ÖGS
Österreichische
Gesellschaft für
Schweißtechnik

Laser-Ultraschall für Laserstrahlschweißnähte

■ N. Huber, E. Scherleitner, RECENDT Research Center for Non-Destructive Testing GmbH
T. Aumüller, T. Forstner, BMW Group

Laser-Ultraschall ist eine Methode zur zerstörungsfreien Materialprüfung ähnlich zu konventionellen Ultraschallsystemen, jedoch mit wesentlichen Vorteilen für bestimmte Anwendungsfälle und zur Automatisierbarkeit. Sowohl die Erzeugung als auch die Detektion von Ultraschall erfolgen laserbasiert und somit völlig berührungslos. In diesem Artikel sollen die Möglichkeiten von Laser-Ultraschall zur Prüfung von Laserstrahlschweißnähten gezeigt werden. Die präsentierten Ergebnisse stammen aus einer gemeinsamen Forschungsarbeit der BMW Group in München und der RECENDT GmbH in Linz.

Einleitung

Die zunehmende Vielfalt im Produktportfolio erfordert eine flexible, integrierte und kontinuierliche Qualitätssicherung. Es werden nicht nur Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, sondern auch mit verschiedenen Elektroantriebssystemen und Plug-in Hybridsystemen produziert. Dafür muss die Karosserie an das entsprechende Gesamtprodukt angepasst werden, was bedeutet, dass es für eine Baureihe verschiedene Karosserie-Varianten gibt. Jede Variante muss entsprechend der Normen, Standards und Vorgaben abgesichert werden. Dabei entstehen im Rahmen von Produktauditprüfungen und manuellen, serienbegleitenden Prüfungen sowohl hoher Prüf- und Zeitaufwand als auch Recyclingaufwand. Um dies zu reduzieren, wird der Ansatz verfolgt, innerhalb einer automatisierten, integrierten Anlage, geforderte Qualitätsmerkmale zerstörungsfrei zu prüfen. Ziel ist es, so die aktuellen Produktionskosten zu reduzieren. In den durchgeführten Analysen dieser Studie hat sich Laser-Ultraschall als geeignete, zerstörungsfreie und automatisierbare Prüfmethode herausgestellt, wie im Folgenden an einer Reihe von Messergebnissen gezeigt wird.

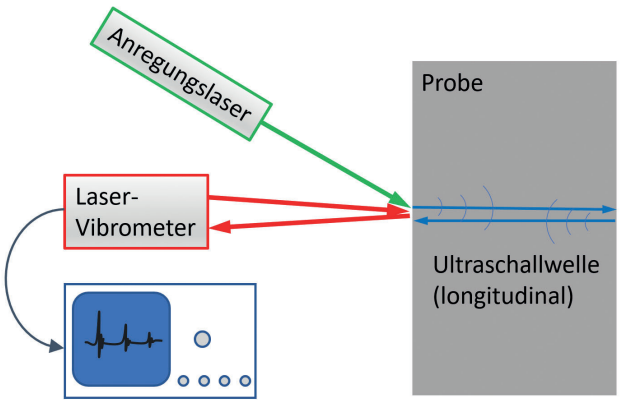

Abbildung 1: Grundprinzip von LUS (Reflexionsmessung)

Grundlagen von Laser-Ultraschall (LUS)

Die klassische Ultraschallprüfung ist ein Standardverfahren in der zerstörungsfreien Material- und Verbindungsprüfung. Dabei wird ein piezoelektrischer Schallwandler mit Hilfe eines Koppelmediums mit einer Oberfläche in Kontakt gebracht und eine Ultraschallwelle in das zu prüfende Objekt eingekoppelt. Diese Ultraschallwellen werden an Grenzflächen mit unterschiedlicher Wellenimpedanz teilweise oder ganz reflektiert oder gestreut. Die zur Oberfläche zurückkehrenden Echos werden typischerweise mit demselben Messkopf detektiert. Aus den Amplituden und der Laufzeiten der Echos kann auf die innere Materialbeschaffenheit und mögliche Fehlstellen geschlossen werden.

Bei Laser-Ultraschall erfolgt die Prüfung ebenfalls durch eine Ultraschallwelle. Diese wird allerdings durch kurze, hochenergetische Laserpulse erzeugt. Die Dauer eines Laserpulses liegt dabei meist in der Größenordnung von etwa 10 ns. Er bewirkt eine starke Erwärmung und damit Ausdehnung an der Oberfläche oder trägt sogar einige 100 Nanometer (je nach Energie und Material) ab. Bei dieser Art des Materialabtrages mit Plasmabildung spricht man von Ablation. Durch die kurze Ausdehnung oder den explosionsartigen Rückstoß des abgetragenen Materials wird eine longitudinale Ultraschallwelle sehr hoher Bandbreite (bis einige 10 MHz) im Material erzeugt[1].

Die Ausbreitung, Reflexion und Streuung dieser Ultraschallwelle erfolgt gleich wie beim konventionellen Ultraschall mit dem positiven Effekt, dass die spektrale Bandbreite durch den kurzen Anregungspuls sehr hoch ist.

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Longitudinalwellen werden abhängig von Fokussierung und Laserenergie auch Transversal- und Plattenwellen erzeugt, die hier allerdings nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden und in dieser Studie nicht zur Auswertung herangezogen wurden.

Die Detektion der Echos erfolgt bei LUS durch einen zweiten Laser in Kombination mit einem Vibrometer. Dabei wird die Oberfläche beleuchtet und die feinsten Bewegungen der Oberfläche in ein elektrisches Signal zur Auswertung umgewandelt.

Der grundsätzliche Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Bei den hier durchgeführten Messungen handelt es sich um sogenannte Reflexionsmessungen, bei denen Anregung und Detektion an der selben Position erfolgen. Dies ist bei LUS jedoch nicht zwingend erforderlich – je nach Art der Messaufgabe kann Anregung und Detektion auch an verschiedenen Positionen erfolgen, z.B. an gegenüberliegenden Seiten der Probe – hier spricht man dann von einer Transmissionsmessung.

[1] https://www.rp-photonics.com/time_bandwidth_product.html

Autorenexemplar aus der Fachzeitschrift "Schweiß- und Prüftechnik" www.oegs.org

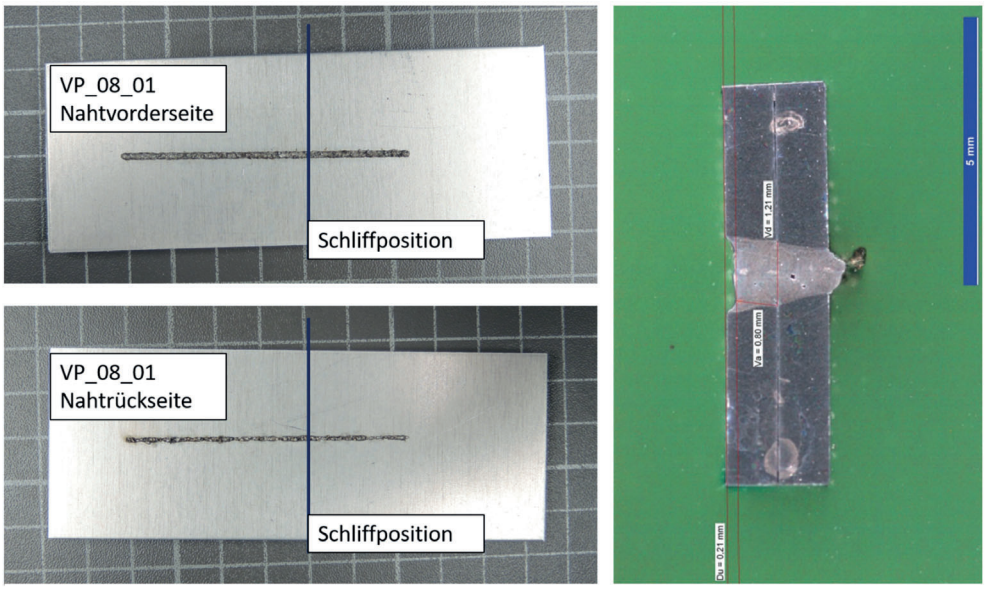

Abbildung 2: Fotos einer Probe (links) und Schliffbild der Schweißnaht (rechts)

Da sowohl Anregung als auch Detektion mittels Licht funktionieren, ist das Verfahren berührungslos und es wird kein Koppelmittel benötigt. Daher kann LUS auch z.B. auf sehr heißen oder sehr unregelmäßigen Oberflächen eingesetzt werden, oder aber auch auf Oberflächen die durch ein Koppelmedium nicht kontaminiert werden dürfen.
Bei dem hier verwendeten Verfahren wird immer nur an einem einzelnen Punkt an einer Oberfläche vermessen. Ein Bild der gesamten Schweißnaht erhält man, indem die Oberfläche rasch mit vielen Einzelpunkten abgescannt wird.

Untersuchte Schweißproben

In dieser Studie wurden Verbindungen zwischen zwei Fügepartnern aus Aluminium-Blechwerkstoffen untersucht.
Das Schweißsystem zur Herstellung der Probekörper zur späteren zerstörungsfreien Untersuchung bestand aus einem Nd-YAG Faserlaser, einem Lichtleitkabel und einer Schweißoptik. Die Positionierung der Schweißoptik über den Fügepartnern erfolgte durch einen 6-Achs-Knickarmroboter. Der Probekörper wurde in einer feststehenden Vorrichtung reproduzierbar positioniert. Die Spannvorrichtung besaß zudem die Möglichkeit gezielt Spalte zwischen den Fügepartnern einzustellen (Abbildung 2).

Zur Herstellung der Aluminiumproben wurde der Blechwerkstoff EN AW 5182-O verwendet. Dieser wurde mit einer Remote-Schweißoptik und einem Laserstrahldurchmesser von 300 µm zu einer artgleichen Verbindung in Überlapp-Nahtausführung in PA Position gefügt. Die Zuordnung der Probekörper zu den Schweißparametern ist in Tabelle 1 zu finden.

Referenzverfahren: Computertomografie und Schliffbilder

Als eine Variante der Verifizierung der mit LUS erhaltenen Ergebnisse eignet sich die industrielle Computertomografie (CT). Hierbei handelt es sich um ein bildgebendes Verfah-

Versuch-Nr.	Oberblech		Unterblech		Nahtlänge [mm]	Leistung [kW]	Schweiß-geschwindigkeit [m/min]	Defokus [mm]	Spalt [mm]	Kommentar
	Legierung	Dicke [mm]	Legierung	Dicke [mm]						
VP_08	EN AW 5182-O	1,2	EN AW 5182-O	1,2	60	3100	6	-13	0	Referenzparametersatz
VP_09	EN AW 5182-O	1,2	EN AW 5182-O	1,2	60	2600	6	-13	0	abnehmende Verbindungsbreite / Einschweißtiefe durch Leistungsverlust
VP_10	EN AW 5182-O	1,2	EN AW 5182-O	1,2	60	3100 bis 2600	6	-13	0	abnehmende Verbindungsbreite / Einschweißtiefe durch Leistungsverlust
VP_12	EN AW 5182-O	1,2	EN AW 5182-O	1,2	60	3100	6	-18	0	abnehmende Verbindungsbreite / Einschweißtiefe durch Fokusvariation
VP_13	EN AW 5182-O	1,2	EN AW 5182-O	1,2	60	3100	6	0 bis - 18	0	abnehmende Verbindungsbreite / Einschweißtiefe durch Fokusvariation

Tabelle 1: Schweißparameter für die Probenherstellung

Autorenexemplar aus der Fachzeitschrift "Schweiß- und Prüftechnik" www.oegs.org

ren in der Radiologie. Die Bauteile wurden durchstrahlt und mithilfe der aufgenommenen Röntgenprojektionen und entsprechender Software numerisch rekonstruiert. Die Erzeugung des Volumenmodells – in diesem Fall das Modell einer einzelnen, gescannten Laserstrahlschweißnaht – ermöglicht dann eine Visualisierung und Prüfung von Fehlern und Materialeigenschaften an der gewünschten Position im Volumen. Die Laserstrahlschweißnähte wurden mit einer phoenix v|tome|x L300 Anlage, d.h. eine 300kV Röhre mit Highflux Target und einem 4K Detektor, gescannt. Die Auflösung richtet sich u.a. nach der Größe des zu untersuchenden Bauteils, weshalb die Proben bestmöglich auf die Laserstrahlschweißnähte zugeschnitten wurden. So konnte mit einer Auflösung zwischen 16 und 26µm gescannt werden. Die Dauer eines CT-Scans beträgt mit den gewählten Einstellungen etwa eine Stunde.

LUS-Messsystem:

Die Ultraschallanregung erfolgte beim verwendeten Aufbau durch einen gütegeschalteten (Q-switched), Nd:YAG Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 532 nm und einer Pulslänge von ca. 5 – 8 ns. Die Laserstrahlung des Anregungslasers wurde mit einer Linse auf die Oberfläche der Probe fokussiert (Spotdurchmesser ca. 1 mm).

Die Detektion der Schwingungen der Probenoberfläche durch die reflektierten Ultraschallwellen erfolgte mittels eines Tecnar Laser-Vibrometers bestehend aus einem Langpulslaser (Pulslänge ca. 100 µs) und einem sogenannten TwoWaveMixing-Interferometer. Die Spots für Anregung und Detektion wurden bei der vorgenommen Reflexionsmessung auf dieselbe Stelle fokussiert. Die Aufnahme der elektrischen Signale erfolgt mittels Oszilloskop und geeigneter Steuersoftware am PC. Anregung und Detektion sind miteinander synchronisiert und laufen mit einer Wiederholfrequenz von 100 Hz.

Die Proben wurden vor der Messung nicht bearbeitet, d.h., es wurde direkt auf der Oberraupe der Schweißnaht gemessen. Die Proben wurden auf einer zweidimensionalen Positioniereinheit (x-y-Stage) eingespannt und während

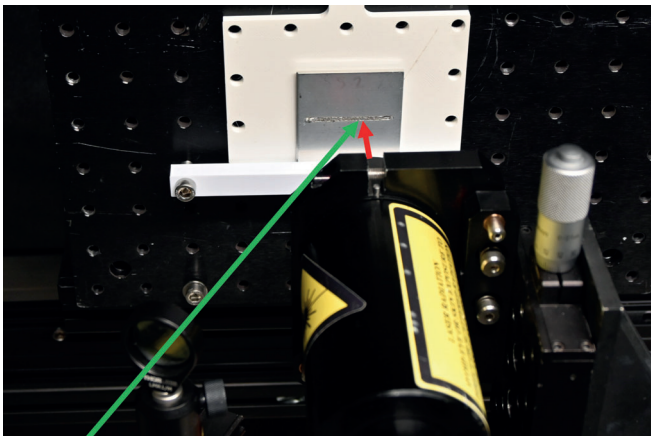

Abbildung 3: Laboraufbau des LUS-Systems zur Schweißnahtprüfung (GRÜN Anregung, ROT Detektion)

der Messung gleichmäßig bewegt, um den Bereich von 70x15 mm entlang der Schweißnaht abzuscannen. Die Geschwindigkeit in X-Richtung betrug 20 mm/s, woraus sich ein Messpunkteabstand von 0,2 mm ergibt, gleich wie in Y-Richtung. Für die Messung einer Linie (B-Scan, s.u.) werden somit 3,5 Sekunden benötigt. Der Scan des gesamten Bereiches in dieser Auflösung dauert ca. 5 Minuten. Durch eine Verkleinerung des zu scannenden Bereiches auf die Schweißnaht, ist eine weitere Verkürzung der Messzeit möglich.

In Abbildung 3 ist der Laboraufbau des verwendeten LUS-Systems mit entsprechendem Strahlengang für die Laseranregung (grün) und die Detektion (rot) dargestellt.

LUS-Ergebnisse im Vergleich zu Referenzmessungen

Abbildung 4 zeigt den zeitlichen Verlauf des Signals an einem Messpunkt, welcher als A-Scan bezeichnet wird. In diesem Fall handelt es sich um einen Bereich in der Mitte der Schweißnaht.

Der starke Ausschlag ab ca. 330 ns rührt von der Bewegung der Oberfläche bei der Erzeugung des Ultraschallpulses bzw. vom optischen Übersprechen des Anregungslasers auf die Detektionseinheit her. Die Verzögerung (ca. 330ns) ist durch die Triggerung des Systems bedingt und muss bei

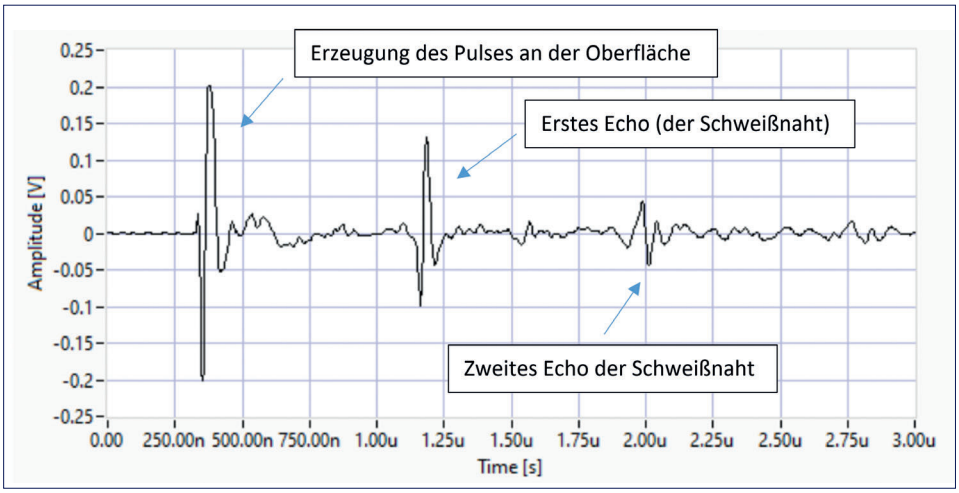

Abbildung 4: Zeitsignal des Echos (A-Scan) an einem Punkt auf einer Schweißnaht

Autorenexemplar aus der Fachzeitschrift "Schweiß- und Prüftechnik" www.oegs.org

allen weiteren absoluten Zeitbetrachtungen berücksichtigt werden. Weiters kann man gut die ersten beiden Reflexe an der Schweißnaht erkennen – die Schallwelle pendelt im ersten Blech hin und her.
Zusätzliche, kleinere Ausschläge werden durch transversale Wellen (geringere Schallgeschwindigkeit) und Konversionen von longitudinalen und transversalen Wellen ausgelöst. Im Weiteren werden diese jedoch nicht weiter betrachtet.
Die Schallwelle wird zum Teil an Grenzschichten und Materialübergängen innerhalb der Probe reflektiert. Die Schallgeschwindigkeit hängt dabei wesentlich vom Material ab und beträgt für Aluminium ca. v_{Alu} = 6350 m/s kann jedoch, je nach verwendeter Legierung leicht variieren.

Die Zeit t_{Echo}, zu der das Echo empfangen wird, hängt also vom Weg der Schallwelle durch das Material ab und lässt sich durch folgenden einfachen physikalischen Zusammenhang berechnen:

$$t_{Echo} = \frac{s}{v_{Schall}}$$

Die Variable s beschreibt den Weg, der von der Schallwelle zurückgelegt werden muss, v_{Schall} die Schallgeschwindigkeit im jeweiligen Material. Daraus resultiert direkt die erwartete Laufzeit t_{Echo} bis zum ersten Echo.
Bei Reflexionsmessungen, wie in Abbildung 5 links dargestellt, wird die Schallwelle bei fehlender Verbindung zwischen den Blechen an der Grenzschicht komplett reflektiert

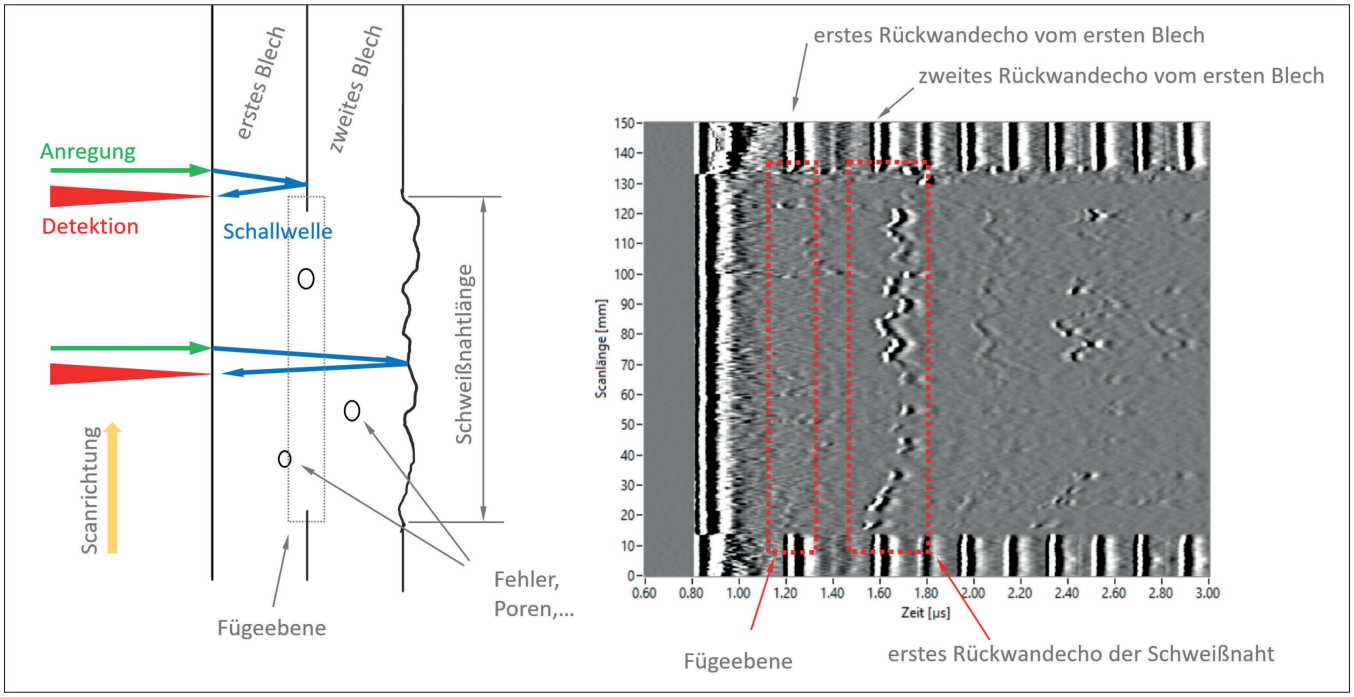

Abbildung 5: B-Scan einer Probe aus VP8

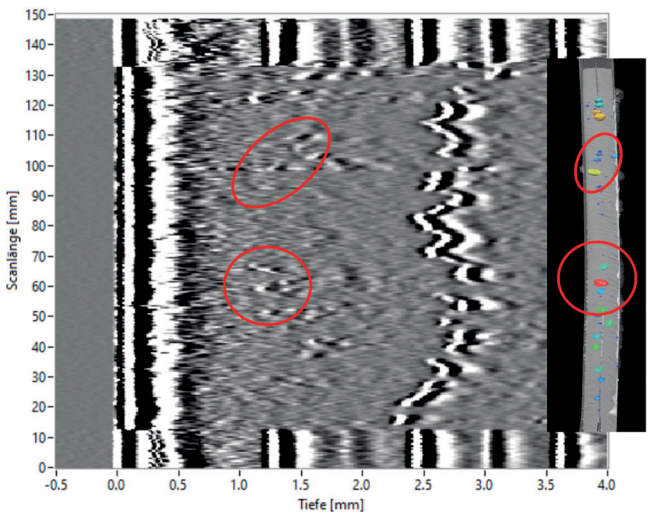

Abbildung 6: B-Scan und CT-Bild einer Probe aus VP8: Echo der Schweißnaht deutlich erkennbar

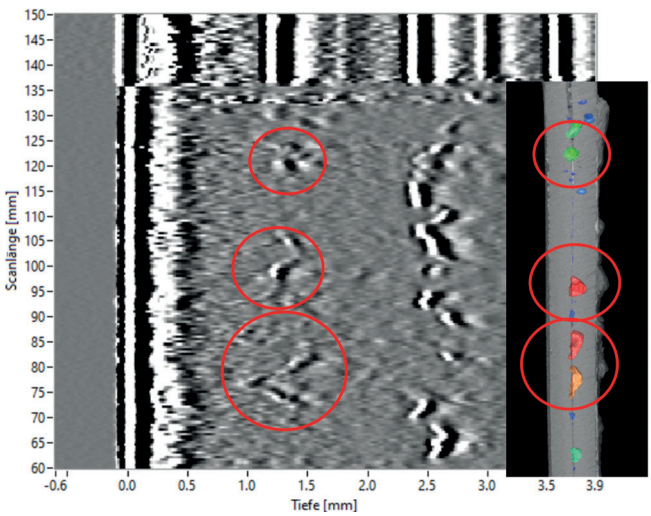

Abbildung 7: B-Scan und CT-Bild einer Probe aus VP9: Echo der Schweißnaht eindeutig im Bereich des 2 Blechechos erkennbar

Autorenexemplar aus der Fachzeitschrift "Schweiß- und Prüftechnik" www.oegs.org

und durchläuft einen Weg, der der doppelten Blechdicke s entspricht. Bei der Messung auf der Schweißnaht sind die Bleche im Normalfall verbunden, die Schallwelle durchläuft also einen weiteren Weg (4 x s) und das Signal wird dadurch erst später erwartet.

Werden alle Messungen entlang einer gescannten Linie als Grauwertebild dargestellt, so erhält man einen im Ultraschall üblichen B-Scan. Dabei sind auf der Y-Achse die einzelnen Messpunkte und in X-Richtung die Zeit aufgetragen. Der Grauwert entspricht der Amplitude des Signales. Ein B-Scan ist also eine Aneinanderreihung aller A-Scans einer gemessenen Linie.

Abbildung 5 zeigt rechts einen derartigen B-Scan entlang der Mitte einer Schweißnaht. Deutlich zu erkennen sind die Echos des ersten Bleches oben und unten im Bild. In der Mitte sieht man die Schweißnaht sowie die Rauheit der Schweißraupe an der Oberfläche. Unterbrechungen im Echo der Schweißnaht deuten auf Fehler wie Poren, Einschlüsse oder Risse in der Schweißnaht hin.

In Abbildung 6 wurde links ein Teil aus Abbildung 5 gezoomt und rechts der CT-Messung der selben Probe gegenübergestellt. Die Zeit wurde mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit auf eine Tiefe umgerechnet. Das Echo der Schweißnaht ist deutlich zu erkennen. Es handelt sich hier um eine grundsätzlich gut geschweißte Probe, mit vereinzelten Poren in der Schweißnaht. Im CT-Bild sind diese Poren zur besseren Erkennbarkeit eingefärbt (Farbe variiert nach berechnetem Volumen der Pore). Der Vergleich LUS-B-Scan und CT-Bild zeigt, dass das Echo der Schweißnaht im Bereich der Poren aussetzt, zusätzlich gibt es schwache Echos der Poren im mittleren Bereich. Poren, wie auch alle anderen Inhomogenitäten, streuen die enthaltenen Frequenzen der Ultraschallwellen je nach Größe und Form unterschiedlich. Diese Gegenüberstellung zeigt deutlich, dass LUS in der Lage ist, Poren und Fehler in der Schweißnaht zu detektieren.

Abbildung 7 zeigt die Gegenüberstellung eines weiteren B-Scans einer anderen Probe mit der entsprechenden CT-Messung. Auch in dieser Darstellung ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Messverfahren abzuleiten. An den Positionen, an dem im CT-Bild Poren identifiziert werden, ist im LUS-B-Scan ein Verschwinden des Echos zu verzeichnen. Kurz vor diesen Positionen sind leichte Echos zu beobachten.

Beurteilung der Gesamtgüte von Schweißnähten

Um die Interpretation der Messdaten zu erleichtern und die Güte der Schweißnaht schnell beurteilen zu können, wurde ein Algorithmus entwickelt, der aus den LUS-Daten ein farblich kodiertes Bild generiert, das über die Qualität der Schweißnaht Aufschluss gibt. Die Darstellung erfolgt dabei aus Sicht von oben auf die Schweißnaht. Der Algorithmus sucht das erste Echo in jedem A Scan. Liegt es erst zwischen 1 und 1,5 µs, handelt es sich an dieser Position der Schweißnaht sicher um eine fehlerfrei verschweißte Position (in Ab

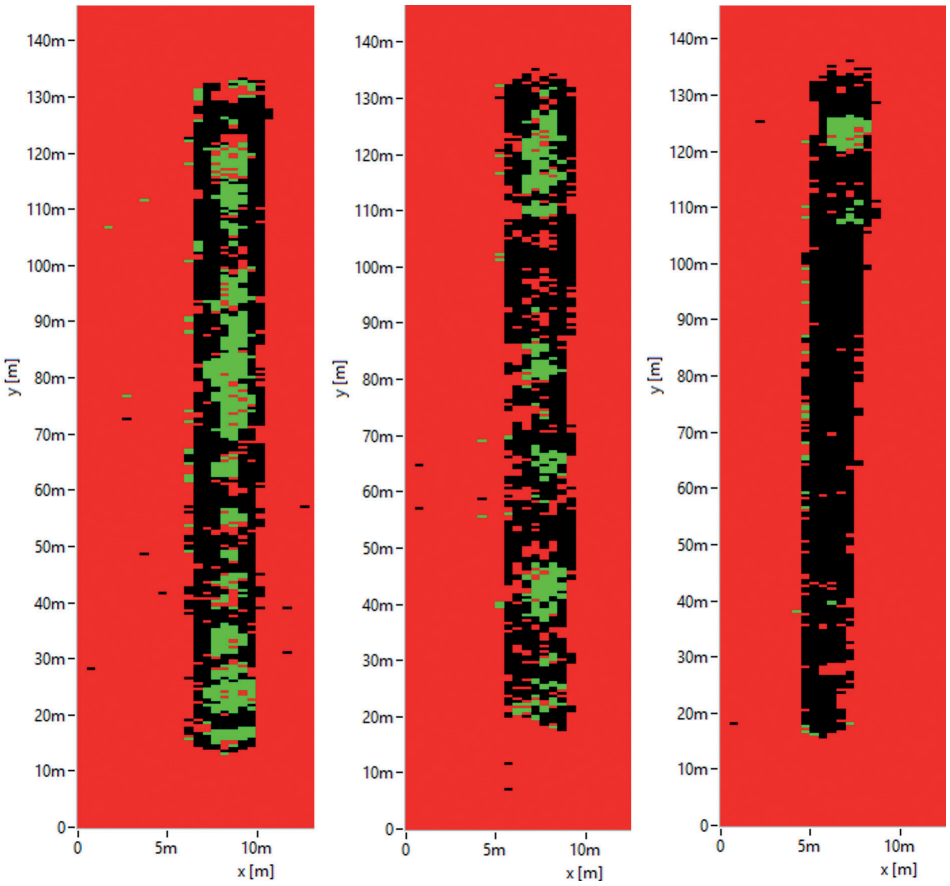

Abbildung 8: Farblich codierte Bilder zur Beurteilung der Schweißnahtqualität.
Proben aus VP 8 (links), VP12 (Mitte) und VP13 (rechts)

Autorenexemplar aus der Fachzeitschrift "Schweiß- und Prüftechnik" www.oegs.org

bildundg 8 grün markiert), da der Ultraschall (in der Schweißnaht) offensichtlich nicht reflektiert wurde. Falls das erste Signal bereits vor 800 ns detektiert wird, stammt es von einer Ungänze wie einer Pore oder anderen Störung, und der Punkt wurde in der Auswertung rot markiert. Falls der Algorithmus keine eindeutige Zuordnung bzw. keine eindeutige Aussage treffen kann, wird der Punkt schwarz markiert. Um ein aussagekräftiges Bild zu generieren müssen die Parameter (Filterung, Schwellwerte) genau eingestellt werden. Dabei können aktuell nur qualitative Aussagen getroffen werden, diese aber nicht zu quantifizierbaren Aussagen herangezogen werden (z.B.: Anzahl, Porengröße und Dimension, …)

In Abbildung 9 sind für die ausgewerteten Proben die Anzahl der grünen Punkte aufgetragen. Die durch die Schweißprozessparameter (Leistungsverlust und Fokusvariation) künstlich verschlechterten Proben (violett markiert) sind eindeutig erkennbar, da hier die Anzahl der grünen Punkte wesentlich geringer ist. Ein Ziel der weiteren Forschungen ist unter anderem, diesen Algorithmus zu verbessern und robuster zu gestalten, um die Qualität jeder Schweißnaht online in einer Fertigungslinie auch automatisiert beurteilen zu können und eine gut/schlecht-Entscheidung abzuleiten.

Conclusio und Ausblick

In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass sich Laser-Ultraschall für die Qualitätskontrolle von Schweißnähten (hier Laserstrahlschweißnähte) sehr gut eignet. Die Vergleiche der LUS-Ergebnisse mit den CT-Referenzmessungen an Proben unterschiedlicher Qualität zeigen eine sehr gute Empfindlichkeit von LUS gegenüber den gesuchten Fehlstellen. Die in den CT-Bildern gefundenen Poren ab etwa 0,1 mm^3 konnten auch in den LUS-B-Scans eindeutig identifiziert werden. Weiters wurde ein Algorithmus zur qualitativen Beurteilung einer Schweißnaht entwickelt und entsprechende Ergebnisse vorgestellt. ■

In einer weiteren Studie sind zusätzliche Messungen und Analysen zur Verifikation von LUS an allen relevanten Blechkombinationen und Fehlerfällen sowie der Aufbau eines robotergeführten LUS-Systems als automatisiertes, integriertes ZfP-Verfahren entlang der Produktionslinie geplant. Auch eine Unterstützung und Erweiterung der bisher durchgeführten Auswertungen durch künstliche Intelligenz ist geplant.

Autoren

Dr. Norbert Huber
Research Scientist
RECENDT Research Center for Non-Destructive Testing GmbH, A-4040 Linz

Dr. Edgar Scherleitner
Area Manager Acoustics
RECENDT Research Center for Non-Destructive Testing GmbH, A-4040 Linz

Theresa Aumüller
Spezialistin Fertigungsverfahren, Planung Karosseriebau
BMW Group, D-80788 München

Dr. Thomas Forstner
Technologie-Qualitätsingenieur Lackierte Karosserie
BMW Group, D-80788 München

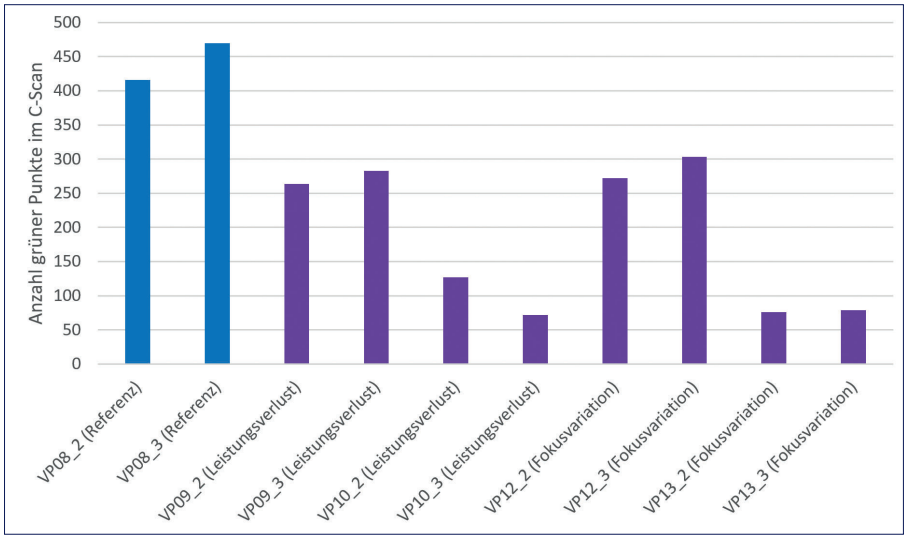

Abbildung 9: Anzahl der grünen Punkte in den Auswertungen.
Die durch Leistungsverlust und Fokusvariation bewusst verschlechterten Schweißnähte sind hier deutlich zu erkennen.

Alle Bildrechte: RECENDT GmbH

Autorenexemplar aus der Fachzeitschrift "Schweiß- und Prüftechnik" www.oegs.org