

# Untersuchung von Punktschweißverbindungen mit aktiver Thermografie

Florian JONIETZ<sup>1</sup>, Mathias ZIEGLER<sup>1</sup>, Philipp MYRACH<sup>1</sup>, Hubert SUWALA<sup>2</sup>,  
Michael RETHMEIER<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, Berlin

**Kurzfassung.** Widerstandspunktschweißen ist insbesondere im Automobilbau eine der wichtigsten Fügeverfahren. Bislang erfolgt die Qualitätssicherung überwiegend durch stichprobenartige zerstörende Prüfung. Eine zerstörungsfreie Prüftechnik würde neben der Reduzierung der Prüfkosten auch eine Optimierung des Punktschweißverfahrens bedeuten, da prinzipiell jeder Schweißpunkt geprüft werden könnte und somit auch eine Reduzierung der Anzahl der Schweißpunkte möglich ist.

Es wird ein Verfahren vorgestellt, bei dem die Punktschweißverbindung zwischen zwei Stahlblechen optisch auf einer Blechseite mittels Laser oder Blitzlicht erwärmt wird. Die aufgeschmolzene Zone, die sogenannte Schweißlinse, stellt dabei neben der mechanischen Verbindung auch eine Wärmebrücke zwischen den beiden verschweißten Blechen dar, die bei diesem Verfahren ausgenutzt wird. Durch den verbesserten thermischen Kontakt zwischen den verschweißten Blechen an der Schweißlinse kontrastiert diese deutlich mit dem umgebenden Blechmaterial, bei dem der Wärmeübertrag zwischen den Blechen vergleichsweise gering ist. Dieser Kontrast im thermischen Verhalten kann mittels zeitabhängiger Thermografie gemessen werden.

Durch das hier vorgestellte Verfahren kann mittels aktiver Thermografie sowohl in Transmissions- als auch in Reflexionsanordnung die Größe des thermischen Kontaktes zwischen den beiden Blechen ermittelt werden, welche ein Maß für die Größe der Schweißlinse und damit für die qualitative Güte der Schweißung darstellt. Ein Vorteil des entwickelten Verfahrens ist seine Anwendbarkeit auf Bleche ohne Oberflächenbehandlung.

## 1. Einführung

Widerstandspunktschweißen hat gerade im Automobilbau eine immense technologische und wirtschaftliche Bedeutung. Dennoch ist die Qualitätssicherung dieses Fügeverfahrens nur unbefriedigend gelöst. Die Fehlerrate des Punktschweißens hängt von vielen Einflüssen ab und ist zudem zeitlich nicht konstant. In Zukunft stellt die kontinuierliche Weiterentwicklung und Veränderung der eingesetzten Werkstoffe eine große Herausforderung für die Zuverlässigkeit und die Prüfbarkeit des Verfahrens dar.

Bislang erfolgt die Sicherstellung der Qualität durch die Überwachung der Prozessparameter während des Schweißens und stichprobenartig durch zerstörende Prüfung der fertigen Schweißungen [1]. Diese zerstörende Prüfung erfordert einen hohen zeitlichen Aufwand und kann zudem auch fehlerbehaftet sein, da die Bruchbilder sehr individuell sein



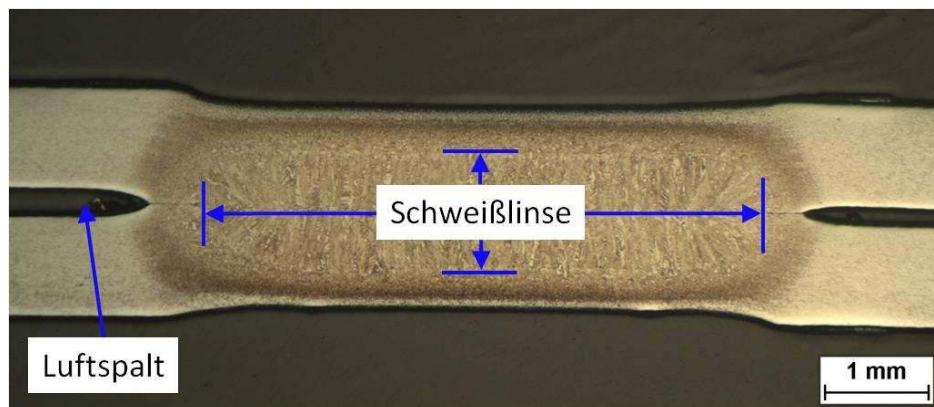
können und die Beurteilung sehr stark vom menschlichen Einschätzungsvermögen abhängt. Außerdem liefert die zerstörende Prüfung nur eine Referenz, da die geprüften Werkstücke nicht mehr verwendet werden können.

Im Gegensatz dazu kann zerstörungsfreie Prüfung prinzipiell an jedem Schweißpunkt durchgeführt werden, um seine Güte zu ermitteln. Damit könnte die Anzahl der benötigten Schweißpunkte reduziert werden, da bisher aufgrund der unzureichenden Qualitätssicherung mit einer großen Redundanz an Schweißpunkten fabriziert wird. Außerdem kann das Verfahren automatisiert werden, wenn auf die fachmännische Inspizierung von individuellen Bruchbildern verzichtet werden kann.

Ein thermografisches Verfahren zum Testen von Punktschweißverbindungen wurde zum ersten Mal in [2] vorgeschlagen, wobei in Reflexionsanordnung gemessen wird. In [3][4] wurde ein thermografisches Prüfverfahren in Transmissionsanordnung durchgeführt, bei dem die Oberflächen der Proben mit einem Material hoher Emissivität beschichtet waren, um die Oberflächenrauigkeit zu kompensieren und höhere Intensitäten zu erhalten.

Abb. 1 zeigt das mikroskopische Schliffbild durch den Mittelpunkt einer Punktschweißung, wobei die Kornstruktur durch ein Ätzverfahren sichtbar gemacht wurde. Eine wesentliche Bedeutung bei der Bestimmung der Qualität der Schweißung hat die Ermittlung des Durchmessers der Schweißlinse (in Abb. 1 anhand der Kornstruktur erkennbar), da dieser Parameter maßgeblich ist für die mechanische Festigkeit der Verbindung.

Das im Rahmen eines IGF-Vorhabens entwickelte und im Folgenden beschriebene thermografische Prüfverfahren ist im Wesentlichen sensitiv auf diesen Durchmesser und kann daher die Güte der Schweißung indizieren. In Abb. 1 ist ersichtlich, dass der Materialkontakt zwischen den beiden Blechen im Wesentlichen durch die Schweißlinse gegeben ist, während außerhalb davon ein Luftspalt vorliegt. Nach der flächigen Erhitzung eines der beiden Bleche wird der Wärmefluss auf das andere Blech durch die Schweißlinse hindurch deutlich besser sein als durch den Luftspalt. Dieser Kontrast im thermischen Verhalten kann dazu genutzt werden, die Größe und Kontur der Schweißlinse zu ermitteln.



**Abb. 1:** Schliffbild durch Mittelpunkt einer Punktschweißung.

## 2. Versuchsaufbau

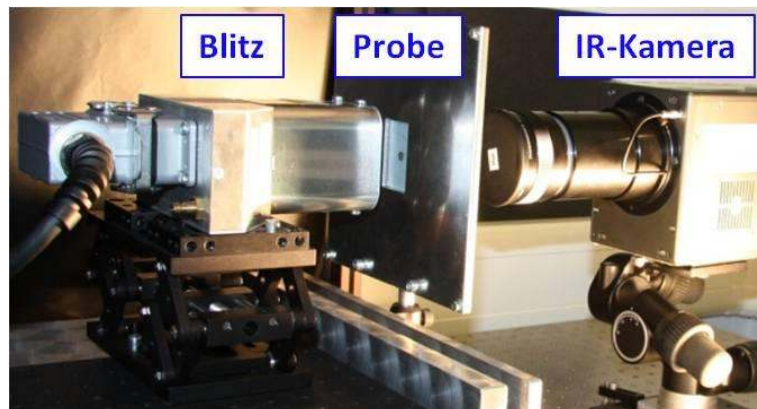
Die Proben bestanden aus jeweils zwei zusammengeschweißten 1 mm dicken zinkbeschichteten Stahlblechen der gleichen Stahlsorte der Größe 4 cm x 6 cm. Zwei unterschiedliche Stahlsorten wurden verwendet, zum einen feuerverzinkter HX340LAD+Z100MB und zum anderen elektrolytisch verzinkter HC340LA+ZE 50/50. Es wurden sechs verschiedene Schweißqualitäten erzeugt durch die Variation des Schweißstromes, wobei die Güte der Schweißung mit dem Schweißstrom ansteigt.

Es wurden zwei verschiedene Konfigurationen verwendet, um den Wärmefluss durch die Schweißproben nach einseitiger flächiger Erwärmung zu messen. Zum einen wurde die Transmissionsanordnung angewandt, bei der sich die thermische Anregungsquelle und die Infrarotkamera auf verschiedenen Seiten der Probe befinden, zum anderen die Reflexionsanordnung, bei der sich die thermische Anregungsquelle und die Infrarotkamera auf derselben Seite der Probe befinden.

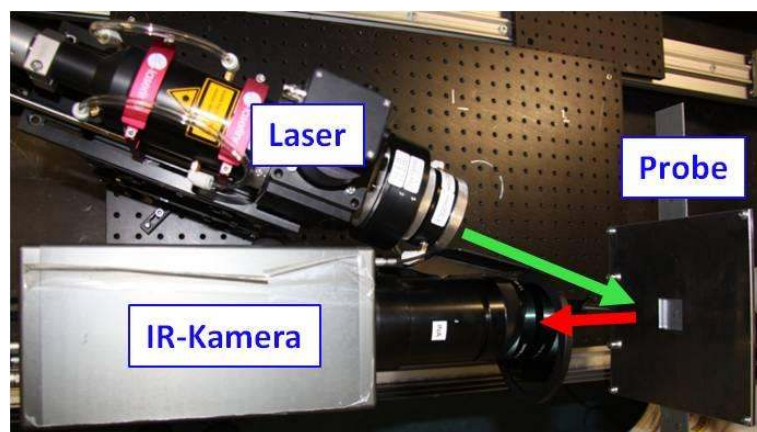
Als Anregungsquelle wurde sowohl flächige Blitzlichtanregung verwendet als auch Laseranregung im nahen Infrarotbereich, wobei die Intensität des Laserlichtes auf eine Fläche (2 cm x 2 cm) verteilt wurde, die groß genug war, um die Punktschweißung zusammen mit etwas umgebendem Probenmaterial vollständig zu erfassen.

Abb. 2 zeigt den Versuchsaufbau in Transmissionsanordnung mit Blitzlicht, Abb. 3 zeigt den Versuchsaufbau in Reflexionsanordnung mit Laseranregung. In Abb. 2 ist ersichtlich, dass das Blitzgerät sehr nahe an der Probe platziert ist, um möglichst große Intensität zu erreichen. Bei Laseranregung kann der Abstand über die Fokussieroptik des Lasers gewählt werden. In Abb. 3 ist daher zu sehen, dass sich der Laser weiter entfernt von der Probe befindet.

Durch die geringe Divergenz der Laserstrahlung werden zudem höhere Bestrahlungsintensitäten auch in größeren Abständen erreicht. Zusätzlich hat die Anregung mittels Laserstrahlung den Vorteil, dass die Wellenlänge der monochromatischen Laserstrahlung ( $940 \pm 10$ ) nm getrennt werden kann von dem sensitiven Wellenlängenbereich der Infrarotkamera (3-5)  $\mu\text{m}$ , wodurch das Messsystem unempfindlich wird gegen direkte Reflexionen der Anregungsquelle in die Infrarotkamera. Zusätzlich wurde ein reflektiver Laserfilter vor die Infrarotkamera gestellt.



**Abb. 2:** Transmissionsanordnung mit Blitzlicht



**Abb. 3:** Reflexionsanordnung mit Laseranregung (Aufsicht)

Bei der Transmissionsanordnung zeigt sich die Schweißlinse während des Wärmeffusses durch die Schweißprobe anhand einer erhöhten Temperatur gegenüber dem umgebenden Material, während bei der Reflexionsanordnung die Schweißlinse durch eine niedrigere Temperatur mit dem umgebenden Probenmaterial kontrastiert.

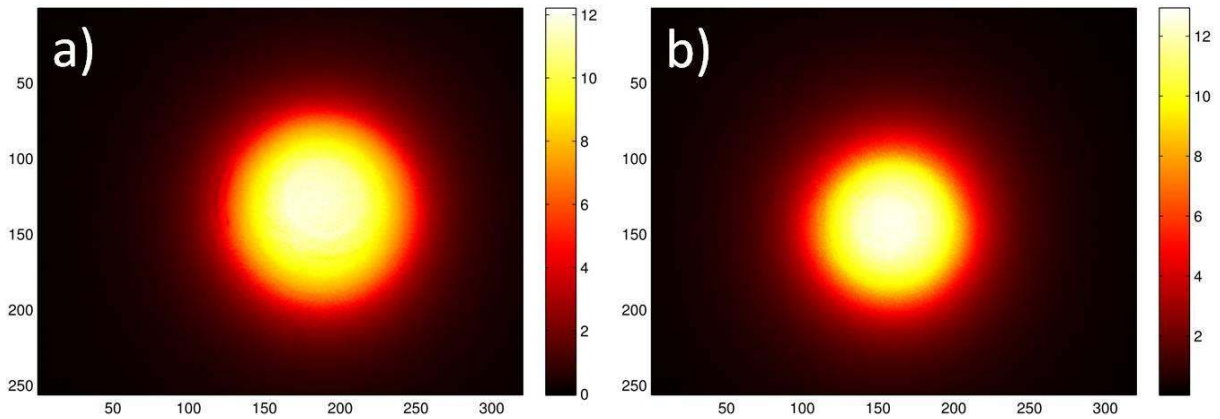
### 3. Ergebnisse

Die aufgenommenen thermografischen Sequenzen nach der thermischen Anregung der Probe wurden stark durch zwei parasitäre Effekte dominiert: Zum einen durch die thermischen Reflexionen der Raumtemperaturumgebung an der Metalloberfläche der Probe, zum anderen durch die variierende Oberflächenemissivität der Probe, die durch Oberflächenkratzer, Verunreinigungen und Verfärbungen verursacht ist. Werden die Probenoberflächen nicht wie in [3] und [4] mit einem Material hoher Emissivität beschichtet, muss ein Verfahren entwickelt werden, diese parasitären Effekte zu kompensieren. Dies wurde durch ein geeignet gewähltes Subtraktions- und Normierungsverfahren erreicht, wodurch es möglich wurde, den Effekt des Wärmeffusses über die Schweißlinse von den parasitären Effekten zu trennen. Durch die Subtraktion des Nullbildes vor der Messung können die Reflexionen der Raumtemperaturumgebung und durch die Normierung auf ein Thermogramm nach der Erwärmung die Emissivitäten kompensiert werden.

#### 3.1 Ergebnisse der Messung in Transmissionsanordnung

Abb. 4 zeigt Ergebnisse der Messung in Transmissionsanordnung mit Laseranregung, bei denen die Oberflächeneffekte bereinigt wurden. Abb. 4 a) und Abb. 4 b) wurden zum selben Zeitpunkt nach der thermischen Laseranregung aufgenommen, wobei Abb. 4 a) eine qualitativ gute Punktschweißung zeigt, die mit hohem Schweißstrom erzeugt wurde, und Abb. 4 b) eine qualitativ schlechte Punktschweißung mit einem niedrigen Schweißstrom zeigt. Es ist deutlich zu sehen, dass die radialsymmetrische thermische Signatur, welche den Wärmeffluss durch die Schweißlinse darstellt, in a) deutlich größer ist als in b).

Das bedeutet, dass hier der thermografische Nachweis erbracht wurde, dass die Schweißlinse der guten Schweißung deutlich größer ist als die Schweißlinse der schlechten Schweißung. Die Fläche der thermischen Signatur, welche ein Maß für die Größe der Schweißlinse darstellt, kann algorithmisch erfasst werden, somit ist diese Messung prinzipiell automatisierbar.

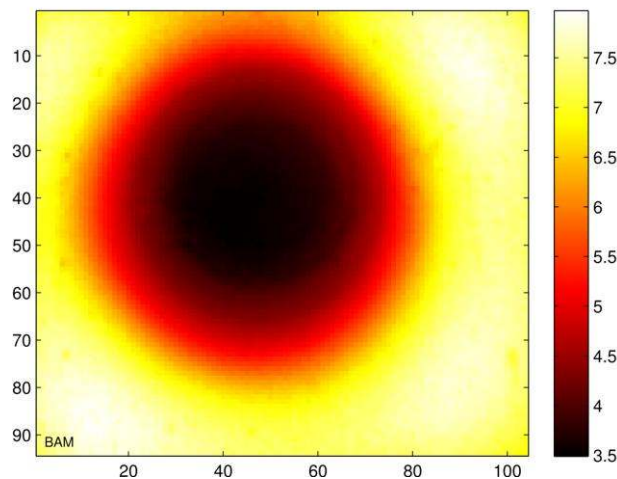


**Abb. 4:** Bereinigte Thermogramme, in Transmissionsanordnung gemessen. a) Gute Schweißung bei hohem Schweißstrom, b) schlechte Schweißung bei niedrigem Schweißstrom.

### 3.2 Ergebnisse der Messung in Reflexionsanordnung

Abb. 5 zeigt das Ergebnis einer Messung in Reflexionsanordnung mit Laseranregung, bei dem die Oberflächeneffekte bereinigt wurden. Hier ist der Wärmefluss durch die Schweißlinse nach der thermischen Anregung anhand der radialsymmetrischen kühleren thermischen Signatur deutlich zu erkennen.

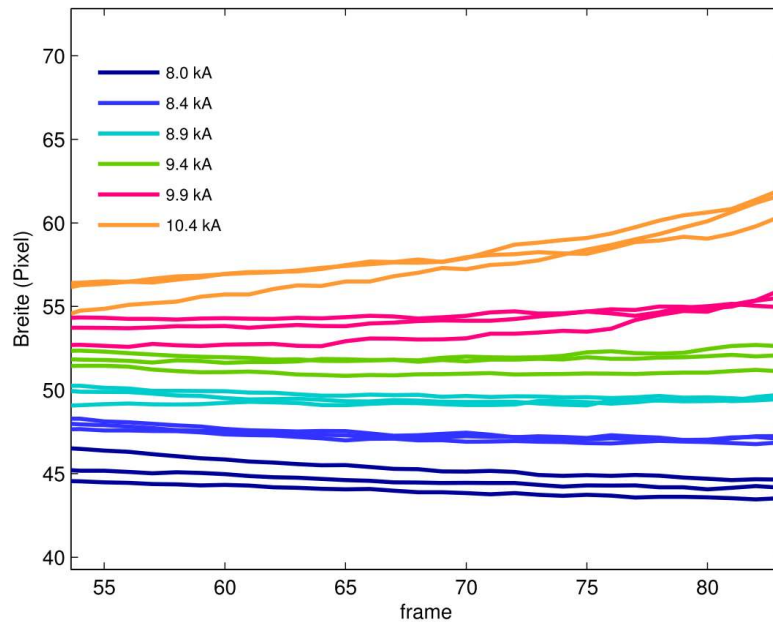
Somit ist hiermit der Nachweis erbracht, dass auch in Reflexionsanordnung mit Laseranregung die Punktschweißung thermografisch nachgewiesen werden kann. Der Vorteil der Reflexionsanordnung liegt darin, dass auch Komponenten überprüft werden können, die nur einseitig zugänglich sind.



**Abb. 5:** Bereinigtes Thermogramm, in Reflexionsanordnung gemessen.

Die Fläche der kühleren thermischen Signatur in Abb. 5 lässt sich algorithmisch auswerten. Abb. 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Durchmesser der thermischen Signaturen, die unter Ausnutzung der Radialität berechnet wurden. Diese Durchmesser sind eine zeitdynamische Größe. Abb. 6 erfasst einen Zeitraum von etwa 0.15 s bis 0.9 s nach Ausschalten der Laseranregung. Jede Kurvenschar einer bestimmten Farbe repräsentiert Punktschweißungen mit demselben Schweißstrom. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Durchmesser mit dem

Schweißstrom zunehmen und dass die Schweißungen verschiedener Schweißströme, also verschiedener Güte, voneinander unterschieden werden können.



**Abb. 6:** Breiten der Punktschweißungen im zeitlichen Verlauf

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse in Abb. 6 zeigen, dass das hier vorgestellte Verfahren einen Ansatzpunkt bietet, um die Güte der Schweißungen automatisch erfassen zu können, wobei nur wenige Schritte zur Kalibrierung des Verfahrens notwendig sind. Dazu sind zerstörende Prüfungen als Referenz und zur Validierung des thermografischen Prüfverfahrens im weiteren Verlauf dieses Projektes geplant.

Nach derzeitigem Stand des Projektes liefert das Verfahren vergleichbar gute Ergebnisse sowohl in Transmissionsanordnung als auch in Reflexionsanordnung, wobei insbesondere für die Reflexionsanordnung die neuartige thermische Anregung mittels Laserstrahlung zusammen mit dem Normierungsverfahren zur Kompensation der variierenden Emissivität erfolgreich demonstriert werden konnte. In der praktischen Anwendung bietet die Reflexionsanordnung den Vorteil der nur einseitig nötigen Zugänglichkeit und besitzt daher ein höheres Anwendungspotential.

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17686 N der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. - FOSTA, Sohnstr. 65, 40237 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.

## Referenzen

- [1] ISO 10447, Widerstandsschweißen – Schäl-, Meißel- und Keilprüfung von Widerstandspunkt- und Buckelschweißverbindungen
- [2] Lockheed Corporation, Adams, M.J., Crisman, E.M., "Method of and apparatus for thermographic evaluation of spot welds", US Patent 4854724, Filing date: 5. March 1986.
- [3] Schlichting, J., Brauser, S., Pepker, L., Maierhofer, C., Rethmeier, M., Kreutzbruck, M. Thermographic testing of spot welds. NDT&E international , 48, 23 ,2012.
- [4] Schlichting, J., "Integrale Verfahren der aktiven Infrarotthermografie", PhD-thesis at BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, May 2012.