

Thermografische Lasernahtprüfung von Mehrblech-Verbindungen im Automobil-Karosseriebau

Guido MAHLER*

* InfraTec GmbH, 01217 Dresden, G.Mahler@InfraTec.de

Kurzfassung. Mit fortschreitender Entwicklung leistungsfähiger Infrarot-Gerätetechnik konnte die zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen als praktisches Anwendungsgebiet für die Wärmefluss-Thermografie erschlossen werden und hat erfolgreich in den Automobil-Karosseriebau Einzug gehalten. Neben hersteller- bzw. typenspezifisch unterschiedlichen Schweißverfahren wie Widerstands-Punktschweißen und Laserschweißen ist dabei selbst innerhalb eines zu prüfenden Bauteils eine zunehmende Vielfalt von Verbindungsgeometrien, Blechdicken sowie Materialien abzudecken. Eine dafür ausgelegte Thermografie-Prüfeinrichtung muss demnach durchgängig - von der Anregungsquelle über die Kameratechnik bis hin zur Auswertungsalgorithmik - eine dementsprechende Flexibilität und Anpassungsfähigkeit aufweisen. Im Beitrag wird ein modulares robotergestütztes Doppel-Thermografieprüfsystem mit Blitzanregung vorgestellt, dessen Konzept die Anwendung der Wärmefluss-Thermografie in wahlweise transmissiver oder reflexiver Komponenten-Anordnung erlaubt und somit auch jenen Teil der Schweißverbindungen an einer Karosserie für die automatische Prüfung zugänglich macht, welcher bisher bei Beschränkung auf eine der beiden Anordnungen jeweils nicht geprüft werden konnte. Die Kombination verschiedenartiger Materialien mit unterschiedlichen Emissions- bzw. Wärmeübertragungseigenschaften innerhalb einer Karosserie stellt erhöhte Anforderungen an die Robustheit der verwendeten Algorithmen zur Ermittlung der Anbindungsqualität. Darüber hinaus verlangen die in verschiedenen Blechdicken ausgeführten 2- und 3-Blech-Verbindungen leistungsfähige Anregungsquellen, welche wiederum speziell in der reflexiven Anordnung eine möglichst geringe Eigenerwärmung für ein Minimum an reflektierter Störstrahlung aufweisen sollen. Erreicht wird dies mit einer luftgekühlten Ringblitz-Anordnung, die eine durchgängige Prüfsequenz in der minimalen Blitzfolgezeit des Blitzgenerators von wenigen Sekunden erlaubt.

Einführung

Mit der zerstörungsfreien Prüfung von Schweißverbindungen, speziell bei Blechschweißungen im Überlappstoß, hat die Wärmefluss-Thermografie mit Blitz-Anregung eine Anwendung gefunden, die einerseits auf eine übersichtliche Konstellation bezüglich der thermodynamischen Grundlagen der Fehlerdetektion trifft, andererseits jedoch mit nicht zu vernachlässigenden Herausforderungen bei der praktischen Umsetzung insbesondere aufgrund der dabei zu beachtenden strahlungsphysikalischen Besonderheiten verbunden ist.



1 Transmissions- und Reflexions-Anordnung

In der für dieses Prüfverfahren maßgeblichen Norm zur aktiven Thermografie DIN 54192 [1] sind zwei Varianten der Prüfanordnung beschrieben, die sich hinsichtlich der Lage von Anregungsquelle und Kamera bezüglich des Prüfgegenstandes unterscheiden.

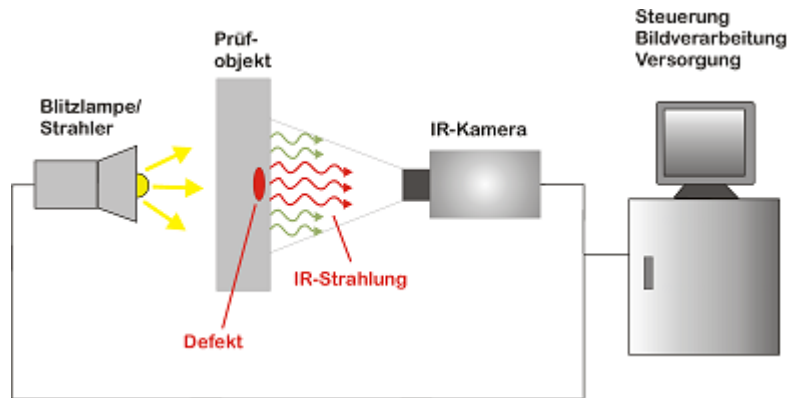


Abbildung 1: Wärmeleit-Thermografie in Transmissions-Anordnung, schematisch

In der Transmissions-Anordnung wird dieser von der Rückseite her angeregt, woraus ein grundsätzlicher Zeitverlauf der Oberflächentemperatur auf der Kameraseite entsprechend Abbildung 2: resultiert (siehe [2]). In den angebondenen Bereichen (schwarze Kurve) erreicht der sich durch die Schweißnaht hindurch ausbreitende Wärmeimpuls die Oberfläche eher als in den nicht angebondenen Bereichen (blaue Kurve), so dass anhand des zeitlichen Kurvenverlaufs der Oberflächentemperatur auf die Anbindung der darunter befindlichen Schweißnaht geschlossen werden kann.

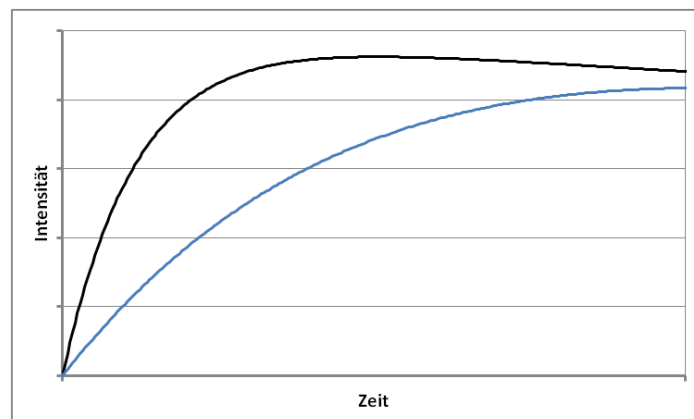


Abbildung 2: Temperaturverlauf an Schweißverbindung mit Blitz-Anregung in Transmissions-Anordnung

Alternativ dazu wird in der Reflexions-Anordnung der Prüfgegenstand von der Kamera-Seite her angeregt, so dass sich eine Anordnung der Komponenten gemäß Abbildung 3 ergibt.

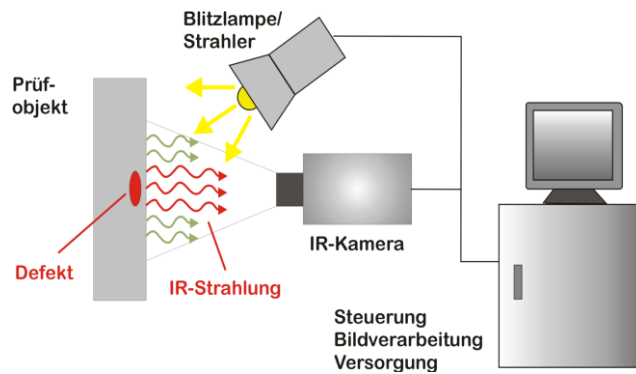


Abbildung 3: Wärmefluss-Thermografie in Reflexions-Anordnung, schematisch

Nach erfolgtem Wärmeeintrag durch den Blitz erfolgt deren Abfuhr durch die Schweißnaht hindurch zum Fügepartner in den angebondenen Bereichen (schwarze Kurve) schneller als in den nicht angebondenen Bereichen (blaue Kurve), so dass auch in diesem Fall wieder der zeitliche Kurvenverlauf der Oberflächentemperatur auf die Anbindung der darunter befindlichen Schweißnaht schließen lässt.

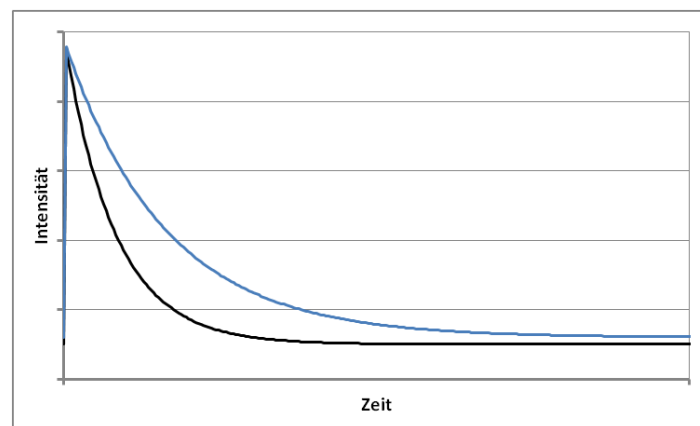


Abbildung 4: Temperaturverlauf an Schweißverbindung mit Blitz-Anregung in Reflexions-Anordnung

Der grundsätzlichen Verfügbarkeit dieser beiden Varianten steht ihre unterschiedliche Eignung im Hinblick auf für die praktische Durchführung relevante Aspekte gegenüber.

Ein großer Nachteil der Transmissions-Anordnung ist ihr – vom Prüfgegenstand aus betrachtet – beidseitiger und damit in der gerätetechnischen Umsetzung aufwändigerer Aufbau. Weiterhin lassen sich Mehrblechverbindungen damit nur dann prüfen, wenn alle beteiligten Bleche miteinander verschweißt sind. Die im Automobil-Karosseriebau immer häufiger vorkommenden verblendeten Schweißnähte, bei denen nur zwei der 3 übereinander liegenden Bleche miteinander verschweißt sind, lassen sich in dieser Anordnung nicht thermografisch prüfen.

Allerdings weist sie eine Reihe von Vorteilen auf, die ihren Einsatz gegenüber der Reflexions-Anordnung aus mess- bzw. prüftechnischen Aspekten in der Regel bevorzugt erscheinen lassen:

- höherer Kontrast der Oberflächentemperatur bei gleichem Energieeintrag
- Abschirmung des Blitzes ohne Zusatzmaßnahmen durch das Prüfobjekt selbst

- höhere Sicherheit vor Nicht-Erkennung bei praktisch relevanten Störeinflüssen (mangelndes Signal aufgrund zu geringem Emissionsgrad erscheint als fehlende Anbindung)
- geringere zeitliche Anforderungen an die Thermografie-Gerätetechnik, da späteres Kontrastmaximum

2 Modulares Systemkonzept

Der klassische Aufbau eines Thermografie-Prüfplatzes zur Schweiß-Verbindungsprüfung besteht hardwareseitig im Wesentlichen aus einer Thermografiekamera sowie einem Blitzkopf, der je nach Anordnung (Transmissions- oder Reflexions-Anordnung) zusammen mit ihm auf derselben oder der entgegengesetzten Seite der zu prüfenden Bauteile angeordnet wird.

Je nachdem, welche Komplexität die zu prüfenden Bauteile in ihrem Aufbau zum Zeitpunkt der Prüfung haben, kann es sinnvoller sein, entweder diese dem Prüfplatz mit einer festen Anordnung von Kamera und Blitz-Anregungseinheit einzeln zuzuführen oder aber die Komponenten des Prüfplatzes auf Robotern zu montieren und den Prüfling während der Prüfung in einer festen Position zu belassen.

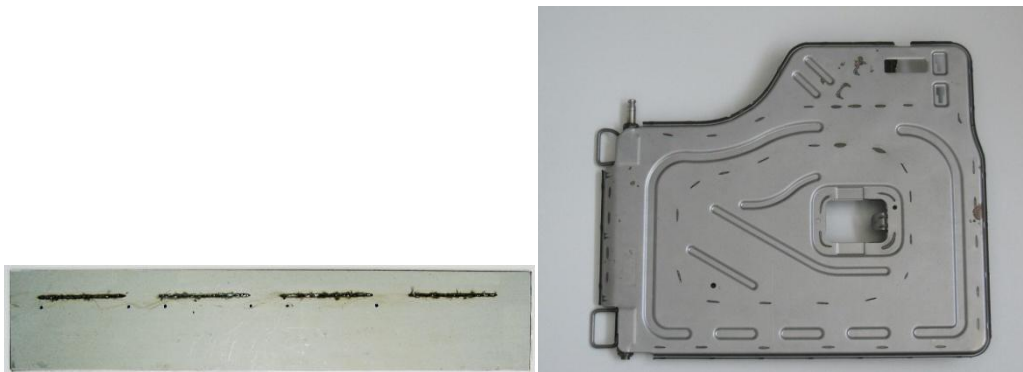


Abbildung 5: Beispiele für Prüfobjekte (links einfaches Bauteil, rechts komplexe Baugruppe)

Während sich für Baugruppen geringerer Komplexität und Abmessungen die erste Variante als vorteilhaft erwiesen hat, erfordert die Prüfung vollständiger Tür-, Seitenteil- bzw. Karosserie-Baugruppen die zweiteilige Lösung.

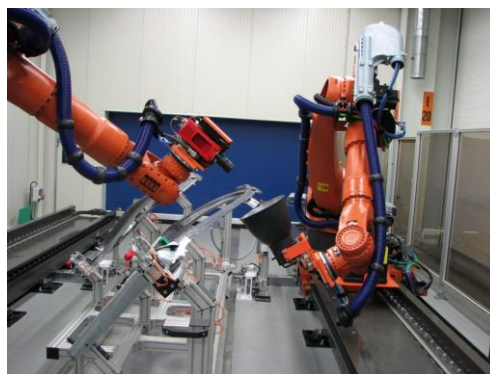


Abbildung 6: Robotergestützter Schweißverbindungs-Prüfplatz

Eine weitere Variante besteht darin, Kamera und Anregungseinheit zusammen auf einer beweglichen und manuell positionierbaren Handhabungseinheit zu montieren, so dass damit eine individuelle Prüfung von Schweißverbindungen an einfachen Bauteilen ebenso möglich ist wie an kompletten Karosserie-Baugruppen [3].



Abbildung 7: Hand-Prüfplatz zur manuellen Schweißverbindungs-Prüfung

Alle damit beschriebenen Anordnungen haben gemeinsam, dass es sich um Prüfplätze mit genau einer Kamera, genau einer Anregungseinheit sowie einer festen Prüfanordnung (Transmissions- oder Reflexions-Anordnung) handelt.

Während dies im Bereich der Prüfung von Baugruppen mit geringer Komplexität als eine der Aufgabenstellung gut angepasste hardwaretechnische Umsetzung erscheint, stößt man damit bei der Prüfung bereits vollständig verschweißter Karosserie-Baugruppen zunehmend auf Grenzen. Ursache hierfür ist zum einen die eingeschränkte Zugänglichkeit, da im Fall einer Transmissions-Anordnung immer eine der beiden Komponenten (Kamera oder Anregungseinheit) im Inneren der Karosserie platziert werden muss, was sich unter den Bedingungen der damit verbundenen eingeschränkten Bewegungsfreiheit teilweise recht problematisch darstellt. Zum anderen sind in diesem Integrationsstatus vermehrt Lasernähte an 3-Blech-Verbindungen zu prüfen, welche nur zwischen 2 der 3 Bleche ausgeführt sind und die sich damit einer Prüfung in der ansonsten aufgrund ihrer höheren Robustheit der Fehlerdetektion bevorzugten Transmissions-Anordnung entziehen.

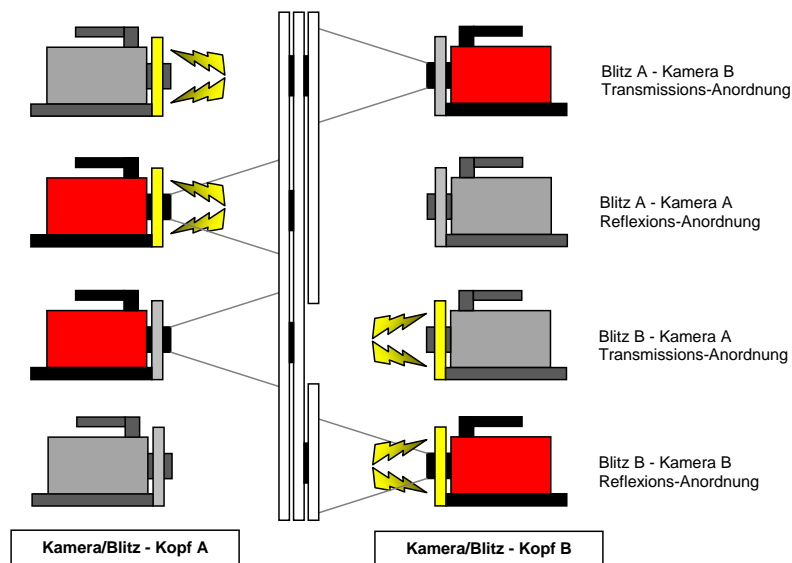


Abbildung 8: Modularer Doppel-Thermografieprüfplatz, Systemaufbau

Einen Ausweg aus dieser Situation kann der Aufbau des Systems in einer 2-Kopf-Anordnung mit je einer Kamera sowie einer Blitz-Anregungseinheit zeigen (siehe Abbildung 1Abbildung 8).

Während in der Vollausstattung Prüfungen in Reflexions- ebenso wie in Transmissions-Anordnung mit beliebiger Zuordnung von Anregungs- und Kamera-Seite möglich sind, bietet bereits die Ausstattung mit nur einer Kamera und 2 Blitz-Einheiten den prinzipiellen Zugang zu beiden Varianten. Der dadurch erzielbaren deutlichen Kostenersparnis können ggf. deutlich verlängerte Positionierwege bzw. -zeiten der Roboter gegenüberstehen.

3 Hardware-Komponenten

Die gerätetechnische Basis stellt eine MWIR-Thermografiekamera vom Typ ImageIR 5300 dar, mit welcher im Vollbild-Modus eine Bildaufnahmefrequenz von bis zu 350 Hz realisiert werden kann.

Mit Blick auf eine stufenweise Aufrüstbarkeit bis hin zum Vollausbau mit 2 Kameras besteht eine Randbedingung darin, die Blitz-Anregungseinheit so auszuführen, dass sie Bauraum für die zusätzliche Kamera bzw. speziell deren Objektiv freihält. In Verbindung mit der Anforderung nach einer möglichst gleichmäßigen Ausleuchtung der Prüffläche bietet sich damit eine Ausführung als Ringblitz an.



Abbildung 9: Thermografiekamera mit luftgekühlter Ringblitz-Einheit

Die Blitzröhre wird an einem Generator mit einer Blitzenergie von 6000J betrieben und einer Ladezeit von < 5 s betrieben. Bei schnellstmöglicher Blitzfolge kann damit eine mittlere elektrische Leistung von bis zu 1,2 kW umgesetzt werden. Während ein typisches Prüfprogramm eine Länge von (5 ... 10) Minuten haben kann, führt die dabei entstehende Abwärme bereits innerhalb nur einer Minute zum stufenweisen Aufheizen der Blitzröhre auf bis zu 120°C.

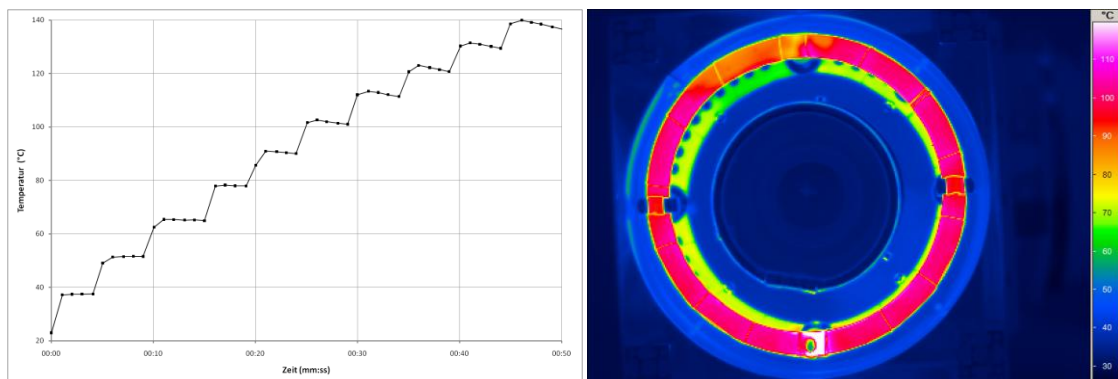


Abbildung 10: Blitzröhren-Oberfläche im Dauerblitzbetrieb, Temperatur-Zeit-Verlauf und Thermobild (LWIR)

Während die auf diesem Weg entstehende Störstrahlung in Transmissions-Anordnung eine untergeordnete Rolle spielt, da sie nur dort in Erscheinung tritt, wo der Strahlengang zur Blitzröhre nicht vollständig durch das Prüfobjekt abgedeckt wird, ist ihre Auswirkung in Reflexions-Anordnung sehr viel deutlicher zu verzeichnen. Auch wenn sie in erster Näherung als zeitinvarianter Offset wirkt, welcher im weiteren Berechnungsverlauf eliminiert wird, kann sie doch aufgrund des bei metallischen Werkstoffen hohen Reflexionsvermögens einen erheblichen Anteil des Kamera-Aussteuerbereiches einnehmen, was die Kompensation durch eine Reduzierung der Empfindlichkeit und damit Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses des Gesamtsystems nach sich zieht.

Allerdings ist der Zeitverlauf nur bei grober Zeitauflösung als quasi-stationär zu betrachten. Die Übertemperatur unmittelbar im Moment der Blitzauslösung ist deutlich höher und führt zu einer zeitlich instationären Störstrahlung innerhalb des für die Wärmefluss-Auswertung relevanten Zeitraums. Es bedarf daher besonderer konstruktiver Maßnahmen zur Reduktion von Blitzröhren-Temperatur bzw. daraus resultierender Strahlungs-Invarianzen.

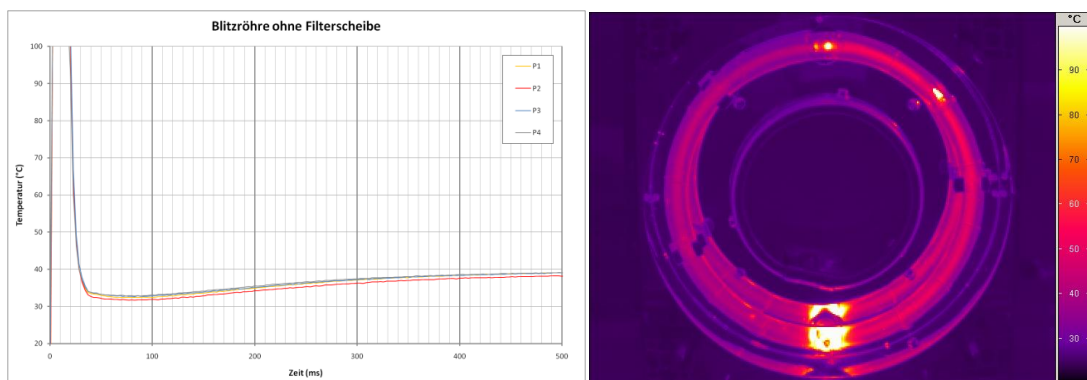


Abbildung 11: Blitz-Intensität im Kamera-Spektralbereich (MWIR), Temperatur-Zeit-Verlauf und Thermobild 30 ms nach Zündung

Als eine wirksame Maßnahme hat sich die Ausstattung des Blitzkopfes mit einer Druckluftspülung über Düsen erwiesen, die einen gerichteten Kühlluftstrom formen. Durch Anpassung der Düsendichte an den unterschiedlichen Kühlungsbedarf an verschiedenen Stellen der Blitzröhre lässt sich darüber hinaus eine besonders gleichmäßige Oberflächentemperatur erzielen.

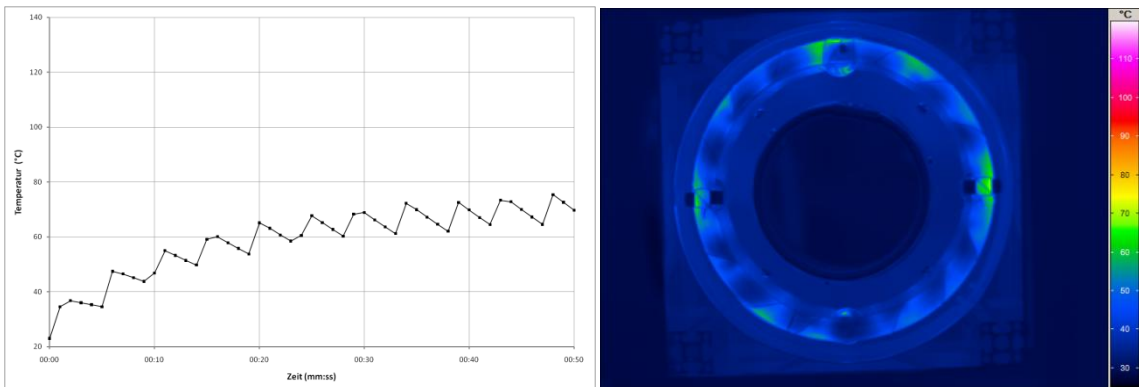


Abbildung 12: Blitzröhren-Oberfläche mit Luftspülung im Dauerblitzbetrieb, Temperatur-Zeit-Verlauf und Thermobild (LWIR)

Zusätzlich vor der Blitzröhre angebrachte Filterscheiben aus optisch transparentem, im IR-Bereich aber stark abschwächend wirkendem Material tragen zu einer weiteren Reduktion von Intensität und zeitlicher Änderung der durch die Eigenerwärmung entstehenden Störstrahlung bei.

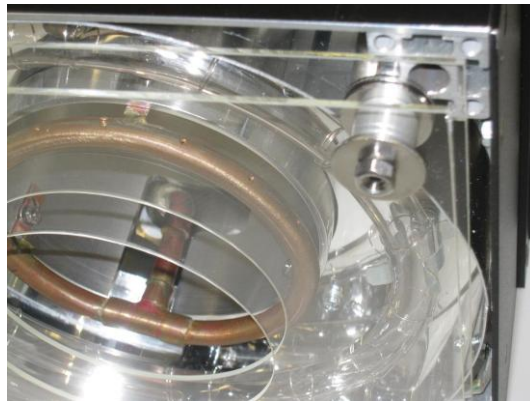


Abbildung 13: Blitzkopf mit Luftspüldüse und Filterscheiben

Zum einen bewirkt dies eine deutliche Reduzierung des im Empfindlichkeitsbereich der Kamera befindlichen IR-Anteils im durch den Blitz erzeugten Strahlungsspektrum (siehe Abbildung 14), wodurch bereits ein früherer Zeitpunkt nach Blitzauslösung frei von störenden Reflexionen ist und sich damit für eine quantitative Auswertung erschließen lässt. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn Materialien mit einer geringen Wärmekapazität und hoher Wärmeleitfähigkeit geprüft werden sollen.

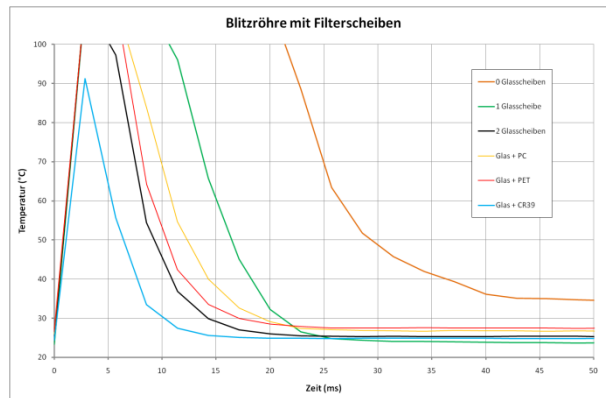


Abbildung 14: Zeitverlauf der Blitz-Intensität im Kamera-Spektralbereich (MWIR) mit Befilterungs-Varianten

Darüber hinaus reduziert sich auch der über einen längeren Zeitraum wirkende kontinuierliche Anstieg reflektierter Störstrahlung im Zuge einer schnellen Blitzfolge noch einmal deutlich, so dass ein mehrminütiger ununterbrochener Prüfbetrieb, wie er beispielsweise bei der Prüfung einer kompletten Karosseriebaugruppe auftritt, ermöglicht wird.

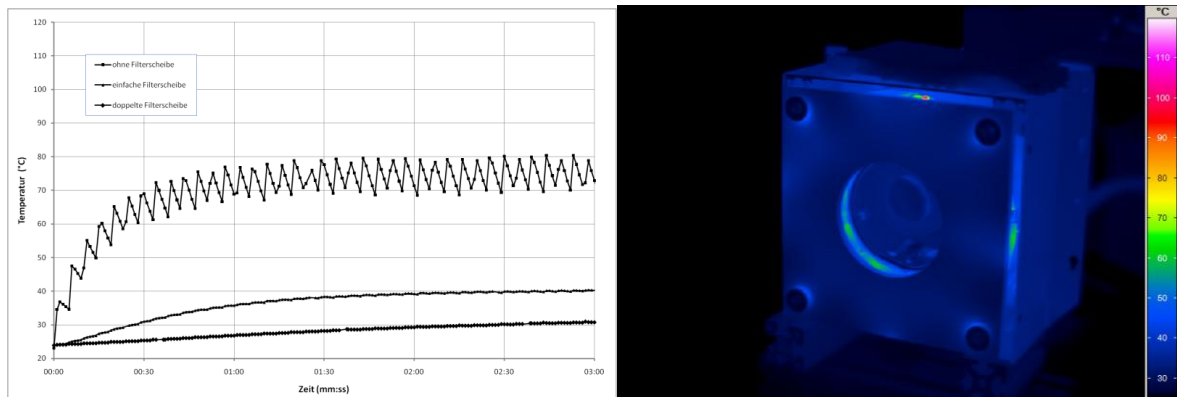


Abbildung 15: Blitzkopf-Oberfläche (ohne und mit Filterscheiben) im Dauerblitzbetrieb, Temperatur-Zeit-Verlauf und Thermobild (LWIR)

4 Software-Integration

Für die Auswertung der thermografischen Bildsequenzen existiert ebenso wie für die Hardware-Ausstattung des Prüfplatzes ein abgestuftes Konzept, das den spezifischen und sich teilweise vom Ansatz her deutlich unterscheidenden Anforderungen des Nutzers angepasst werden kann.

Stehen die Einbeziehung von Wissen und Erfahrung von geschultem Prüfpersonal im Vordergrund bzw. werden Unregelmäßigkeiten mit nicht-standardisiertem Erscheinungsbild erwartet, dann ist eine Software-unterstützte Prüfauswertung mit visuellem Thermobild-Mustervergleich sowie manueller Nahtlängenbestimmung und Klassifizierung das Mittel der Wahl.

Die komplette Erfassung der Prüfsequenzen einschließlich der Robotersteuerung zur nahtweisen Positionierung von Prüfobjekt bzw. Kamera und Blitzkopf erfolgt zwar softwaregesteuert, wird aber durch die Handlungen des Bedieners getaktet. Dieser bewertet

- unterstützt durch eine Folge von i.O.-Musterbildern - das aktuelle Thermobild visuell, vermisst darin die Nahtlänge und entscheidet schließlich über die Klassifikation der jeweiligen Schweißnaht.

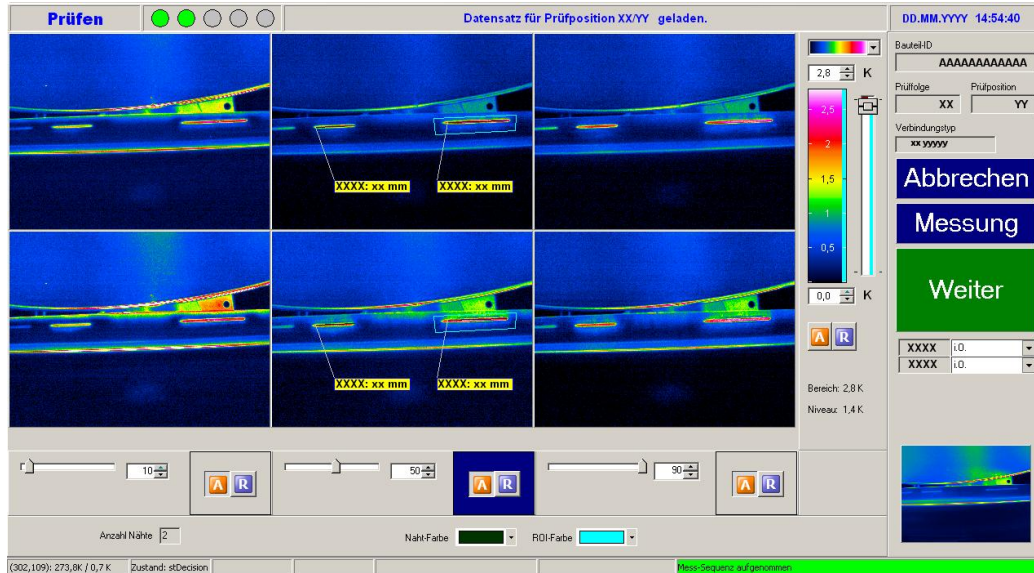


Abbildung 16: Anzeige- und Bedienoberfläche für manuellen Prüfbetrieb

Alternativ dazu kann die Ermittlung der qualitätsbestimmenden Nahteigenschaften auch automatisch vorgenommen werden. In diesem Fall ist der Thermobild-Akquisition eine Bildverarbeitungs-Sequenz nachgeschaltet, in deren Ergebnis der als angebundene Fläche detektierte Bereich geometrisch vermessen wird. In Abhängigkeit des Erreichens festgelegter Kriterien für Nahtlänge und -breite wird die Naht automatisch klassifiziert.

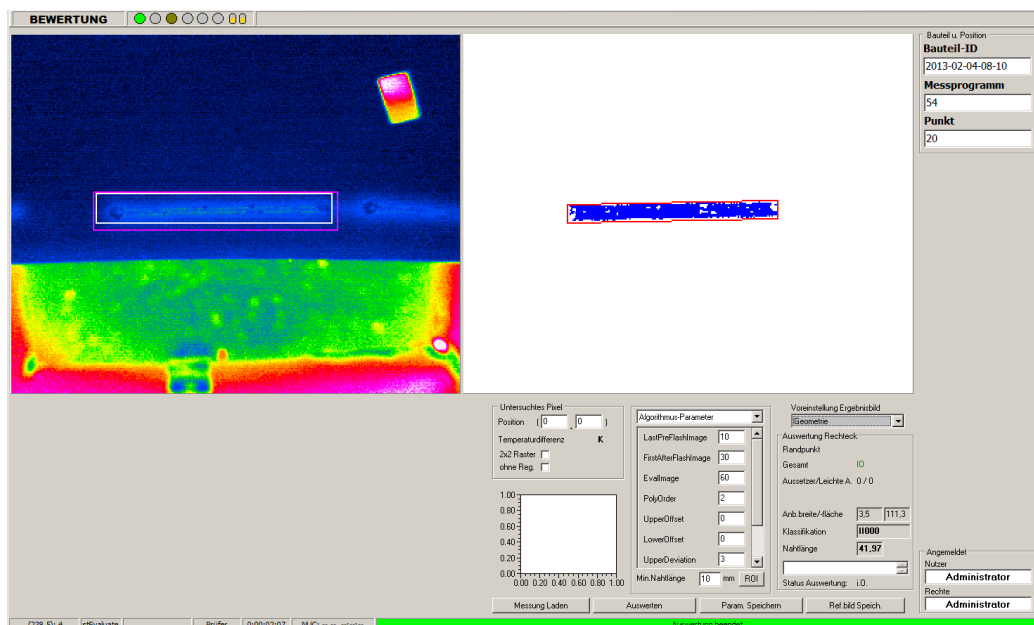


Abbildung 17: Anzeige- und Bedienoberfläche für automatischen Prüfbetrieb

Während im vollautomatischen Betrieb das Prüfergebnis damit feststeht und zur nächstfolgenden Naht in der Prüffolge übergegangen wird, kann der teilautomatische

Betrieb so konfiguriert werden, dass im Fall eines n.i.O.–Ergebnis eine zusätzliche Bewertung durch den Bediener erfolgen muss. Diese kann entweder sofort vor Fortführung der Prüffolge erforderlich sein (z.B. um die Prüfung an der aktuellen Roboterposition noch einmal zu wiederholen) oder aber sich auf die unabhängige Bewertung beschränken und damit zeitlich unabhängig nach bereits beendeter Akquisition aller Thermobild-Sequenzen eingeordnet werden können.

Die bedarfsweise Trennung und asynchrone Abarbeitung von Bild-Akquisition und Ergebnisbewertung wird dadurch ermöglicht, dass nicht nur die Prüfergebnisse über eine Datenbank weitergegeben werden, sondern auch die internen Informationen einschließlich des Prüfstatus konsequent auf diese Weise organisiert sind.

6 Zusammenfassung

Wie bereits für Punktschweißverbindungen praktisch umgesetzt und evaluiert ([4], [5], [6]), lässt sich auch die Qualitätsprüfung von Laserschweißnähten mit Mitteln der Wärmefluss-Thermografie betreiben ([7], [8]). Sowohl aus gerätetechnischer Sicht als auch hinsichtlich der Ergebnisbewertung und -klassifikation werden dabei verschieden weit reichende Systemkonzepte verfolgt, insbesondere was ihren Integrations- bzw. Automationsgrad betrifft.

Während für konventionelle 2-Blech-Verbindungen die Transmissions-Prüfanordnung aufgrund ihrer physikalisch bedingten Vorteile bevorzugt wird, sind 3-Blech-Verbindungen teilweise nur noch in Reflexions-Anordnung prüfbar und stellen damit erhöhte Anforderungen an die Hardware-Komponenten.

Einen Beitrag zur Bewältigung dieser Herausforderungen stellt das vorgestellte Doppel-Thermografieprüfsystem dar, mit welchem der kombinierte Betrieb zur Schweißverbindungsprüfung in transmissiver und reflexiver Anordnung ermöglicht wird. Mit Hilfe einer luftgekühlten Ringblitz-Anordnung lassen sich die Anforderungen eines automatischen Prüfbetriebs mit mehrminütigen Sequenzen bei schneller Blitzfolge erfüllen.

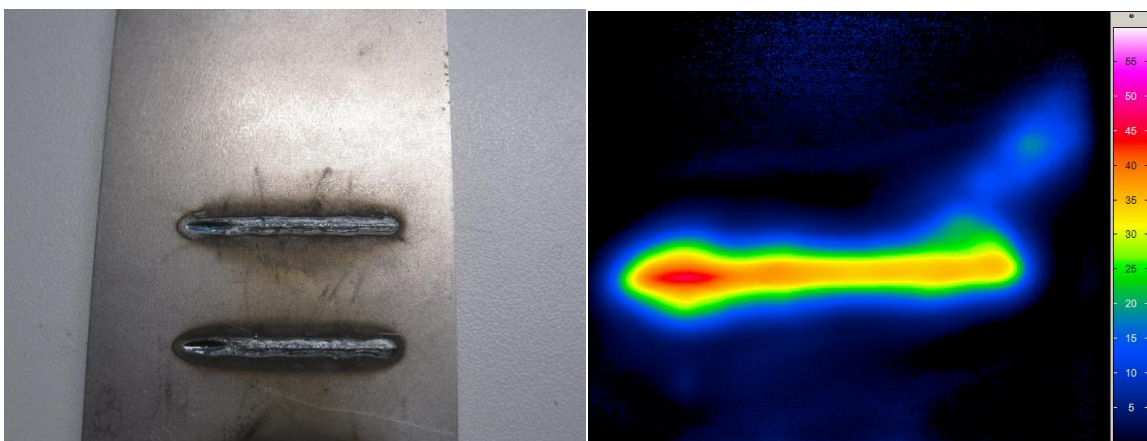


Abbildung 18: Lasernaht 2-Blech-Verbindung 2,0 mm / 0,8 mm (Foto und Wärmeflussthermografie-Auswertungsbild)

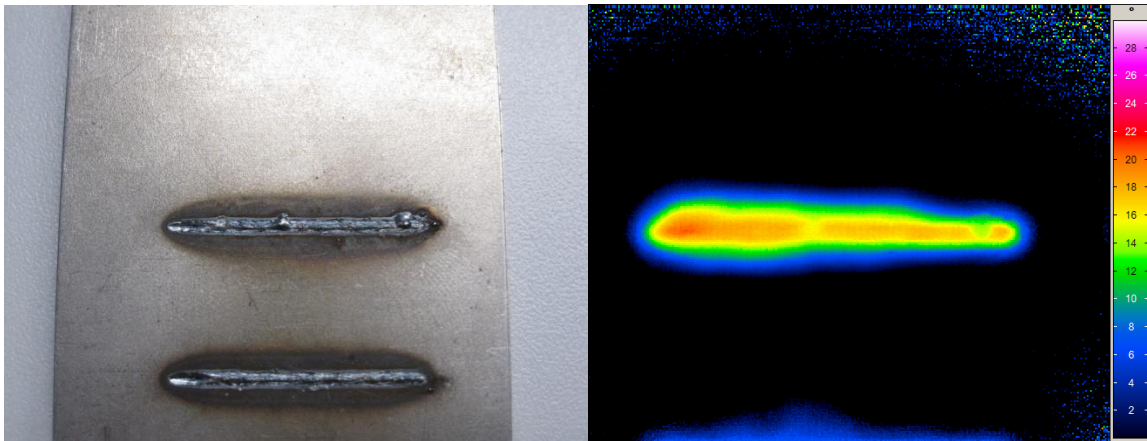


Abbildung 19: Lasernaht 3-Blech-Verbindung 2,5 mm / 0,8 mm / 0,8 mm (Foto und Wärmefluss-thermografie-Auswertungsbild)

Referenzen

- [1] DIN 54192:2010-11, “Zerstörungsfreie Prüfung - Aktive Thermografie”
- [2] X. Maldague, “Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing”, John Wiley & Sons, New York, 2001
- [3] G. Mahler, “Wärmefluss-Thermographie mit Strahlungsanregung im VIS/IR-Bereich”, Fraunhofer VISION Seminar, Erlangen, 2010
- [4] Produkt-Information “ThermoCheck-Weld. Thermografie zur vollautomatischen zerstörungsfreien Prüfung an Karosserien”, www.infratec.de, www.vision.fraunhofer.de, Dresden, 2010
- [5] R. Beyer, “Gut verschweißt. Der Einsatz thermographischer Prüfmethode im Automobilbau”, In: Inspect 2/2011, S.54 - 57
- [6] J. Schlichting, H. Steinfurth, C. Maierhofer, M. Kreuzbruck, “Thermografische Prüfung von Punktschweißverbindungen”, DGZfP-Jahrestagung, Graz 2011
- [7] T. Grünberger, H. Basalka, W. Postl, G. Mahler, “Aktive Thermografie zur Qualitätsinspektion von Fügeverbindungen am Beispiel von Laserschweißnähten - von der Simulation bis zu realen Messungen”, COMET K-Projekt JOIN4plus, Wissenschaftliche Veranstaltung, Graz, 2013
- [8] P.-M. Mickel “Lasernahtprüfung bei Volkswagen Sachsen”, EALA – European Automotive Laser Applications, Bad Nauheim, 2013