

# Thermografische Prüfung von Punktschweißverbindungen

Joachim SCHLICHTING, Henrik STEINFURTH, Christiane MAIERHOFER,  
Marc KREUTZBRUCK

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12200 Berlin,

[Joachim.Schlichting@bam.de](mailto:Joachim.Schlichting@bam.de)

**Kurzfassung.** Vor allem in der Automobilindustrie wird das Widerstandpunktschweißen im großen Umfang zur Verbindung von Blechen im Karosseriebau verwendet. Durch den anhaltenden Trend zum Leichtbau und den immer höheren Anforderungen an die passive Sicherheit kommt es hier zu einem verstärkten Einsatz innovativer hochfester Stähle. Obwohl es sich beim Punktschweißen um ein lange erprobtes Verfahren handelt, das sich anhand der Prozessparameter und regelmäßiger zerstörender Prüfung überwachen lässt, ist durch diese Entwicklung die Suche nach geeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren wieder aktuell. Wegen der hohen Produktionsgeschwindigkeiten in der automatisierten Fertigung muss sich das Prüfverfahren für eine hundertprozentige Prüfung vollautomatisch mit der typischen Taktrate von etwa einem Hertz durchführen lassen.

In dieser Arbeit wird zuerst die prinzipielle Durchführbarkeit der thermografischen Prüfung von Punktschweißverbindungen an speziell präparierten Proben überprüft. Auf dieser Grundlage wird eine Serienuntersuchung an 75 Proben, die sich auf drei Gruppen von Schweißparametern aufteilen und neben optimal geschweißten Proben typische Fehlerbilder repräsentieren, eine Serienuntersuchung gezeigt. Hierzu wird eine Blitzlichtanregung in Transmissionsanordnung verwendet. Es kann gezeigt werden, dass sich mit einer geeigneten Datenaufbereitung die einzelnen Gruppen sicher trennen lassen. Durch eine statistische Bewertung der Ergebnisse kann unter Verwendung eines angepassten Gütekriteriums die Trennschärfe noch deutlich erhöht werden.

## 1 Einführung

Das Widerstandpunktschweißen ist eine Standardtechnik, die bereits 1891 erstmals patentiert wurde. Seit 1909 ist ihr Einsatz beim Fügen von Blechen bekannt und seit 1930 ist der industrielle Einsatz dokumentiert [1,2]. Heute wird sie in vielen Bereichen verwendet, typischerweise zum Fügen von Blechen im Überlappstoß. Das prominenteste Beispiel für die Anwendung ist sicher der Karosseriebau. Hier werden ca. 3.000 bis 5.000 Schweißpunkte pro PKW-Karosserie bei üblichen Taktraten von 1 Hz gesetzt.

Zur Qualitätssicherung kommt hauptsächlich die zerstörende Prüfung zum Einsatz. Besonders wichtig ist hier die sogenannte Werkstattprüfung, die den Schälversuch, den Abrollversuch, die Meißelprobe und die Keilprobe umfasst [3]. All diese Techniken beruhen auf einer gewaltsamen Trennung des Schweißpunktes und anschließender Beurteilung des Bruchbildes. Ein Kriterium hierfür ist, ob die Verbindung an der Grenzfläche zwischen den einzelnen Blechen getrennt wurde, oder ob das Blech um den Schweißpunkt herum gebrochen ist. Außerdem wird der Durchmesser der Schweißlinse bestimmt, der das wichtigste auf diese Weise zugängliche Kriterium für die Festigkeit der Verbindung darstellt [4]. Aufgrund dieser Ergebnisse werden die Prozessparameter

optimiert. Außerdem kommt regelmäßig eine Überwachung der Prozessparameter zum Einsatz [5]. Es sind zudem zerstörungsfreie Prüfverfahren, wie z.B. der Einsatz von Ultraschall, bekannt [6].

Durch den anhaltenden Trend zum Leichtbau und den immer höheren Anforderungen an die passive Sicherheit kommt es im Automobilbau zu einem verstärkten Einsatz innovativer hochfester Stähle. Obwohl es sich beim Punktschweißen um ein lange erprobtes Verfahren handelt, ist durch die Vielfalt der heute verwendeten Werkstoffe und die damit verbundene Notwendigkeit zur Änderung der Prozessparameter die Suche nach einem geeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren wieder aktuell. Als relevantes Qualitätskriterium soll hier ermittelt werden, ob der Durchmesser  $d$  der Schweißlinse und somit die Festigkeit in einem spezifizierten Bereich liegen. Um einen großen Anteil an Fugestellen zu prüfen, ist es wichtig, dass das eingesetzte Verfahren schnell und automatisierbar ist. Daher wird in diesem Beitrag die Entwicklung eines auf Blitzlichtthermografie in Transmissionsanordnung basierenden Verfahrens vorgestellt. Diese Technik wurde zwar bereits 1998 vorgeschlagen, jedoch bis jetzt nicht zur Einsatzreife gebracht [7].

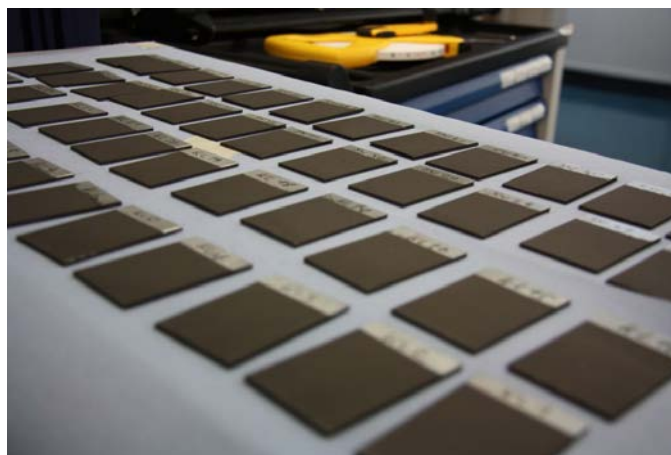
## 2 Proben

Die Proben für sämtliche in diesem Beitrag gezeigten Messungen an Punktschweißverbindungen wurden in der BAM Fachgruppe 5.5 aus verzinktem TRIP-Stahl HCT690T+Z140 hergestellt. Die Blechdicke beträgt  $t = 1$  mm. Zur Präparation der Proben wurde eine X-Zange der Firma Dalex verwendet, die mit einem pneumatischen Krafterzeugungssystem ausgestattet ist.

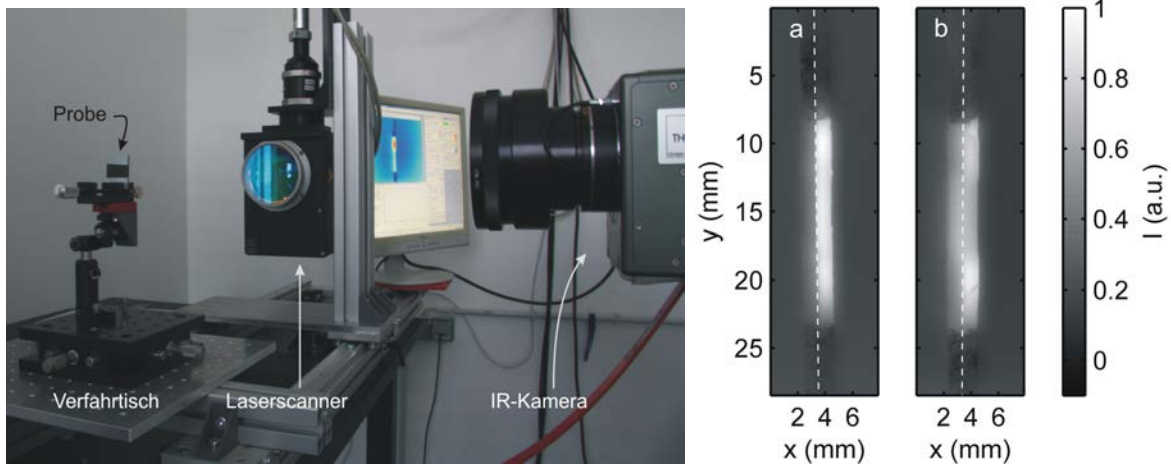
Die hier gezeigten Experimente basieren auf drei Gruppen von Proben. Für die Präparation wurde jeweils eine Vor-, Nachhalte- sowie Schweißzeit von 300 ms bei einer Elektrodenkraft von 4,5 kN gewählt. Der Schweißstrom  $I$  wurde zur Präparation der unterschiedlichen Gruppen folgendermaßen variiert:

- Klebverbindungen:  $I = 7,5$  kA (Probebezeichnung KL: Klebverbindungen)
- Optimale Parameter:  $I = 8,7$  kA (Probebezeichnung 5W:  $d = 5\sqrt{t}$ -Kriterium)
- Spritzergrenze:  $I = 10,7$  kA (Probebezeichnung SP: Spritzer)

Sämtliche Proben wurden beidseitig mit Graphit beschichtet, um die Emissivität und den Absorptionskoeffizienten zu erhöhen. Die für Serienuntersuchungen verwendete Probenreihe 1 besteht aus jeweils 25 Proben pro Gruppe (s. Abb. 1).



**Abbildung 1:** Für die Serienuntersuchung verwendete Probenreihe 1.



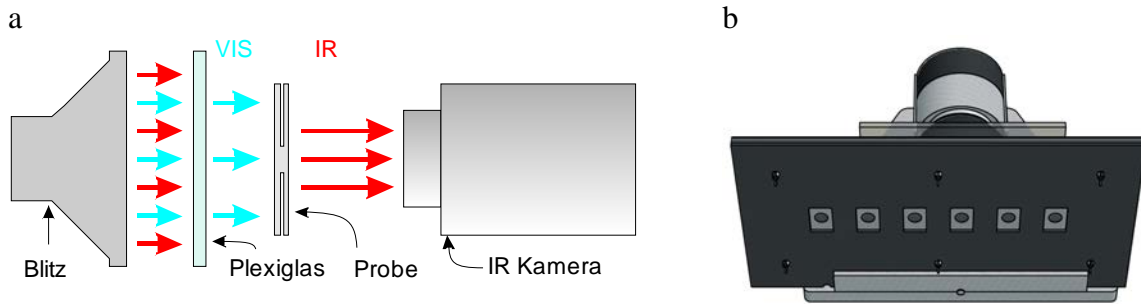
**Abbildung 2:** Links: Für die Voruntersuchungen verwendeter Versuchsaufbau mit Laseranregung. Rechts: Resultierende Temperaturverteilung über die Schweißlinse hinweg nach der Anregung mittels Laser für eine Klebschweißverbindung (a) und eine mit optimalen Parametern geschweißte Probe (b). Die gestrichelten Linien zeigen die Grenzen zwischen den Blechen an. Bei b ist deutlich der geringere horizontale Temperaturgradient im Bereich der Schweißlinse zu erkennen (bei  $y = 16$  mm).

### 3 Voruntersuchung

Voraussetzung für die prinzipielle Machbarkeit einer Charakterisierung von Punktschweißungen mittels Thermografie sind Unterschiede in der Temperaturleitfähigkeit im Bereich der Schweißlinse zwischen mit verschiedenen Parametersätzen geschweißten Proben. Um eine direkte Messung zu realisieren, wurden Querschnitte zweier unterschiedlich hergestellter Proben durch die Schweißlinse hindurch präpariert. Wird nun eine Seite angeregt, kann der Wärmefluss über die Schweißlinse hinweg direkt anhand der Temperaturverteilung an der Schnittfläche beobachtet werden, da nach dem Fourierschen Gesetz der Temperaturgradient von der Temperaturleitfähigkeit abhängt. Die Probe wurde zur Erhöhung der Emissivität mit Graphit beschichtet.

Da es sich als experimentell schwierig erwiesen hat, auf mittels flächiger Anregung nur eine Seite gezielt anzuregen, wurde für die Anregung auf einen Diodenlaser zurückgegriffen, der Dank des definierten geometrischen Strahlprofils gut geeignet ist (siehe Abb. 2, links). Zur Anregung wurde eine Linie parallel und direkt am Rand zur Schnittfläche für 50 ms bei einer Leistung von 50 W projiziert. Diese Messung wurde an Probe A aus der Gruppe der Klebschweißungen (KL) und Probe B, die mit optimalen Parametern (5W) geschweißt wurde, durchgeführt.

Abb. 2 zeigt rechts die resultierenden Temperaturverteilungen für beide Proben. Die Anregung erfolgte jeweils von der rechten Seite aus. Der heller erscheinende innere Bereich von ca.  $y = 8$  mm bis 23 mm kommt dadurch zustande, dass die Proben nur in diesem Bereich mit Graphit beschichtet wurden und daher hier stärker im IR-Bereich abstrahlen. Die gestrichelten Linien zeigen die Grenzen zwischen den einzelnen Blechen an. Es fällt deutlich auf, dass bei Probe b im Bereich der Schweißlinse, also etwa auf halber Höhe in der Abbildung, ein geringerer Temperaturgradient in x-Richtung als bei Probe a auftritt. Die Wärmeleitung ist bei Probe b im Bereich der Schweißlinse also erheblich größer. Daraus lässt sich schließen, dass es prinzipiell mittels aktiver Thermografie möglich ist, diese beiden Arten von Schweißungen zu unterscheiden.



**Abbildung 3:** (a) Skizze der Versuchsanordnung für Transmissionsmessungen an Punktschweißverbindungen. Durch die Plexiglas-(PMMA)-Scheibe wird das durch Erwärmung verursachte Nachleuchten der Blitzlampe im Infraroten (IR) zurückgehalten, so dass nur Strahlung im sichtbaren Bereich des Spektrums (VIS) die Probe erwärmt.

(b) Probenhalterung für Serienuntersuchungen. Es können jeweils 6 Proben gleichzeitig im Rahmen eingespannt werden.

## 4 Serienmessung

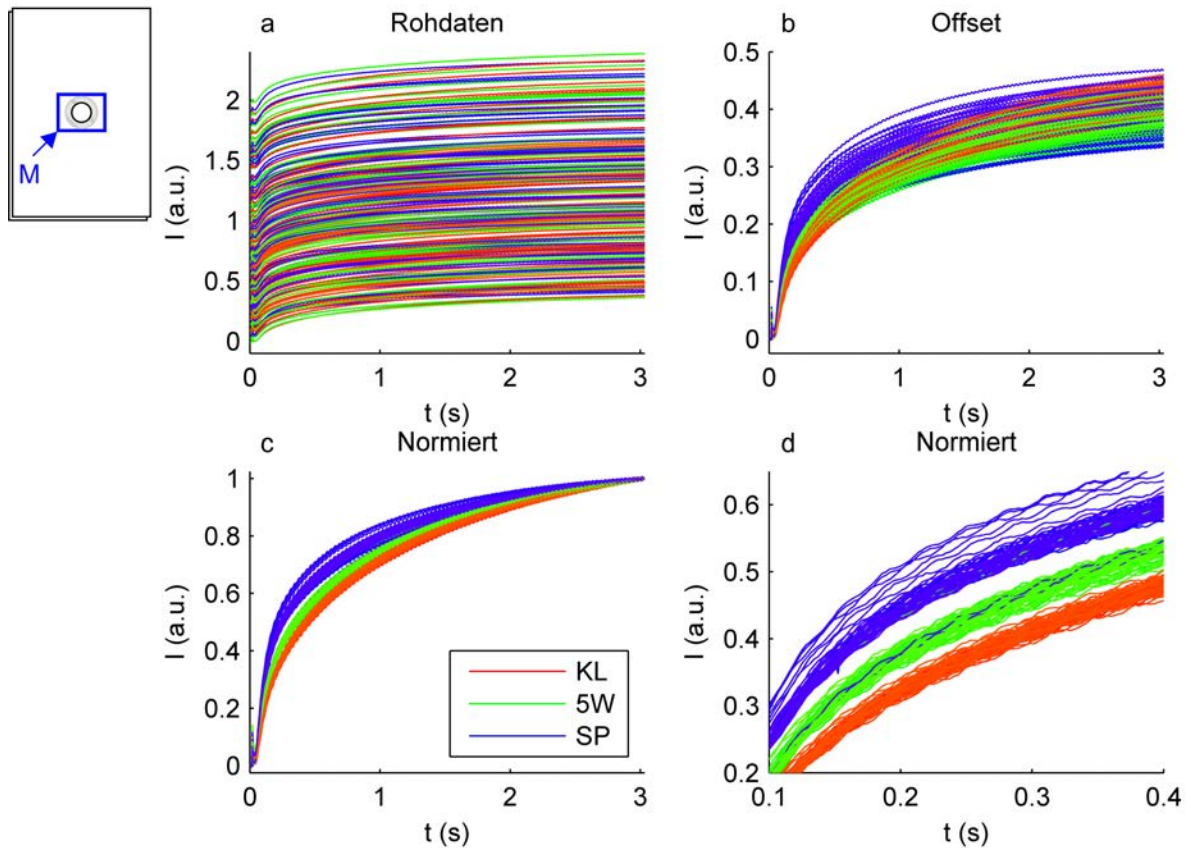
### 4.1 Durchführung

Für die Serienmessung an der Probenreihe 1 kam die in Abb. 3 a skizzierte Versuchsanordnung zum Einsatz. Es konnten dabei jeweils 6 Proben gleichzeitig in einen Rahmen eingespannt werden (siehe Abb. 3 b).

Als Anregungsquelle kam ein Xenon-Blitz mit einseitig 6 kJ Energie pro Puls zum Einsatz. Der hauptsächlich durch die Erwärmung des Blitzes verursachte Infrarotanteil in der Strahlung wurde durch eine Plexiglas-(PMMA)-Scheibe herausgefiltert, um einen zeitlich schärferen Puls zu erreichen. Als Kamera wurde ein InSb-System mit folgenden Parametern eingesetzt:

- 30 mm SMWIR Objektiv
- Integrationszeit 0,625  $\mu$ s
- Subarray-Modus: Auflösung 320 x 248 Pixel bei 329 Hz Bildwiederholrate
- Aufgenommenes Gebiet: 13,2 mm x 10,3 mm
- Vergrößerung 43  $\mu$ m/Pixel
- Aufnahmedauer pro Experiment: 1000 Einzelbilder, entsprechend 3 s

In den Rahmen wurden jeweils zwei Proben pro Probengruppe eingesetzt. Jeder Messdurchlauf wurde dreimal wiederholt, so dass drei Einzelmessungen pro Probe vorliegen. Insgesamt entspricht dies also 225 Einzelmessungen, was eine Datenmenge von 35 GB ergibt.



**Abbildung 4:** Räumlich über den gesamten Messbereich M gemittelte Intensitäten für je 3 Einzelmessungen pro Probe. (a) Rohdaten nach NUC, (b) Mittelwert der ersten 3 Frames als Offset abgezogen. (c) Normierung auf den Mittelwert der letzten drei Frames. Hier zeigen die Gruppen besonders für Zeiten von 0,1 s bis 0,4 s deutlich unterscheidbare Verhalten (d).

#### 4.2 Ergebnisse und Datenaufbereitung

Die Ergebnisse aller 225 Einzelmessungen der Serienmessung sind in Abbildung 4 als räumlich über den gesamten Messbereich M gemittelte Intensitäten in willkürlichen Einheiten dargestellt. Aus den Rohdaten (a) lässt sich kein nach Gruppen getrenntes Verhalten erkennen.

Zur Aufbereitung wurde zuerst als Offset der zeitliche Mittelwert aus den ersten drei Frames von jeder Messung abgezogen (b). Hier trennen sich die Gruppen zu kleinen Zeiten  $< 0,5$  s auf, jedoch entspricht das Verhalten zum Ende der Messung fast den nicht weiter verarbeiteten Daten, es ist also keine Unterscheidung möglich. Bessere Ergebnisse lassen sich durch eine Normierung auf Werte zwischen 0 und 1 für  $t = 0$  s und  $t = 3$  s erreichen. Hierzu wurden die Daten aus (b) jeweils durch den Mittelwert der letzten drei Frames geteilt. Das Ergebnis ist in (c) dargestellt. Hier trennen sich die Gruppen deutlich auf. Besonders zu kleinen Zeiten zwischen 0,1 s und 0,4 s (d) lassen sich die einzelnen Proben trennscharf den jeweiligen Gruppen zuordnen.

Zu beachten ist hierbei, dass es besonders bei der Gruppe der Proben an der Spritzergrenze zu einer stärkeren Streuung kommt und einige Proben ein Verhalten zeigen, das eher denen aus der Gruppe 5W entspricht – also den mit optimalen Parametern geschweißten Proben. Die Ursache hierfür wird in der Probenpräparation vermutet.



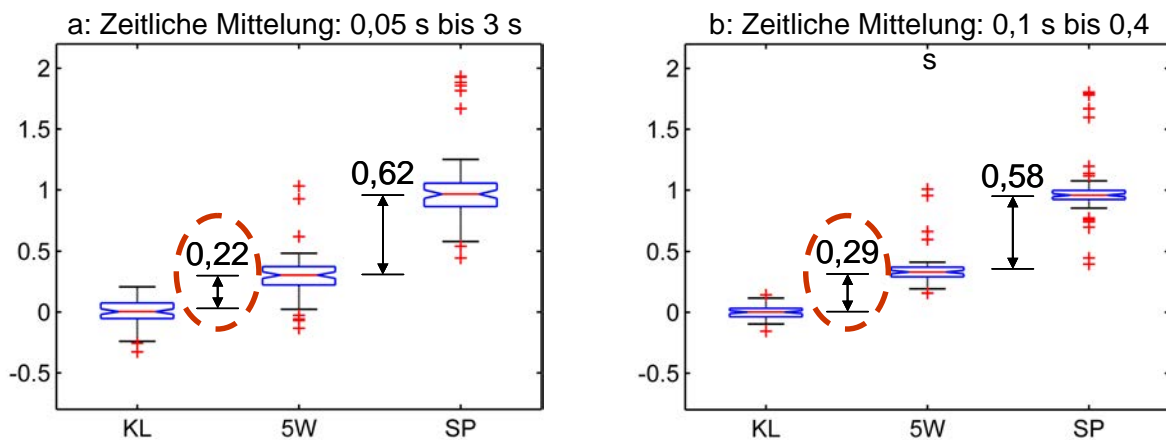
## 5 Statistische Bewertung

Die Ergebnisse aus dem vorherigen Abschnitt sind für eine Klassifizierung der Proben geeignet. Um jedoch insbesondere eine automatisierte Klassifizierung zu ermöglichen, ist es vorteilhaft, eine einzelne Zahl, also einen skalaren Parameter, als Gütekriterium einzuführen. Der naheliegendste Weg hierfür ist es, den zeitlichen Mittelwert der in Abbildung 4 c gezeigten Daten zu bilden.

Um nun eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Kriterien zu ermöglichen, wird eine zweite Normierung vorgenommen. Die Mittelwerte für die Gruppen KL und SP – also Mittelwerte über die Probennummer von zeitlichen und räumlichen Mittelwerten – werden auf 0 (KL) bzw. 1 (SP) normiert. Der Mittelwert für die Gruppe 5W wird entsprechend skaliert. In Abbildung 5 sind diese Werte nun als Boxplot für eine zeitliche Mittelung über die gesamte Messdauer (entsprechend Abb. 4 c) und für einen zwischen 0,1 s und 0,4 s eingeschränkten Zeitbereich (entsprechend Abb. 4 d) dargestellt.

In dieser Darstellungsform zeigen die roten horizontalen Linien jeweils den Median der Werteverteilung in der jeweiligen Gruppe an. Die blauen Kästen, üblicherweise als Box bezeichnet, markieren das untere bzw. obere Quartil, in diesen liegen also die Hälfte der Werte. Hier soll die Definition von J. W. Tukey verwendet werden, nach der Datenpunkte als Ausreißer gelten, die mehr als den 1,5-fachen interquartilen Abstand zur Box haben. Diese sind als rote Kreuze eingezeichnet. Die schwarzen Linien werden als Whisker bezeichnet, sie umfassen sämtliche Werte, die keine Ausreißer sind. So lässt sich auf einen Blick die statistische Verteilung der Daten erfassen.

Um einen quantitativen Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen, wird nun der Abstand berechnet, den die einzelnen Gruppen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% mindestens zueinander haben. Hierzu wurde der auf der Varianzanalyse aufbauende Tukey-Cramer-Test verwendet. Die jeweiligen Werte sind in Abb. 5 eingetragen. Eine ausführliche Beschreibung hierzu findet sich z.B. in [8]. Als Gütekriterium für die Trennschärfe eines Auswertungsverfahrens lässt sich nun der Mindestabstand zwischen zwei Gruppen heranziehen. Dieser beträgt bei der kompletten zeitlichen Mittelung 0,22, bei der eingeschränkten Mittelung 0,29. Die Statistik stimmt also mit dem ersten Anschein überein – eine zeitliche Einschränkung führt zu besseren Ergebnissen.



**Abbildung 5:** Darstellung des zeitlichen Mittelwertes der Daten aus Abbildung 4 a bzw. b als Boxplot, jeweils nach Gruppen getrennt. Die Mittelwerte für KL und SP wurden zur Vergleichbarkeit auf 0 bzw. 1 normiert. Zusätzlich sind die nach [8] berechneten sicheren Abstände zwischen den Mittelwerten eingetragen (siehe Text).

## 6 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Es wurde ein thermografisches Verfahren zur Prüfung von Punktschweißverbindungen vorgestellt. Durch eine Voruntersuchung an durch den Schweißpunkt hindurch im Querschnitt präparierten Proben konnte die prinzipielle Durchführbarkeit gezeigt werden.

Für die Überprüfung der praktischen Durchführbarkeit wurde eine Serienmessung an 75 Proben durchgeführt. Diese wurden mit drei unterschiedlichen Sätzen an Schweißparametern geschweißt, die für Klebverbindungen, für eine optimale Linsengröße und für Proben an der Spritzergrenze eingestellt wurden. Die Prüfung erfolgte mit Blitzanregung in Transmissionsanordnung.

Die resultierenden Messdaten wurden mit einer auf zeitlicher und räumlicher Mittelwertbildung basierenden Analyseprozedur ausgewertet. Die Vorgehensweise ermöglicht eine sichere Zuordnung der Proben zu den einzelnen Probengruppen. Damit steht ein Prüfverfahren zur Verfügung, welches eine schnelle, zuverlässige und berührungslose Prüfung von Punktschweißverbindungen ermöglicht. Das hier vorgestellte Verfahren bietet das Potential, zu einer wichtigen Ergänzung zur zerstörenden Prüfung weiterentwickelt zu werden. Im Gegensatz zu der derzeit kommerziell verfügbaren Ultraschallprüfung von Schweißpunkten ist es deutlich schneller und außerdem nicht auf einen direkten Kontakt zum Werkstück angewiesen, was die Automatisierung vereinfacht.

Als wichtiges Ergebnis soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die Datenauswertung weder eine explizite Zeit- noch Ortsauflösung der Messdaten voraussetzt. Es müssen lediglich Mittelwerte aus räumlich bzw. zeitlich begrenzten Gebieten betrachtet werden. Dies steht im Gegensatz zur üblichen, defektoskopischen Ausrichtung der bildgebenden Thermografie. Daher sehen wir ein großes Einsparpotenzial in der verwendeten Messtechnik, wenn hier angepasste Geräte zum Einsatz kämen.

Als weitere Entwicklungsschritte ist die Übertragung der Ergebnisse auf nicht vorbehandelte Proben sowie eine weitere Verkürzung der Messdauer geplant. Außerdem sollen die Ergebnisse mit der zerstörend ermittelten tatsächlichen Tragfähigkeit der Punktschweißverbindungen korreliert werden.

## Danksagung

Wir sind der Fachgruppe 5.5 der BAM, insbesondere Prof. Dr.-Ing. Rethmeier sowie Herrn Pepke und Herrn Brauser, für die Bereitstellung der Proben und der Beantwortung der vielen Fragen auf dem interessanten Gebiet des Punktschweißens zu besonderem Dank verpflichtet.

## Referenzen

- [1] E. Thomson, Method of electric welding, US-Patent 451,345, April 1891
- [2] A. F. Rietzel, Uniting the component parts of composite sheet metal structure, US-Patent 928,701, Juli 1909
- [3] Merkblatt DVS 2916-1:2009-01
- [4] M. Pouranvari et al., Science and Technology of Welding and Joining 13 (2008) 39-43
- [5] D. W. Dickinson, J. E. Franklin, and A. Stanya. Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical parameter monitoring. Welding Journal, 59(6), 1980.
- [6] A. C Karlo, A. M. Chertov, and R. G Maev. REAL-TIME ULTRASONIC EXPULSION DETECTION AND INDENTATION MEASUREMENT IN RESISTANCE SPOT WELDS. In AIP Conference Proceedings, volume 1211, page 1609, 2010.
- [7] S. M. Shepard, B. B. Chaudhry, R. L. Predmesky, und M. J. Zaluzec, "Pulsed thermographic inspection of spot welds," in *Thermosense XX*, Bd. 3361, S. 320-324, 1998.
- [8] George E. P. Box, Statistics for Experimenters, John Wiley Sons, 1978