

Automatisierte Luftultraschallprüfung im Automobilbau

Nico LEHMANN¹, Sven JÜTTNER²

¹ Porsche Leipzig GmbH, Leipzig

² Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg

Kontakt E-Mail: nico.lehmann@porsche.de

Kurzfassung. Auf dem Weg zur Industrie 4.0 besitzt die Luftultraschalltechnologie ein großes Potential herstellungsbedingte Unregelmäßigkeiten im Karosseriebau auch automatisiert frühzeitig zu detektieren. Die Trendwende zur Elektromobilität wirkt als Katalysator für den Einsatz von Aluminiumlegierungen und FVK-Werkstoffen. Das Zusatzgewicht für die notwendigen Akkumulatoren muss durch intelligenten Leichtbau und Werkstoffsubstitution kompensiert werden. Für die innovativsten Fügeverfahren existiert nicht immer ein zerstörungsfreies Prüfverfahren.

Die manuelle Ultraschallprüfung von thermischen Fügeverbindungen im Fahrzeugkarosseriebau erfordert insbesondere bei steigender Variantenvielfalt einen erhöhten Personal- und Materialaufwand, um sicher zu stellen, dass die Mindestanzahl an Prüfungen in den Qualitätsregelkreisen erfüllt werden kann.

Dieser Artikel stellt die Potentiale und die Ergebnisse zur Technologieerprobung von automatisierter Luftultraschallprüfung vor. Im Fokus der Untersuchungen stehen punktförmige Schweißverbindungen.

Stand der Technik und technische Herausforderungen

Grundsätzlich gelten für die Anwendung der luftgekoppelten Ultraschallprüftechnik physikalische Besonderheiten, welche den flächendeckenden Einsatz zur Werkstoffprüfung bzw. zur Prüfung von Fügeverbindungen im Automobilbau prinzipiell erschweren. Wie bereits in [1] vorgestellt, werden 99,998% der Schalldruckamplitude beim senkrechten Einfall von Luftultraschall durch den Karosseriebaustahl direkt reflektiert. Ein identischer Effekt tritt erneut beim Schallaustritt zwischen den Grenzflächen Metall oder Kunststoff und Luft auf, was dazu führt, dass eine klassische Impuls-Echo-Prüfung mit Luftultraschall bisher zur Werkstoffcharakterisierung keine Anwendung findet. Neben den großen Impedanzunterschieden in den Ausbreitungsmedien Luft, Klebstoffen oder Metallen ist die frequenzabhängige Schallschwächung in Luft ebenfalls eine physikalische Randbedingung, welche das Anwendungsspektrum minimiert.

Erste Lösungsansätze zum automatisierten Einsatz der Luftultraschalltechnik zur Prüfung von FKV-Bauteilen sind bekannt. [2, 3] Im Karosseriebau etablieren sich sukzessive bildgebende Ultraschallprüfverfahren, welche die Auswertung und Dokumentation für das Prüfpersonal erleichtern. Diese Ultraschalltechniken bedingen immer den Einsatz eines Koppelmittels, welches eine vollständige Automatisierung bisher verhindert. Nach dem Ausschleusen der zu prüfenden Baugruppen aus der Produktion, werden die Widerstandspunktschweißungen manuell am Ultraschallprüfplatz geprüft. Als

Qualitätsmerkmal werden in Abhängigkeit von der Prüfhardware die Restwandstärke und/oder der Schweißpunktdurchmesser ausgewertet. Beim Widerstandspunktschweißen von Aluminiumlegierungen errechnet sich mit der minimalen Blechdicke t_{min} der Mindest-Schweißpunktdurchmesser d_{Lmin} nach (1). Durch das Vorhandensein von Klebstoff in der Fügeebene (Punktschweiß-Kleben) reduziert sich die Anforderung an den Schweißpunktdurchmesser und es gilt (2). Beim Widerstandspunktschweißen von Stahlfeinblechen ist das Blechdickenverhältnis (3) entscheidend für die Schweißpunktgröße. Qualifiziertes Prüfpersonal ist in der Lage pro Schicht ca. 800 Widerstandsschweißpunkte manuell mit Kontakt-Ultraschall zu prüfen. [4, 5]

$$d_{Lmin} = 5\sqrt{t_{min}} \quad (1)$$

$$d_{Lmin} = 4\sqrt{t_{min}} \quad (2)$$

$$d_{Lmin} = 3,5\sqrt{0,8t_{min} + 0,2t_{max}} \quad (3)$$

Die Qualitätsbestimmung beim Bolzenschweißen auf Aluminium- oder Stahllegierungen erfolgt zerstörungsfrei durch eine Sichtprüfung. Anschließend findet im letzten Qualitätsregelkreis, nach der zerstörenden Prüfung, die Bewertung von inneren Unregelmäßigkeiten durch eine metallografische Untersuchung statt. Eine weitere zerstörende Prüfung von Bolzenschweißverbindungen stellt die Drehmomentprüfung dar. Nach dem Ausknöpfen des Bolzens aus dem Blech kann der Durchmesser der geschweißten Fläche ermittelt werden. [6] Die Beurteilung der Güte einer Bolzenschweißverbindung unterliegt dem subjektiven Eindruck und der Erfahrung des Prüfers. Bisherige Entwicklungsansätze zur zerstörungsfreien Prüfung von Bolzenschweißverbindungen basieren auf Kontakt-Ultraschall [7, 8] und Automatisierungskonzepte sind nicht bekannt.

Ziel der Untersuchungen ist es, die Luftultraschalltechnik für das zerstörungsfreie Prüfen von Widerstandspunkt- als auch Bolzenschweißverbindungen zu qualifizieren. Nach den positiven Vorversuchen und Korrelationen am Manipulator unter Laborbedingungen werden die Ergebnisse unter Serienbedingungen im Industrieumfeld erprobt und mit der zerstörenden Prüfung validiert. Für den robotergeführten Einsatz sind neben neuer Prüfhardware auch Mess- und Auswertesoftware mit geeigneter Schnittstelle zu entwickeln und zu erproben.

Interaktion von Lambwellen an den Fügeverbindungen

Prinzipiell ist für die Qualifizierung der Luftultraschalltechnologie zwischen zwei potentiellen Prüfanordnungen zu unterscheiden. Die Messung in Transmissionsanordnung bedingt eine beidseitige Zugänglichkeit, ermöglicht aber mit der Aufnahme eines vollflächigen C-Scans die Analyse der transmittierten Signale auch innerhalb der Widerstandsschweißverbindung.

Bei der Prüfung in der V-Anordnung werden gezielt geführte Wellen mittels Luftultraschalltechnik in den verschweißten Platten angeregt und detektiert. Sowohl die Bolzen- als auch die Widerstandspunktschweißverbindungen interagieren mit den geführten Ultraschallwellen. Um die theoretischen Interaktionen wie beispielsweise Beugung, Brechung, Interferenz und Reflektion an den Fügeverbindungen darzustellen und zu untersuchen, wurden vibrometrische Untersuchungen an der Otto-von-Guericke Universität durchgeführt.

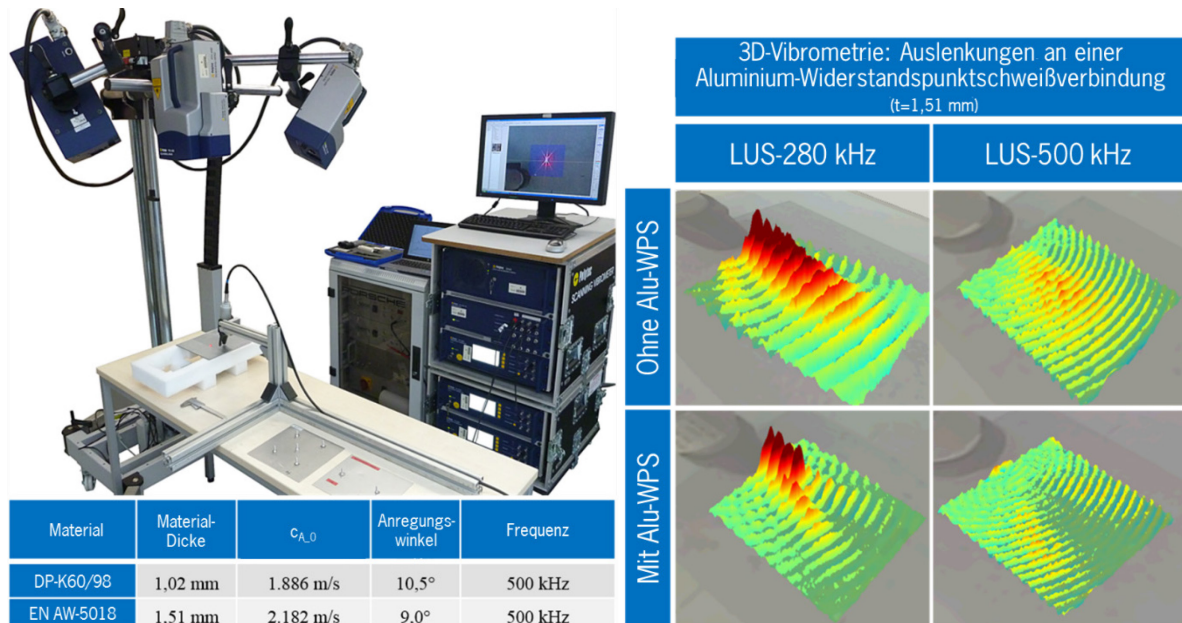


Abbildung 1: Visualisierung der Auslenkungen durch 3D-Vibrometrie

Die elastischen Materialkennwerte Dichte, Poissonzahl und Elastizitätsmodul wurden im Vorfeld zur 3D-Laservibrometrie experimentell ermittelt und validiert. Anhand der numerisch berechneten Dispersionsdiagramme wurden die Phasengeschwindigkeiten der Lambwellen theoretisch berechnet. Wie in Abbildung 1 (links) beispielhaft dargestellt, konnte für die Anregung der antisymmetrischen Lambwelle an einer Aluminiumplatte für eine Frequenz von 500 kHz ein optimaler Anregungswinkel von 9° ermittelt werden. Es gelang mit dem PSV-500-3D (Fa. Polytec) die out-of-Plane Verschiebung der antisymmetrischen Lambwellen zu visualisieren und die theoretischen Wellenlängen im Experiment zu bestätigen. Die in-Plane Komponenten der symmetrischen Lambwellen konnten bei den Experimenten sowohl bei Aluminium- als auch bei Stahllegierungen bis 2,5 mm nicht durch die 3D-Laservibrometrie detektiert werden.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wird die einseitige Luftultraschallprüfung durch antisymmetrische Lambwellen für Bolzen- und Punktschweißverbindungen intensiver verfolgt. An den punktförmigen Schweißverbindungen findet eine kreisförmige Blechaufdickung statt, welcher einerseits eine Grenzfläche darstellt und zu einer teilweisen Reflektion der Lambwellen führt. (Abbildung 1, rechts) Andererseits kommt es aufgrund des Dickensprungs in der Schweißung zu einer punktuellen Geschwindigkeitszunahme und dadurch zu einem Phasensprung. Durch die Verbindung beider Fügepartner breitet sich die Lambwelle auch im zweiten Blech ausgehend von der Schweißung abgeschwächt aus. Interferenz- und Beugungsmuster konnten ebenfalls visualisiert werden, liefern jedoch zum aktuellen Zeitpunkt keine auswertbaren Merkmale zur Vorhersage der Güte der Schweißverbindung.

Experimentelle Untersuchungen

Zu Beginn der Untersuchungen stand eine dreikanalige, stationäre Luftultraschallanlage (Fa. Inoson GmbH, Saarbrücken) in Kombination mit einem konventionellen Manipulator zur Verfügung. (Abbildung 2, links) Für die Korrelationen der Luftultraschallmessungen wurden verschiedene bildgebende Kontakt-Ultraschallprüfsysteme herangezogen. Der Resistance Spot Weld Analyzer (RSWA) von Tessonics ist ein Ultraschallprüfgerät mit einem mehrkanaligen Matrix-Array-Prüfkopf, fester Vorlaufstrecke und einer Prüffrequenz von

15 MHz. [9] Der Miniscanner von Amsterdam Technologies nutzt ebenfalls die Impuls-Echo-Technik, basiert aber auf einer rotierenden Scaneinheit und hat eine laterale Auflösung von 0,1 mm. [10] Weiterhin wurden die Schweißproben mit den Micro-Computertomografie (Fa. Microvista, Burgwedel) auf innere Unregelmäßigkeiten untersucht. Für die Korrelationen wurden auch hochaufgelöste C-Bilder (20 MHz, Auflösung 20 $\mu\text{m}/\text{px}$) herangezogen, welche mittels akustischer Mikroskopie (SAM, Fa. PVA TePla) in Tauchtechnik aufgenommen wurden. Durch die SAM-Messungen gelang es die stoffschlüssige Verbindungsfläche sowohl bei Punkt- als auch bei Bolzenschweißverbindungen zu charakterisieren. [11]

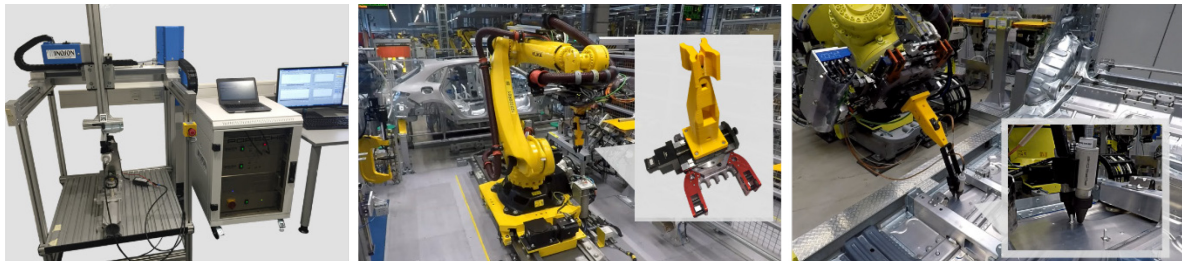


Abbildung 2: ZfP von Widerstandspunkt- und Bolzenschweißverbindungen am Manipulator und am Industrieroboter

Wie in Abbildung 2 (mittig und rechts) dargestellt, wird in Kooperation mit der Firma Inoson GmbH eine kompakte Luftultraschallanlage für den robotergeführten Serieneinsatz entwickelt, installiert und erprobt. Alle Hardwarekomponenten sind für den Dauerbetrieb im Karosseriebau dimensioniert und zur Montage auf der dritten Achse des Industrieroboters geeignet. Im Vergleich zur Labortechnik, konnte eine kompakte, stoßfeste Bauform realisiert werden, indem die Signalanregung/ -detektion und die Auswerteeinheit separiert wurden.

Um mögliche Positionsschwankungen aus den Fügeprozessen ausgleichen zu können, wird zusätzlich eine Industriekamera integriert, welche über eine Schnittstelle zum Roboter eine selbstständige Verschiebung der Prüfkopfhalterung ermöglicht, sodass sichergestellt wird, dass die Luftultraschall-Prüffahrt immer durch den Mittelpunkt des Schweißpunktes verläuft. Zukünftig soll durch zusätzliche Lasersensoren eine automatische Entfernungskorrektur der Luftultraschallwandler möglich sein.

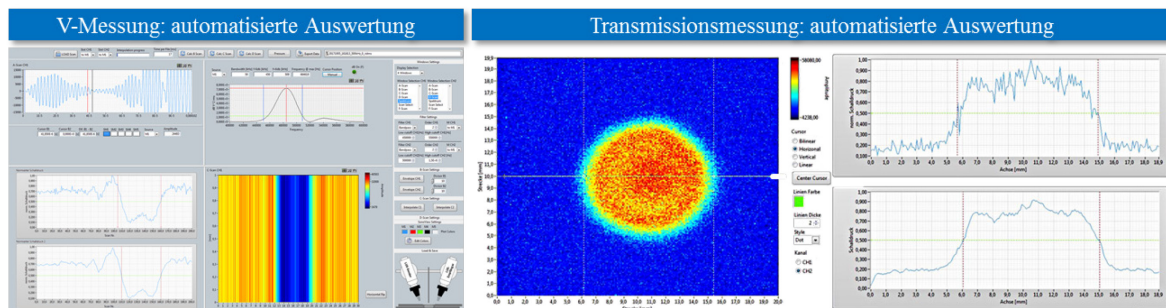


Abbildung 3: Automatisierte Auswertung der Luftultraschallmessungen

Bei der Messung in V-Anordnung beginnt die Prüffahrt außerhalb des verschweißten Bereichs. Um die Schwankungen des Roboters während einer Prüffahrt auszugleichen, werden die Messungen durch einen zusätzlichen Lineareinheit durchgeführt. Die detektierten leaky-Waves werden durch den entwickelten Auswertalgorithmus normiert und geglättet dargestellt und die geometrische Dimensionierung des verschweißten Bereichs findet unter Anwendung der Halbwertsmethodik (-6 dB) statt. Ein vollständiger Transmissionsscans und eine Auswertung des farblich codierten C-Bildes, wie in Abbildung 3 (rechts) dargestellt, erfordert einen größeren Zeitaufwand, welcher im Rahmen einer taktgebundenen Serienproduktion meist nicht gegeben ist. Durch eine orthogonale Kreuzfahrt über den Mittelpunkt des Widerstandsschweißpunktes ist dennoch ein Transmissionsscans in einer

Messzeit von ca. 15 s möglich. Eine Herausforderung bietet die Prüfung von höchstfesten Stahlfeinblechen, da das Signal-zu-Rausch Verhältnis schlecht ausgeprägt ist. Mit Hilfe einer Mittelwertbildung an den einzelnen Messpunkten konnte eine deutliche Verbesserung insbesondere für Transmissionsmessungen erzielt werden.

Korrelation der Messergebnisse

Ziel der nachfolgenden Korrelationsuntersuchungen ist es, den durch Luftultraschalltechnik gemessenen Schweißpunktdurchmesser und die stoffschlüssige Verbindungsfläche von Schweißbolzen mit den Ergebnissen anderer ZfP-Verfahren gegenüber zu stellen.

Beispielhaft für den durchgeführten Technologievergleich stellt die Abbildung 4 die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung von Widerstandsschweißpunkten an Aluminium- und Stahllegierungen dar. Bei der Herstellung aller Prüfkörper wurden die Schweißparameter variiert, um unterschiedliche Schweißpunktdurchmesser zu erreichen.

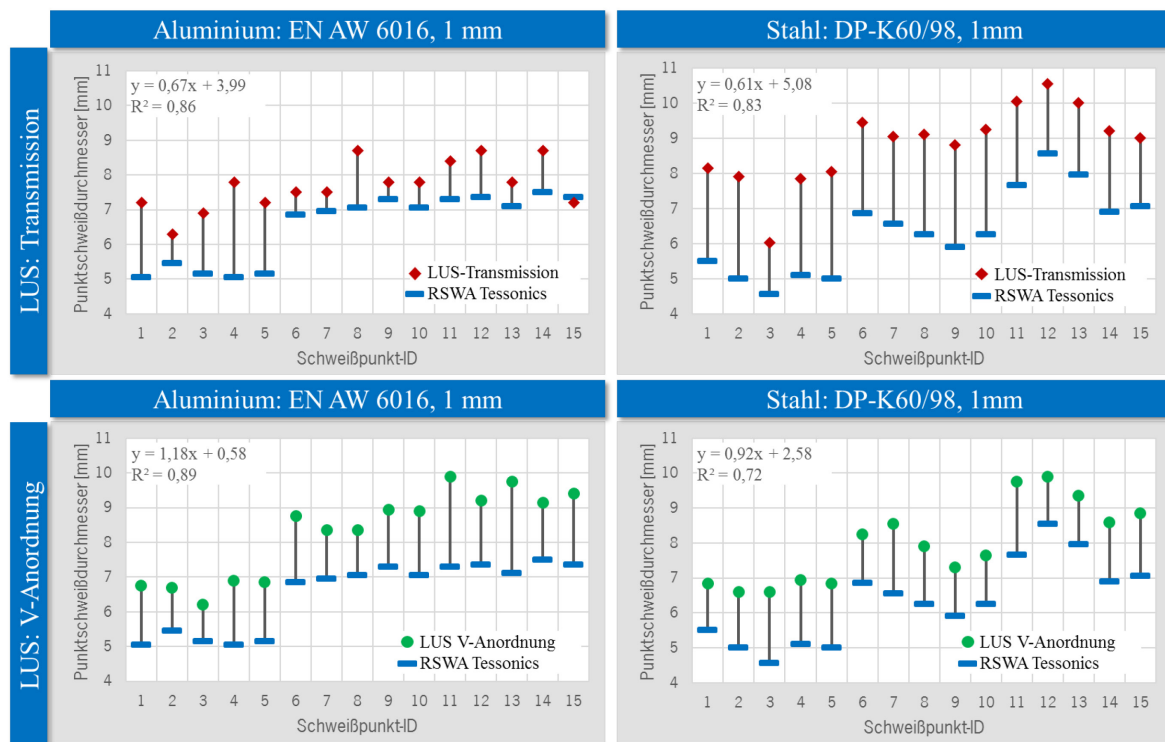


Abbildung 4: Ergebniskorrelation zwischen automatisierter Luftultraschallprüfung und manueller Prüfung mit dem RSWA

Das Bestimmtheitsmaß R^2 gilt als Gütewert für die lineare Regression und beschreibt den prozentualen Zusammenhang zwischen den gemessenen Punktdurchmessern und der entstehenden Regressionsgeraden. Die Abbildung 4 vergleicht die Luftultraschallauswertungen mit den Messergebnissen des Matrixprüfsystems RSWA von Tessonics. Die Luftultraschalltechnik liefert bei Aluminiumschweißpunkten sowohl in Transmissions- als auch bei einseitiger Messung in V-Anordnung eine sehr gute Übereinstimmung bezugnehmend auf die Ergebnisse des RSWA.

Allgemein ist festzustellen, dass die Luftultraschallmessungen einen zu großen Schweißpunktdurchmesser ausgeben. Diese Effekte konnten auch in den durchgeführten EFIT-Simulationen beobachtet und nachgewiesen werden. Den entscheidenden Einfluss hat der Elektrodeneindruck bzw. die entstehende Schweißwulst auf der Oberfläche der Schweißverbindung. Einflüsse wie Interferenzen, Streuungen und Beugungen führen dazu, dass die Grenze zwischen verschweißten und nicht verschweißten Bereich je nach

Blechdickenkombination zu groß ausgewertet wird. Durch eine zusätzliche, materialabhängige Offseteinstellung lassen sich diese Effekte reduzieren.

Bei den Luftultraschallmessungen der punktförmigen Stahlschweißverbindungen korrelieren die ausgewerteten C-Bilder der Transmissionsergebnisse besser mit den RSWA-Ergebnissen im Vergleich zum Prüfen mit geführten Wellen in der V-Anordnung.

Für alle Transmissionsmessungen konnte festgestellt werden, dass die unfokussierten 780 kHz-Luftultraschallwandler mit Schallführungstrichter die besten Ergebnisse in Korrelation mit der Metallografie lieferten. Generell ist das Signal-zu-Rausch Verhältnis bei der Luftultraschallprüfung von Fügeverbindungen bei Aluminium- besser als bei Stahllegierungen. Die 780 kHz-Wandler besitzen eine sehr hohe Winkelsensitivität, es muss also anlagentechnisch immer eine exakt senkrechte Einschallung bzw. Detektion gewährleistet sein.

Zukünftig werden aufgrund der Zugänglichkeitsbegrenzungen in der Fahrzeugkarosserie und aufgrund der geringeren Messzeit die einseitigen Messungen in der V-Anordnung weiter betrachtet. Für den vollständigen Automatikbetrieb stehen aktuell Fragestellungen bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit, Erdung, Abschirmungen der Mess- und Steuerleitungen im Fokus der Untersuchungen. Um eine möglichst große Flexibilität bei den Prüfaufgaben zu erhalten, ist es notwendig, die Prüfkopfhaltungen automatisiert in verschiedenen Ebenen justieren zu können. Dabei ist es wichtig, verschiedene Anrege- und Empfangswinkel einstellen zu können, um damit das Prüfen von Fügeverbindungen auf gekrümmten Oberflächen sicher zu stellen.

Eine einseitige, automatisierte Prüfung von Bolzen- und Punktschweißverbindungen durch luftgekoppelten Ultraschall substituiert nicht die metallografische Bewertung nach der zerstörenden Prüfung, denn innere Unregelmäßigkeiten wie Poren, Lunker oder Ringschweißungen lassen sich bedingt durch die beschriebene Prüf- und Auswertemethodik nicht detektieren.

Referenzen

- [1] Lehmann, N.; Tegtmeier, A.; Jüttner, S.: Automatisierte Luftultraschallprüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen im Karosseriebau, in DGZfP-Jahrestagung 2017.
- [2] Schuller, J.; Oster, R.: Luftultraschallprüfung in der Luftfahrt, in DACH-Jahrestagung 2012.
- [3] Adebahr, W.; Kreutzbruck, M.: Luftultraschallprüfung mit einseitigem Zugang für FKV-Bauteile mit hohem Komplexitätsgrad, in Seminar des FA Ultraschallprüfung 2015.
- [4] VW 01105-1: Widerstandspunktschweißen: Unbeschichtete und beschichtete Stahlbleche. Volkswagen AG, 2014.
- [5] VW 01105-2: Widerstandspunktschweißen: Aluminium und Aluminiumlegierungen. Volkswagen AG, 2015.
- [6] PV 1606: Bolzenschweißen: Beurteilen der Schweißverbindungen. Volkswagen AG, 2010.
- [7] Zwoch, S.; Reimche, W.; Klotz, J.; Bach, F. W.: Entwicklung einer Ultraschallprüftechnik zur Qualitätsbewertung von Bolzenschweißverbindungen, in DGZfP-Jahrestagung 2009.
- [8] Müller, F.; Vincon, S.; Berroth, H.; Jakobi, H.; Seyboldt, D.; Krauter, H.; Harsch, K., *DE102014014218 A1*.

- [9] Denisov, A. A.; Maev, R. G.; Shakarji, C. M.; Lawford, B. B.: Spot Weld Analysis With 2D Ultrasonic Arrays, in Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Aufl.109
- [10] Amsterdam Technology: MiniScanner: Mobiles Scannendes Ultraschallprüfsystem, http://amstech.de/pdf/Flyer_spotwelds_may2011.pdf
- [11] Hipp, R.; Gommlich, A.; Grossmann, C.; Schubert, F.: Hochaufgelöste Ultraschallprüfung an Widerstandspunktschweißverbindungen, in DGZfP-Jahrestagung 2013.