer robotergestützten Prüfanlage. Diese sollte Stichprobenprüfungen mit automatisierter Prüffolge sowie visueller Bewertung des thermografischen Befundes der im betreffenden Werk gefertigten Fahrzeugkarosserien bzw. Komponenten der Typen Golf, Passat sowie Phaeton und Bentley erlauben.

Neben einer Vielzahl von Widerstandsschweißpunkten enthält beispielsweise jede Golf-Karosserie insgesamt Lasernähte in einer Gesamtlänge von 7 bis 9 Metern, die auf dieser Prüfanlage in 150 bis 250 Einzelpositionen zu prüfen sind. Bei einer typischen Taktzeit von 5 Sekunden je Prüfposition ergeben sich damit Gesamtzeiten für den thermografischen Prüfablauf im Bereich von ca. 10 bis 20 Minuten.

Die zu prüfenden Schweißverbindungen sind Lasernähte im Überlappstoß (I-Naht). Ober- und Unterblech werden während des Schweißvorgangs in einer Spannvorrichtung fixiert. Die von der Schweißnaht einzuhaltenden Merkmale sind in einer Prüfvorschrift zusammengestellt. Diese umfassen sowohl äußere als auch innere geometrische Kriterien, von denen jedoch nur erstere auf dem Weg der (zerstörungsfreien) Sichtprüfung ermittelt werden können. Die Bestimmung der inneren Merkmale erfordert metallografische Schliifuntersuchungen, die ebenso wie die Ermittlung der Festigkeitsmerkmale zur Zerstörung der Bauteile führt.

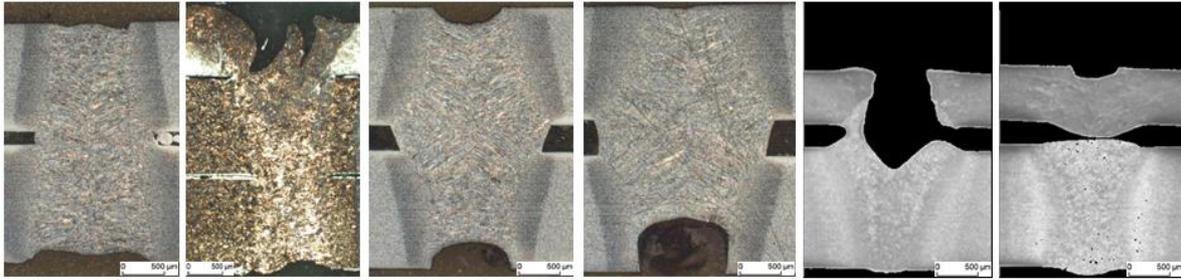


Abbildung 1: Typische Lasernahtgeometrie-Abweichungen im metallografischen Schliff (a ... i.O., b ... Spritzer / Poren / Löcher / Krater, c ... geringe Nahtunterwölbung / Wurzelrückfall, d ... starke Nahtunterwölbung / Wurzelrückfall, e ... geschnitten, f ... nicht geschweißt, v.l.n.r.)

Während sich eine Reihe der in Abbildung 1 beispielhaft dargestellten Abweichungen der Lasernaht-Geometrie mittels Sichtprüfung erkennen lässt, ist der besonders kritische Fall f einer nicht erfolgten stoffschlüssigen Verbindung zwischen Ober- und Unterblech auf diesem Weg nicht möglich. Hier setzt die Aufgabenstellung für das Verfahren der Wärmefluss-Thermografie an, welches grundsätzlich zur Detektion dieses Fehlertyps geeignet ist und das sich zur Prüfung von 2-Blech-Verbindungen in der Variante einer transmissiven Anordnung mit Blitz-Anregung anbietet. [1]

Die fortschreitende Karosserieentwicklung führt allerdings zu einem zunehmenden Aufkommen an Nahtpositionen, welche die für eine solche Prüfanordnung benötigte beidseitige Zugänglichkeit nicht gewährleisten. Auch ist die Prüfung von Verbindungen in transmissiver Anordnung ausgeschlossen, wenn eine Seite der Fügestelle durch die weitere Verschachtelung mit einem anderen Bauteil verdeckt ist.

Weiterhin ist der Trend zu einer größeren Vielfalt der eingesetzten Materialien und Blechstärken zu berücksichtigen, die zu stärkeren Unterschieden bei den resultierenden Signalintensitäten ebenso wie den zeitlichen Temperaturverläufen führt.

Unabhängig von Prüfanordnung und -bedingungen ist darüber hinaus die Zielstellung gegeben, die subjektiv beeinflusste visuelle Bewertung des thermografischen Prüfergebnisses durch eine automatisierte Auswertung auf Basis von Bildverarbeitungs-Algorithmen zu ersetzen. Diese soll möglichst viele Merkmale des durch Sichtprüfung erstellten äußeren Befunds einschließen.

3. Prüfanordnung, Hardware-Komponenten

Ausgehend von den ursprünglichen Anforderungen ist das Prüfsystem von Beginn an in einer Anordnung von zwei parallel verfahrbaren 6-Achs-Robotern realisiert worden, zwischen welchen das Prüfobjekt auf einem Prüfwagen positioniert wird. Einer der beiden Roboter richtet die Kamera, der andere die Blitzleuchte auf die jeweils zu prüfende Schweißnaht aus.

Diese feste Zuordnung erfordert einerseits eine 180°-Drehung des Prüflings in der Mitte der Prüffolge bei der Prüfung von Rohkarosserien, bietet andererseits aber die größten Freiheitsgrade bei der Gestaltung der optischen Verhältnisse auf der Kamera- und Anregungsseite. Prinzipiell können Arbeitsabstand bzw. Objektiv-Brennweite frei gewählt werden sowie die Blitzleuchte mit einem hinsichtlich Lichtausbeute, Baugröße und Objektdistanz optimal auf die Anwendung angepassten Reflektor ausgestattet werden.

Im Zuge von Vorversuchen mit Probeschweißungen der zu prüfenden Blechkombinationen wurden die benötigten Eckparameter von Kamera und Blitz-Anregung ermittelt. Während der zeitliche Prüfablauf und damit die Anforderungen an die benötigte IR-Bildfrequenz durch die Blechstärken sowie die thermischen Diffusivitäten der beteiligten Materialien eindeutig bestimmt sind, stehen die intensitätsbezogenen Parameter

in enger Beziehung zueinander und können gegeneinander abgewogen werden. Dies betrifft z.B. eine bessere Temporauflösung der Kamera gegen eine geringere erforderliche Blitzintensität. Die in Tabelle 1 dargestellten Parameter haben sich auch im praktischen Einsatz als geeignete Kombination für einen zuverlässigen Betrieb des Prüfsystems unter den gegebenen Einsatzbedingungen (3-Schicht-Betrieb) erwiesen.

| Parameter | benötigt | realisiert |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------|
| IR-Bildfrequenz: | ≥ 50 Hz | 100 Hz |
| Temporauflösung (NETD): | ≤ 30 mK | 25 mK |
| Bildformat: | $\geq 320 \times 240$ | 320×256 |
| Blitzintensität: | ≥ 10 J/cm ² | 15 J/cm ² |
| Blitzdauer: | ≤ 50 ms | 5 ms |

Tabelle 1: Kamera- und Anregungsquelle, Parameter der ursprünglichen Realisierung (transmissiv)

Während in dieser ersten Realisierung die Anforderungen an die Blitzeinheit ausschließlich auf eine transmissive Anordnung ausgerichtet waren, war diese Einschränkung im Zuge der Vorbereitung auf die Prüfung neuer Fahrzeugtypen zu überwinden. Damit auch teilweise verschweißte Mehrblechverbindungen geprüft werden konnten, wurde das Systemkonzept zu einem modular aufgebauten Prüfsystem mit 2 gleichberechtigten, identisch aufgebauten Blitz-/Kameraköpfen erweitert, welche jedoch nicht notwendigerweise voll bestückt sein müssen.

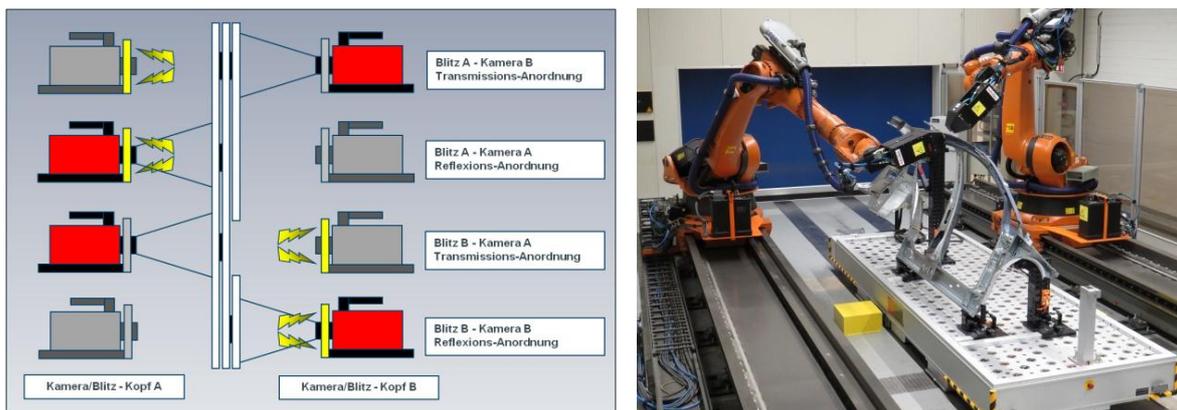


Abbildung 2: Dual-Thermografieprüfkopf, Prinzipschema (links) und praktische Ausführung (rechts)

Durch die neuen Betriebsbedingungen (reflexive zusätzlich zur transmissiven Anordnung, größere Blechstärken- und Materialvielfalt, automatische Auswertung auf Bildverarbeitungs-Basis) haben sich die Anforderungen an Kamera- und Blitztechnik erhöht. Insbesondere wird eine deutlich höhere IR-Bildfrequenz benötigt.

| Parameter | benötigt | realisiert |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------|
| IR-Bildfrequenz: | ≥ 250 Hz | 300 Hz |
| Temporauflösung (NETD): | ≤ 20 mK | 15 mK |
| Bildformat: | $\geq 320 \times 240$ | 320×256 |
| Blitzintensität: | ≥ 15 J/cm ² | 20 J/cm ² |
| Blitzdauer: | ≤ 20 ms | 8 ms |

Tabelle 2: Kamera- und Anregungsquelle, Parameter der erweiterten Realisierung (transmissiv und reflexiv)

Konstruktionsseitig war damit die Notwendigkeit verbunden, Blitzleuchte und Kamera unabhängig voneinander, jedoch zueinander behinderungs- und optisch abschattungsfrei zu platzieren, was auf Basis einer das Kamera-Objektiv umschließenden Ringblitzröhre realisiert wurde. Dabei erfordert die Prüfung in reflexiver Anordnung eine besonders gute Abschirmung der parasitären Emission der Blitzröhre, welche Aufgrund der schnellen Blitzfolge (≤ 5 Sekunden) starker Erwärmung unterliegt und damit die Prüfergebnisse unzulässig beeinflussen würde. Eine Kombination aus doppelt ausgeführten IR-Filterscheiben und einer intensiven Druckluftkühlung der Blitzröhre hat sich nicht nur als äußerst effizient aus thermografischer Sicht, sondern darüber hinaus auch so verschleißsenkend auf die Blitzröhre erwiesen, dass Lebensdauern von mehreren 100.000 Blitzauslösungen erreicht wurden. [2]



Abbildung 3: Dual-Thermografieprüfkopf, auf Roboter montiert (links) und geöffnet (rechts)

Bei der eingesetzten Thermografiekamera wurde auf eine Kamera mit gekühltem MWIR-Detektor zurückgegriffen, die Bestandteil einer umfangreichen Typenreihe mit verschiedenen Detektorformaten, Objektiven und Bildfrequenzen ist und damit einen modularen Aufbau und den bedarfsweisen Austausch im Falle von erweiterten Anforderungen ermöglicht. [3] Durch die vorhandenen Möglichkeiten zur Bildtriggerung wird die insbesondere für eine automatische Auswertung benötigte exakte Synchronisation von Blitzauslösung und Bildaufnahme sichergestellt. Die Echtzeit-Übertragung der Bildfolgen über GigE-Interface ermöglicht einen sicheren Betrieb ohne zusätzliche Medienkonverter über die benötigte Distanz von ca. 30 Metern bis zur Auswerteeinheit im benachbarten Arbeitsraum mit dem Bedienplatz.

4. Software-Algorithmen

Gegenstand der thermografischen Schweißverbindungsprüfung sind die Ermittlung und Bewertung von Lage und Geometrie der Anbindungsbereiche zwischen den Blechlagen. Basierend auf der voraussetzenden Annahme, dass ein Wärmefluss zwischen diesen im Wesentlichen nur über jene Querschnitte erfolgt, in welchen eine stoffschlüssige Verbindung zustande gekommen ist, kann deren Größe wiederum als zerstörungsfrei bestimmbares Merkmal für die Festigkeit der Verbindung herangezogen werden.

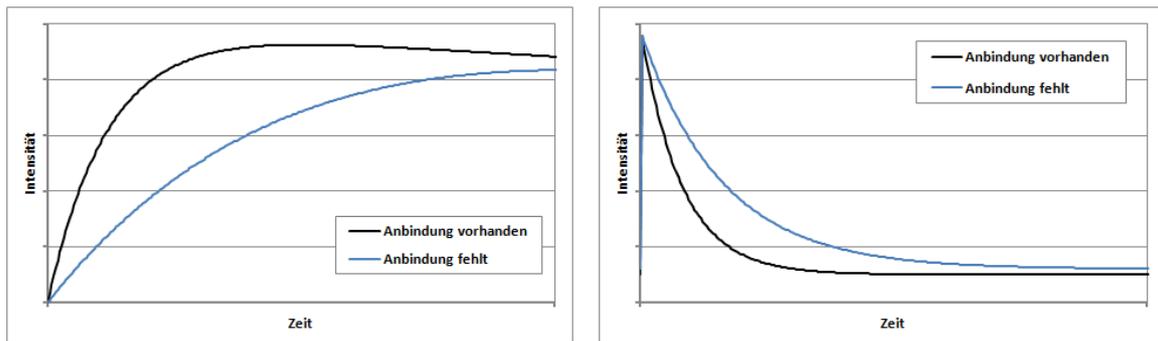


Abbildung 4: Prinzipieller Temperatur-Zeit-Verlauf bei transmissiver (links) und reflexiver Anordnung (rechts)

Der Kern dieser Aufgabenstellung kann aufgrund der erreichten zeitlichen und thermischen Auflösungskennwerte der modernen Thermografiertechnik bereits seit Jahren als gut lösbar eingestuft werden. Dies gilt zumindest für Stahlblech. In der Praxis teilweise schwer zu beherrschende Herausforderungen sind hingegen die zu berücksichtigenden strahlungsphysikalischen Randbedingungen. So ist das vielfältige Erscheinungsbild der Oberfläche von blank bis geschwärzt ein typisches Merkmal von Punkt-Schweißverbindungen. Deren sowohl örtlich als auch exemplarweise stark variierende Emissionsfaktoren erfordern oftmals zwingend ihre Eliminierung (z.B. durch Phasenauswertung) oder Berücksichtigung (z.B. durch pixelweise Korrektur) im Zuge der Thermobild-Aufbereitung.

Bei Lasernähten stellt sich dies prinzipbedingt einfacher dar, da die stattgefundenene Einwirkung des Lasers mit der dadurch bewirkten Oberflächenveränderung eine Voraussetzung für das Entstehen der Schweißverbindung ist. Die thermografische Untersuchung kann sich somit ausschließlich auf diese Oberflächenbereiche mit hohem und nur weniger variierenden Emissionsgrad beschränken.

Für die pixelweise wärme-flussthermografische Auswertung der Infrarot-Bildsequenzen beider Anordnungsvarianten (transmissiv und reflexiv) stehen mehrere algorithmische Ansätze im Zeit- bzw. Frequenzbereich zur Verfügung, z.B.:

- a) Differenzauswertung
- b) Quotientenauswertung
- c) Zeitauswertung
- d) Phasenauswertung

Während sich die einfachste Variante der Differenzauswertung als robustes und mit geringem Aufwand parametrierbares Verfahren erwiesen hat, sind dessen Einsatzmöglichkeiten aufgrund seiner hohen Sensitivität gegenüber Unterschieden von Emissionsgrad bzw. Umgebungsstrahlung deutlich eingeschränkt. Als sinnvoll hat sich die Differenzauswertung bei der Prüfung von Lasernähten in transmissiver Anordnung erwiesen.

In reflexiver Anordnung ist das zur Auswertung zur Verfügung stehende Zeitintervall deutlich stärker eingeschränkt als bei transmissiver Anordnung. Während sein Maximum von den Blechstärken der Fügepartner begrenzt wird, bestimmen Abbrenndauer und IR-Befilterung des Blitzkopfes sowie die verfügbare Dynamik der Thermografiekamera den frühestmöglichen Zeitpunkt, in dessen Nähe zugleich eine hohe Signalintensität und damit ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis als im weiteren Verlauf auftritt.

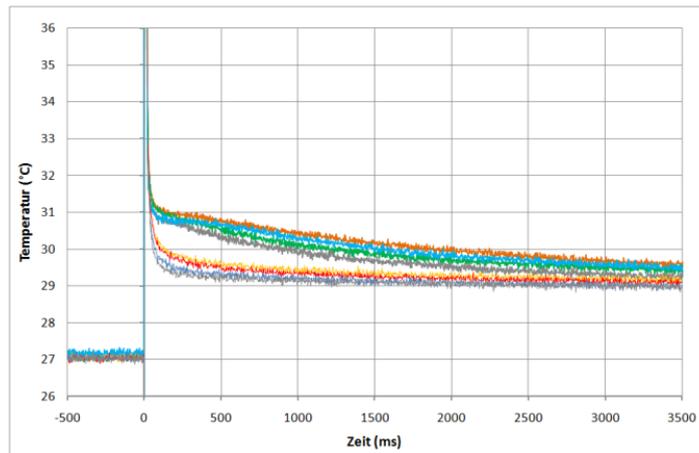


Abbildung 5: Temperatur-Zeit-Verläufe bei reflexiver Anordnung (Prüfling geschwärzt)

Für eine pixelweise Analyse im Zeitbereich bieten sich insbesondere die Auswertung der Zeitdauer bis zum Erreichen einer bestimmten relativen Intensität nach Abklingen des Blitzes oder die zu einem festen Zeitpunkt nach dem Blitz noch vorliegende relative Intensität (Quotientenverfahren) an.

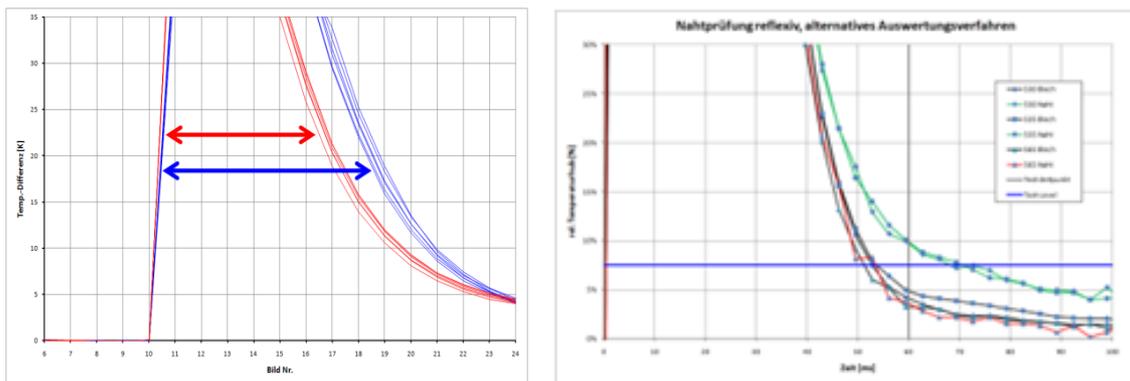


Abbildung 6: Auswertungsvarianten für reflexive Anordnung (links Zeitauswertung, rechts Quotientenverfahren)

Alternativ dazu ist auch eine Auswertung im Frequenzbereich (Phasenbild) möglich, deren Parametrierung allerdings mit der auszuwertenden Frequenz weitere Freiheitsgrade aufweist und daher zusätzlichen Aufwand bei Einrichtung und Feinjustage des Systems erfordert.

5. Thermografie im QS-System

Bei manuellem Prüfbetrieb endet die Aufgabe der Software-Algorithmen mit der Bereitstellung des Ergebnisbildes der thermografischen Analyse. Die subjektiv-visuelle Bewertung des Befundes erfolgt durch den Prüfer anhand der Vorgaben der Prüfanweisung. Im automatischen Prüfbetrieb sind stattdessen entsprechende Bildverarbeitungs-Algorithmen für die i.O./n.i.O.-Einstufungen der geprüften Nahtpositionen notwendig.

Für die visuelle Bewertung werden dem Prüfer die Thermobilder aus der Prüfsequenz zu drei verschiedenen Zeitpunkten, jeweils als Differenzbild bezogen auf den Zustand vor der Blitzauslösung, angezeigt. Diese berücksichtigen den aus Temperaturleitvermögen und Blechdicke resultierenden Zeitraum, innerhalb dessen das Differenzbild ein intensitätsgetreues Abbild des Temperaturanstiegs darstellt. Das ist vor Erreichen jenes Zeitpunktes der Fall, ab welchem die Naht im Thermobild in ihrer äußeren

Geometrie erscheint. Zurückzuführen ist dies auf die deutliche Emissionsgrad-Erhöhung der durch Lasereinwirkung geschwärzten Bereiche gegenüber der unbeeinflussten Umgebung. Zum Vergleich werden i.O.-Referenzbilder dieser Nahtposition in gleicher Intensitäts-Skalierung dargestellt. Anhand eines visuellen, durch geometrische Vermessungsmöglichkeiten (Nahtlänge) unterstützten Mustervergleichs erfolgt die Einstufung des Befunds durch den Prüfer.

Für eine automatisierte Bewertung mit resultierender i.O./n.i.O.-Einstufung erfolgt zunächst eine erweiterte numerische Auswertung der Thermobilder nach einer der in Abschnitt 4 angeführten Varianten mit dem Ergebnis einer binären pixelweisen Klassifikation, ob Zugehörigkeit zum angebundenen Bereich erkannt wurde oder nicht.



Abbildung 8: Differenz-Thermobild (links), Pixelklassifikation roh (mitte) bzw. konturgeglättet (rechts)

Über das geometrische Abbildungsverhältnis der Thermografiekamera liegen damit numerisch auswertbare Informationen zur thermografisch ermittelten Nahtgeometrie (Nahtlänge, -breite, -fläche) vor. Weiterhin kann das Vorhandensein zusätzlicher Fehlermerkmale wie Einschnürungen, Unterbrechungen bzw. Poren erkannt und in das Prüfergebnis einbezogen werden. Für die Bewertung der Lasernaht hat sich die Vermessung der vorhandenen fehlerfreien Nahtlänge (unter Einhaltung der zu erreichenden Mindest-Nahtbreite) bewährt. Diese wird mit der Längenvorgabe aus der Zeichnung bzw. dem Prüfplan verglichen. Zusätzlich zur binären i.O./n.i.O.-Bewertungseinstufung ist damit eine quantitative Qualitätskenngröße gewonnen. Somit sind Trends auswertbar und es können bereits vor einer möglichen Grenzwert-Unterschreitung Maßnahmen ergriffen werden.

Diese Rückkopplung ist ein ganz wesentlicher Bestandteil des Qualitätsregelkreises, in welchen die thermografische Schweißnahtprüfung eingebunden ist. Durch die bildlichen Darstellungen aus der Thermografieprüfung, die bei turnusmäßigen gemeinsamen Auswertungen zwischen Prüf- und Fertigungsabteilung vorgelegt und gemeinsam erörtert werden, wird die Identifizierung von technologischen Problemen beim Schweißprozess unterstützt. Damit kann die Thermografie einen wesentlichen Beitrag zur Qualitätssicherung des Schweißprozesses leisten, auch wenn Sie nicht dazu geeignet ist, die Rolle einer alleinigen Alternative zu den anderen relevanten Prüfverfahren zu übernehmen.

Aus den Spezifika der unterschiedlichen Verfahren (Sichtprüfung, Thermografie, Meißelprüfung und metallografische Schliiffuntersuchung) ist ersichtlich, dass es mit keinem dieser Einzelverfahren möglich ist, alle bei Laserschweißnähten vorkommenden Fehlermerkmale zu erkennen. Insofern liegt das größte Zukunftspotenzial in einer Verknüpfung von Thermografie und automatisierter sensorischer „Sichtprüfung“. Diese Automatisierung und verknüpfte Auswertung ist als nächste Aufgabenstellung anzusehen.

6. Zusammenfassung

Die thermografische Prüfung von Laserschweißnähten mit Blitz-Anregung ist in der Karosseriefertigung der Volkswagen Sachsen GmbH ein fester Bestandteil der Qualitätsprüfung geworden. In mehrjährigem praktischem Betrieb bewährt, wurde sie ständig konsequent weiterentwickelt und damit an die aus neuen Materialien und konstruktiven Ausführungen resultierenden Anforderungen angepasst.

Da sich die Prüfmerkmale aus dem äußeren Sicht- und „inneren“ thermografischen Befund zusammensetzen und keines der beiden Prüfverfahren dies allein übernehmen kann, wurde auf eine Kombination aus diesen beiden gesetzt, was sich als sinnvoll und effizient erwiesen hat. Zusammen mit der parallel an einer Stichprobe des täglichen Fertigungsvolumens durchgeführten Sichtprüfung liefert die Thermografie ergänzende, numerisch auswertbare Informationen und stellt damit eine wichtige Datenbasis für die Regelprozesse der Qualitätssicherung dar.

Die in dem modular aufgebauten Prüfsystem eingesetzten gerätetechnischen Komponenten bilden eine zuverlässige und leistungsfähige Basis für den aktuell realisierten Leistungsumfang. Möglich ist der weitere Ausbau zu einem 2-Kamera-System, womit sich beispielsweise das Drehen der Prüflinge vermeiden ließe.

Eine Automatisierung des Bewertungsprozesses hat sich als realisierbar erwiesen, stellt aber erhöhte Anforderungen an die Präzision der Prüfteilaufnahmen und erfordert eine gut abgestimmte Einstellung der Prüfschärfe. Eine Erleichterung hierbei ergibt sich durch die mögliche effiziente Ausnutzung der jeweiligen Vorteile von Thermografie- und Sichtprüfung, wodurch Fehlerkennungen bei alleiniger Verwendung eines einzelnen Verfahrens vermieden werden können. Ein nächster sinnvoller Schritt zur Automatisierung der Prüfabläufe wäre die Ergänzung durch eine automatisierte Sichtprüfung.

Referenzen

- [1] J. Zettner, B. Spellenberg, Th. Hierl, M. Haller, Th. Lenzi, „Wärmefluss-Prüfung zur Qualitätssicherung von Schweißverbindungen in der Automobilindustrie“, DGZfP Thermografie-Kolloquium, Stuttgart, 2003
- [2] G. Mahler, „Thermografische Lasernahtprüfung von Mehrblech-Verbindungen im Automobil-Karosseriebau“, DGZfP Jahrestagung, Dresden, 2013
- [3] Produkt-Information „Thermografiekamera ImageIR[®]“, www.infratec.de