

## 4.16 Thermographie mit optischer Anregung zum Einsatz in der Qualitätskontrolle

### Einführung

Mit der Wärmeﬂuss-Thermographie mit optischer Anregung wird im folgenden Kapitel ein vielseitig einsetzbares Verfahren der Thermographie vorgestellt.

Wie bereits in vorangehenden Kapiteln beschrieben, wird bei der Wärmeﬂuss-Thermographie dem Prüfling in einer solchen Weise gezielt Energie zugeführt, dass der sich daraufhin zum Temperatenausgleich ausbildende Wärmeﬂuss an dessen Oberfläche gelangt und dort ein thermisches Abbild in Form von, zumeist äußerst geringen, Temperaturdifferenzen erzeugt.

### Optische Anregung

Von den verschiedenen Methoden zum Energieeintrag zeichnet sich die optische Anregung durch ihre besondere Einfachheit sowie durch ein breites Anwendungsfeld aus. Sie ist nicht prinzipbedingt auf dafür geeignete Materialien beschränkt, wie beispielsweise die induktive Anregung oder bedarf einer mechanischen Ankopplung, wie die Anregung mit Leistungs-Ultraschall. Metallische Prüflinge lassen sich ebenso optisch anregen wie solche aus Kunststoffen, Verbundmaterialien oder auch Keramik.

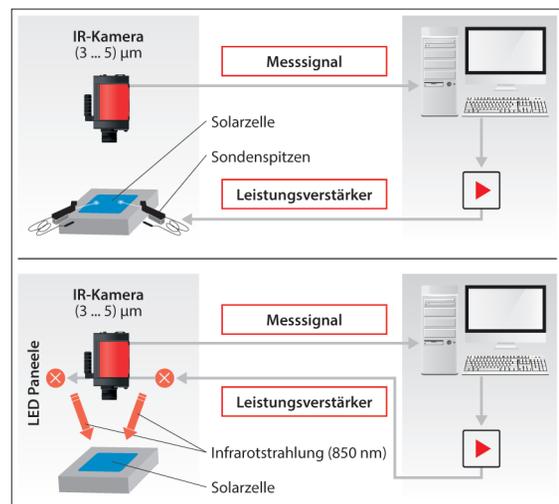
Ein weiterer Vorteil der optischen Anregung ist die Vielfalt der möglichen Anregungsquellen. Der Anwender kann auf eine Vielzahl verschiedener Hochleistungs-Lichtquellen mit unterschiedlichen Strahlungsintensitäten, Anregungsleistungen, Wellenlängen, Wiederholraten usw. zurückgreifen.

Eine impulsförmige Anregung lässt sich (typischerweise mittels Gasentladungs-Blitzlampen) ebenso realisieren wie eine stufenförmige (z. B. mit keramischen Infrarot-Strahlern, Carbonstrahlern oder Lasern) bzw. eine periodische wie beispielsweise mit Halogenstrahlern oder LED-Panels. Für die sich daraus ergebenden

Möglichkeiten der Wärmeﬂuss-Thermographie bedeutet dies, dass das Analyseverfahren der für periodische Anregung bevorzugten Lock-In-Thermographie ebenso anwendbar ist, wie z. B. jenes der Puls-Phasen-Auswertung, das insbesondere bei einmaliger Anregung zum Einsatz kommt.

### Prüfung von Solarzellen

Eine der ersten in Serie realisierten Anwendungen optisch angeregter Thermographie war die berührungslose Prüfung von Solarzellen oder der zu deren Herstellung verwendeten Wafer im Verlauf ihrer Fertigung (siehe [1]). Während eine konventionelle thermische Solarzellenprüfung (Dark Lock-In-Thermography DLIT) zur Anregung mittels Bestromung der Zelle ihre Kontaktierung voraussetzt und damit erst an einer fertig prozessierten Zelle vorgenommen werden kann, ermöglicht das ILIT-Verfahren (Illuminated Lock-In-Thermography) dies bereits an einem deutlich früheren Punkt der Prozesskette (siehe Bild 1 und Bild 2).



**Bild 1:** Thermographische Solarzellenuntersuchung nach dem DLIT- (oben) und ILIT-Prinzip (unten) (Quelle: InfraTec GmbH).

An die Stelle des über ihre Kontaktierung eingespeisten Prüfstroms tritt dessen Erzeugung durch die Zelle selbst, sobald man sie Lichtstrahlung ausreichender Intensität aussetzt. Als Lichtquelle hierfür eignen sich LED-Panels, mit denen sich hohe Bestrahlungsstärken bei einer homogenen Ausleuchtung der Zelle, wie sie für eine gleichmäßig über der Zelle verteilte Prüfempfindlichkeit benötigt wird, erzielen lassen, und die sich darüber hinaus mit Frequenzen von einigen 10 Hz takten lassen. Die Verfügbarkeit von LED für verschiedene Wellenlängen ermöglicht eine jeweils optimale Einkopplung der Anregungsenergie durch Anpassung an die bei den verschiedenen Technologien unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten.



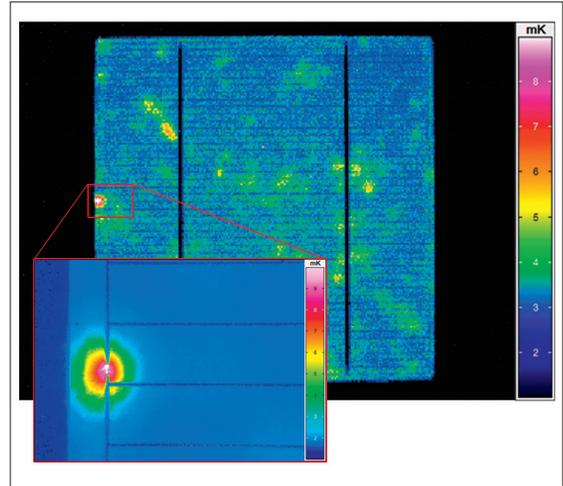
**Bild 2:** Thermographisches Solarzellen-Prüfsystem PV-LIT, Probenkammer  
(Quelle: InfraTec GmbH).

Die Temperaturdifferenzen, die sich an lokalen Defektstellen (sogenannten Shunts) einer kurzzeitig im Prüfmodus befindlichen Zelle ausbilden, sind so klein, dass selbst die Temperaturauflösung einer hochauflösenden Thermographiekamera (z. B.  $\leq 20$  mK) typischerweise nicht ausreicht, um diese »Hot Spots« mit einem ausreichenden Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) zu erfassen.

Überwinden lässt sich dies durch eine periodische Anregung in Verbindung mit Anwendung des aus der zerstörungsfreien thermographischen Materialprüfung bekannten

Lock-In-Auswerteverfahrens auf die dabei zeitlich synchronisiert erfasste Thermographie-Bildfolge. Die durch eine bildpunktweise Fourieranalyse der Daten ermit-

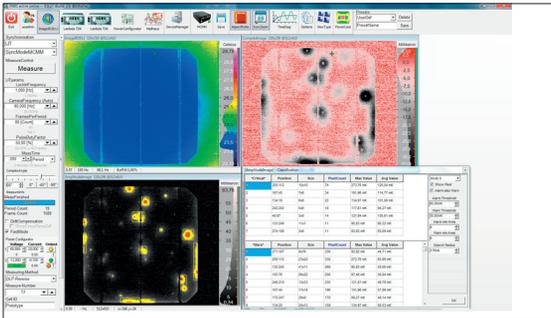
telten Amplituden- und Phasenbilder zeigen ein deutlich verbessertes SNR und erlauben bei entsprechender quantitativer Auswertung detaillierte Rückschlüsse über Details zum Charakter des Fehlers (Ohm'scher oder Dioden-Shunt, oberflächen- oder rückseitennahe Fehler) (siehe Bild 3).



**Bild 3:** LIT-Amplitudenbild einer Solarzelle mit Shunt-Defekt, Normal- (großes Bild) und Mikroskopobjektiv (kleines Bild)  
(Quelle: InfraTec GmbH).

Die als zweidimensionales Abbild der Zellenoberfläche vorliegenden thermographischen Prüfdaten lassen sich anschließend einer automatischen Bewertung nach vorgegebenen Prüfkriterien zuführen. Zusätzlich zu den Positionen und Intensitäts-Ausprägungen der Einzelfehler lassen sich Angaben zum resultierenden Gesamtverlust der Zelle ableiten. Voraussetzungen hierfür sind eine präzise anregungssynchrone Erfassung der Thermographiebildfolgen, mit welcher für alle relevanten Anregungsfrequenzen eine korrekte Zuordnung zum phasensynchronen Realteil ( $0^\circ$ -Bild) bzw. dessen um  $90^\circ$  verschobenen Imaginärteil des komplexen Ergebnisbilds sichergestellt wird, sowie die Wahl angepasster Anregungsparameter (Frequenz, Intensität) (Bild 4).

Damit stehen variabel kombinierbare Möglichkeiten einschließlich der entsprechenden statistisch auswertbaren Kenngrößen für eine integrale ebenso wie bei



**Bild 4:** Ergebnisdarstellung nach automatischer Fehlerlokalisierung und -klassifizierung (Quelle: InfraTec GmbH).

Bedarf deutlich detailliertere Bewertung der Zellqualität sowie deren prozessbegleitender Überwachung zur Verfügung.

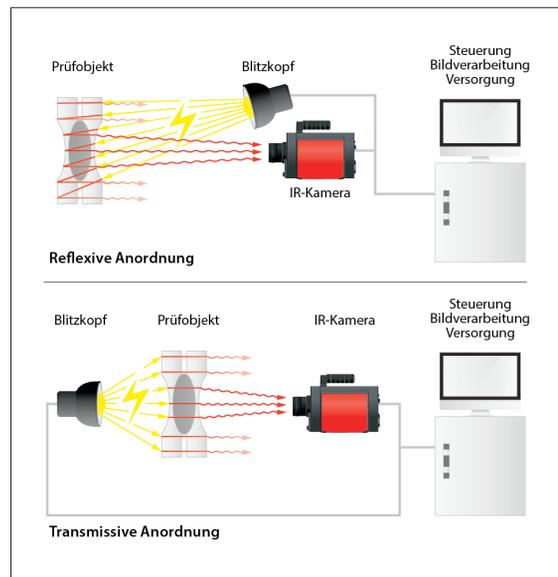
## Qualitätssicherung beim Automobilkarosseriebau

Eine weitere industrielle Anwendung für die optisch angeregte Thermographie findet sich in der industriellen Qualitätssicherung beim Automobilkarosseriebau ([2], [3]). Für jedes Fahrzeug wird eine Vielzahl von Fügeverbindungen zwischen zwei oder mehreren Blechen hergestellt, zumeist mittels Widerstandspunkt- oder Laserschweißen. Die stoffschlüssige Verbindung der Schweißung (Linse bzw. Naht) bildet mit dem an dieser Stelle vorhandenen, direkten lokalen Wärmeübergang zwischen den Fügepartnern den Ausgangspunkt für eine zerstörungsfreie Prüfung mittels Wärmefluss-Thermographie.

Die den Zeitverlauf des Wärmetransports bestimmende thermische Diffusivität des hierbei am häufigsten vorkommenden Materials Stahl weist einen im Vergleich zu nichtmetallischen Materialien wie z. B. Kunststoff- oder Faserverbundwerkstoffen deutlich größeren Wert auf. Aus diesem Grund müssen die Thermographiebilder mit entsprechend höherer Bildrate aufgenommen und der Wärmeeintrag innerhalb kürzerer Zeit erfolgen, z. B. über eine einmalige Auslösung einer Hochleistungs-Blitzröhre, die an die Stelle einer periodischen

Anregung in Verbindung mit der Auswertung der Thermographiedaten nach dem Lock-In-Prinzip tritt.

Grundsätzlich lässt sich ein Blitzthermographie-Prüfplatz für Schweißverbindungen sowohl in transmissiver als auch reflexiver Anordnung ausführen (siehe Bild 5). Anders als bei der Prüfung von nichtmetallischen Prüflingen hat man es hier jedoch in der Regel mit stark reflektierenden Materialoberflächen zu tun, was sich sowohl für den Eintrag der Blitzenergie als auch für die Erfassung der resultierenden Temperaturdifferenzen als nicht unproblematisch darstellt.



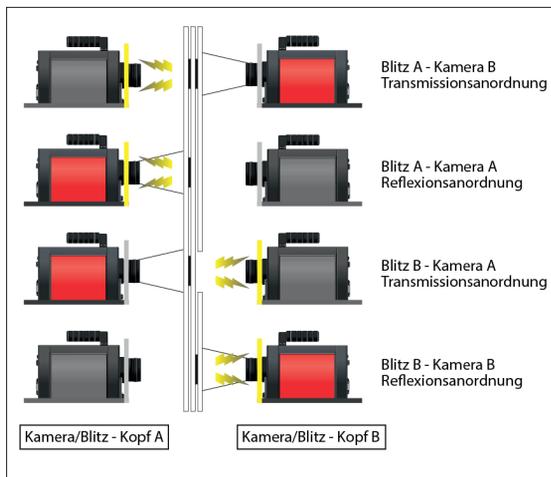
**Bild 5:** Schweißnahtprüfung mit Blitzthermographie in transmissiver (unten) und reflexiver Anordnung (oben) (Quelle: InfraTec GmbH).

Da die hohe Wärmeleitfähigkeit der Verbindungspartner die laterale Wärmeableitung in Ober- bzw. Unterblech kaum behindert, besteht der auswertbare Teil des instationären Wärmefflusses anregungsseitig nur für einen sehr kurzen Zeitraum im Bereich weniger zehn Millisekunden, innerhalb dessen die von der Blitzröhre ausgehende Strahlung noch nicht vollständig abgeklungen ist und über die Reflexion des Materials das Nutzsignal überlagert und dadurch die Auswertung erschwert.

Die transmissive Anordnung bietet daher zwar eine typischerweise deutlich höhere Detektionssicherheit, jedoch ist die dafür erforderliche, beidseitige Zugänglichkeit der zu prüfenden Naht in der Praxis oftmals nicht gegeben und man hat keine Alternative zur reflexiven Anordnung. Neben räumlichen Einschränkungen durch den bereits fortgeschrittenen Ausbaustand des zu prüfenden Karosserieteils kann hierfür auch der mehrlagige Aufbau mit teilweise oder vollständig verdeckten Schweißnähten verantwortlich sein, wie dies im modernen Karosseriebau zunehmend der Fall ist.

Eine universell ausgelegte Prüfeinrichtung sollte daher beide Varianten umsetzen können, was sich mit zwei jeweils mit Ringblitzröhren bestückten Prüfköpfen in einer roboterbasierten Anordnung umsetzen lässt. Die komplett symmetrische Auslegung erlaubt größte Variabilität bei Bestückung beider Köpfe mit je einer Kamera, bietet aber bereits mit nur einer Kamera die Möglichkeit eines gemischten Betriebs mit transmissiv und reflexiv zu prüfenden Nähten (Bild 6 und 7).

Bei der Programmierung des Prüfablaufs werden die Lasernähte verschiedenster Länge je nach Bedarf in Abschnitte zerlegt, die sich aus der bei einmaligem An-



**Bild 6:** Prinzipaufbau der thermographischen Schweißnaht-Prüfanordnung mit zwei ringblitzbestückten Prüfköpfen (Quelle: InfraTec GmbH).



**Bild 7:** Automatisches Thermographie-Prüfsystem für Laserschweißnähte (Quelle: InfraTec GmbH).

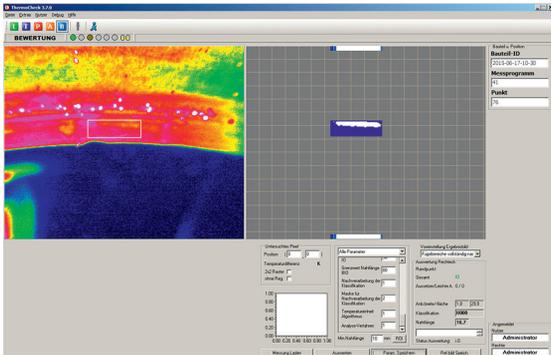
blitzen maximal prüfbaren Fläche ergeben. Diese Prüflfolge wird automatisch abgefahren und die gewonnenen Thermographiedaten werden unmittelbar danach einer automatischen Bewertung unterzogen.

Von allen als NIO geprüften Nahtsegmenten werden dem Prüfer anschließend Thermographiebilder aus der Sequenz im Vergleich mit Bildern von IO-Musterteilen zur Überprüfung und ggf. Korrektur der Prüfentscheidung präsentiert. Diese repräsentieren charakteristische Zeitpunkte innerhalb des kurzen, in den meisten Fällen weniger als eine Sekunde andauernden Vorgangs der Wärmeausbreitung (Bild 8 und 9).

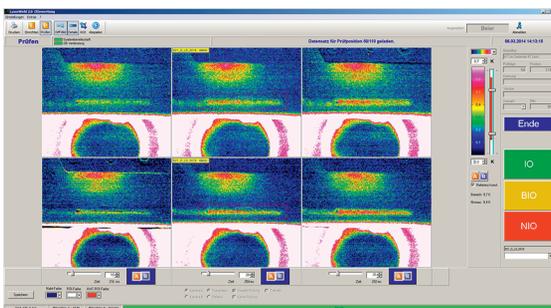
Das Prüfsystem verfügt über eine Datenbank-Schnittstelle, über welche es die Prüfergebnisse dem übergeordneten QM-System in benötigtem Umfang und Detaillierungsgrad zur Verfügung stellt und damit die individuelle Rückverfolgbarkeit jeder geprüften Schweißnaht ermöglicht.

## Zusammenfassung

An zwei praktischen Beispielen wurde dargestellt, wie sich die optisch angeregte Wärmefluss-Thermographie nach vielen positiven Erfahrungen bei der Untersuchung von Bauelementen und deren Verbindungen



**Bild 8:** Thermographiebild einer Schweißnaht (links) und aus der Bildfolge ermittelter Anbindungsbereich (rechts, weiße Fläche) (Quelle: InfraTec GmbH).



**Bild 9:** Thermographische Bildfolge einer Prüfung mit IO-Muster zum visuellen Vergleich (Quelle: InfraTec GmbH).

unter Laborbedingungen mittlerweile auch als ein für automatisierte industrielle Serienprüfungen geeignetes Verfahren erwiesen hat.

Als begünstigende Faktoren hierfür haben sich die uneingeschränkte Berührungslosigkeit, eine grundsätzliche Unabhängigkeit von den Materialeigenschaften der Prüflinge sowie die Verfügbarkeit von Anregungsquellen mit sehr unterschiedlichen und damit gut an die jeweiligen, sich aus Prüfanordnung, Anregungsart und -häufigkeit ergebenden Anforderungen erwiesen.

## Literatur

- [1] Breitenstein, Otwin; Warta, Wilhelm; Langenkamp, Martin: Lock-In Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials, 2. Auflage 2012
- [2] Mahler, Guido: Thermografische Lasernahtprüfung von Mehrblech-Verbindungen im Automobil-Karosseriebau. In: DGZfP-Jahrestagung, Dresden, 2013
- [3] Mahler, Guido; Mickel, Paul-Michael; Beier, Sven : Praktische Aspekte der Automatisierung thermografischer Schweißnahtprüfung. In: DGZfP Thermographie-Kolloquium, Stuttgart, 2015

## Autoren

Guido Mahler, David Pfengler  
InfraTec GmbH, Dresden