Laser-Ultraschall zur Prüfung von Laserstrahlschweißnähten

N. Huber[1], B. Reitinger[1], K. Meirer[1], E. Scherleitner[1], T. Aumüller[2], T. Forstner[2]

[1] RECENDT Research Center for Non-Destructive Testing GmbH, 4040 Linz, Österreich; [2] BMW Group, 80788 München, Deutschland

Laser-Ultraschall (LUS) ist eine Methode zur zerstörungsfreien Materialprüfung ähnlich zu konventionellen Ultraschallsystemen, jedoch mit wesentlichen Vorteilen für bestimmte Anwendungsfälle und die 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 zunehmend 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-, Zeit- 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.

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 (z. B. wasserbasierte Gele, Öle) mit einer Oberfläche in Kontakt gebracht und eine Ultraschallwelle in das zu prüfende Objekt eingekoppelt. Diese Ultraschallwellen werden an inneren Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlicher akustischer Wellenimpedanz 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 [1,2] erfolgt die Prüfung ebenfalls durch eine Ultraschallwelle. Diese wird jedoch entweder durch kurze, hochenergetische Laserpulse, oder durch einen kontinuierlichen, aber intensitätsmodulierten Laserstrahl erzeugt, siehe Abbildung 1. Das in diesem Artikel vorgestellte Verfahren basiert auf der erstgenannten Methode, wobei die Dauer des Laserpulses in der Größenordnung von etwa 10 ns liegt. Dieser bewirkt eine lokale, plötzliche Erwärmung und damit Ausdehnung der bestrahlten Fläche (thermoelastischer Effekt) oder trägt sogar einige 100 nm der Oberfläche (je nach Intensität und Material) unter Plasmabildung ab (ablativer Effekt), was zu deutlich höheren Amplituden führt. Durch die Kombination beider Effekte wird eine Vielzahl von Ultraschallwellen (z. B. longitudinale Druckwellen und transversale Scherwellen im Volumen und an der Oberfläche, Plattenwellen) mit sehr hoher Bandbreite erzeugt. Je nach angewandter Methode und untersuchtem Material stehen Frequenzen vom kHz- bis in den unteren GHz-Bereich zur Verfügung und ermöglichen somit Untersuchungen von Strukturen vom Zentimeter- bis in den Nanometer-Bereich.

Die hier zur Schweißnahtkontrolle vorgestellte Laser-Ultraschallmethode basiert hauptsächlich auf der Auswertung der longitudinalen Druckwelle. Die Detektion der Echos erfolgt dabei mit einem Vibrometer nach dem robusten Two-Wave-Mixing-Interferometer Prinzip [3]. Dabei wird die Oberfläche mit einem Laser beleuchtet und das reflektierte Licht in einem photorefraktiven Kristall mit einem Referenzstrahl gemischt, wodurch auch kleinste Schwingungen auf rauen Oberflächen detektiert werden können.

Bei den in diesem Artikel durchgeführten Messungen wurden Reflexionsmessungen angewandt, bei denen Anregung und Detektion an derselben Position erfolgen, wie in Abbildung 1 dargestellt. Je nach Anforderung der Messaufgabe können Anregung und Detektion natürlich an verschiedenen Positionen erfolgen, z. B. auch an den gegenüberliegenden Seiten der Probe (Transmissionsmessung). Ein Ultraschallbild wird durch punktweises Scannen der Oberfläche und entsprechende Auswertung erzeugt, was mit aktuell verfügbaren LUS-Komponenten bereits mit 100 Messpunkten pro Sekunde oder mehr möglich ist.

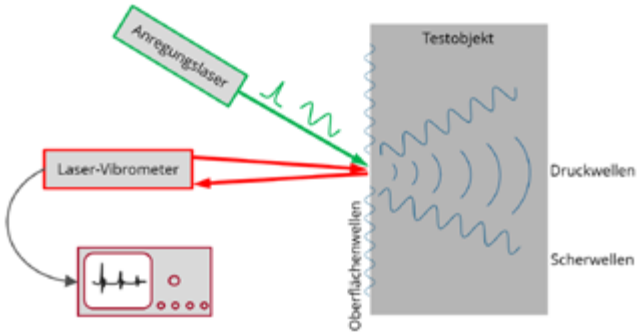


Abbildung 1: Grundprinzip von LUS (Reflexionsmessung)

Da sowohl Anregung als auch Detektion mittels Laserlicht erfolgen, ist die Technologie berührungslos, wodurch LUS auch auf sehr heißen, kalten oder unebenen Oberflächen eingesetzt werden kann, aber auch auf empfindlichen Oberflächen, die keine Verwendung eines Koppelmediums erlauben. Aufgrund der methodischen und lasertechnologischen Entwicklungen der letzten Jahrzehnte ist LUS eine attraktive Möglichkeit geworden, wenn insbesondere berührungsloses Messen, breitbandige Signalauswertung, hohes Detektionsvermögen und Inline-Fähigkeit wichtig sind. Die Anwendungen für zerstörungsfreie Untersuchungen reichen dabei branchenunabhängig über einen weiten Bereich; eine Übersicht ist in Tabelle 1 zu finden.

Industrieller Bereich	Zerstörungsfreie Methoden mit LUS
Metallerzeugung	Riss- und Einschlussdetektion nach Guss (z. B. Stahl, Aluminium)
	In-situ Kornwachstum, Phasenumwandlungen, Rekristallisation (im thermischen Simulator/inline) [4]
Metallverarbeitung	Fehlerdetektion in Schweißnähten und -punkten
	Bestimmung der Einhärtetiefe (z.B. bei induktiv gehärteten Komponenten)
Luftfahrt und Leichtbau	Detektion von Delaminationen und Einschlüssen in faserverstärkten Kunststoffen (z.B. CFK, GFK) [5]
Elektronik- und Halbleiter	Charakterisierung von akustischen Filtern, dünnen Schichten, Mikro- und Nanostrukturen
	Bestimmung der Adhäsion von Beschichtungen
Bio- und Medizintechnik	Hochauflösende Ultraschallanalysen mit optischem Kontrast [7]

Tabelle 1: Anwendungsbereiche von LUS

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.

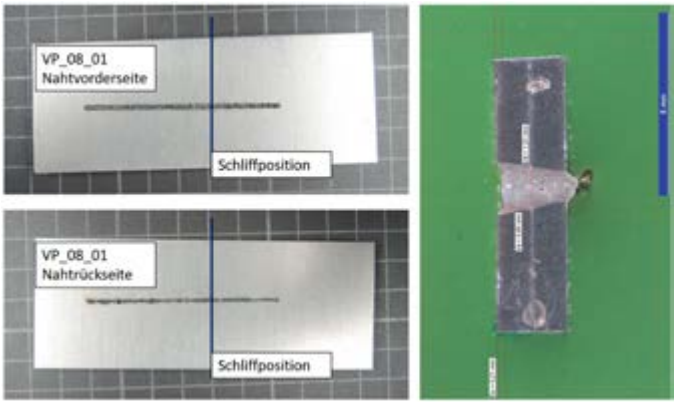


Abbildung 2: Fotos einer Probe (links) und Schliffbild einer Schweißnaht (rechts)

Zur Herstellung der Aluminiumproben (Beispiele siehe Abbildung 2) 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 und den künstlich provozierten Fehlerfällen ist in Tabelle 2 zu finden.

Referenzverfahren: Röntgen-Computertomografie (XCT)

Als eine Variante zur Verifizierung der LUS-Ergebnisse eignet sich die industrielle Röntgen-Computertomografie (XCT). Mit dem erzeugten Volumenmodell – in diesem Fall das Modell einer einzelnen, gescannten Laserstrahlschweißnaht – konnten Fehler und Materialeigenschaften an den gewünschten Positionen im Volumen visualisiert und charakterisiert werden. Die verwendete Anlage war eine phoenix v|tome|x L300 Anlage (300 kV Röhre mit Highflux Target und 4K Detektor von GE). Das Auflösungsvermögen wird unter anderem von der Größe des zu untersuchenden Objekts bestimmt, weshalb die Proben kleinstmöglich auf den Untersuchungsbereich der Laserstrahlschweißnähte zugeschnitten wurden. So konnte eine Auflösung zwischen 16 und 26 µm bei einer Scan-Dauer von etwa einer Stunde erreicht werden.

LUS-Messsystem

Das Laborsystem mit den Strahlengängen des Anregungslasers (grün) und des Detektionslasers (rot) ist in Abbildung 3 für eine einzelne Messposition dargestellt. Die Schweißprobe ist dabei zum Scannen auf einer Positioniereinheit befestigt, während die Laser auf einer Position verharren. Die Ultraschallanregung erfolgte beim verwendeten Aufbau durch einen gütegeschalteten (Q-switched) Nd:YAG Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 532 nm und einer Pulsdauer von 5 – 8 ns (Hybrid II von InnoLas). Der Anregungslaser wurde auf die Oberfläche der Probe fokussiert, um einen Spotdurchmesser von 1 mm zu erreichen. Die Detektion der Schwingungen der Probenoberfläche durch die reflektierten Ultraschallwellen erfolgte mittels Laser-Vibrometer bestehend aus einem Langpulslaser (Pulslänge 100 µs) und einem Two-Wave-Mixing-Interferometer (LUS Advance von Tecnar). Die Laserspots für Anregung und Detektion wurden bei der vorgenommen Reflexionsmessung an dieselbe Stelle geführt. Die Aufnahme der elektrischen Signale erfolgte mittels Oszilloskops und einer entsprechenden Steuerungssoftware am PC. Anregung und Detektion waren miteinander synchronisiert und arbeiteten 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. Um diese mit Messpunkten voll abzudecken, wurde eine Fläche von 70 x 15 mm² abgescannt, indem die Laser stillstanden und die Proben mit einer zweidimensionalen Positioniereinheit (x-y) linienweise über diesen Bereich bewegt wurden. Die Geschwindigkeit in x- und y- Richtung betrug 20 mm/s, woraus sich jeweils ein Messpunkteabstand (relevant für die laterale Auflösung) von 0,2 mm ergab. Für die Messung einer Linie, die als sog. B-Scan (Abbildung 5) dargestellt werden kann, wurden somit 3,5 s benötigt, für den gesamten Bereich waren es daher etwa 5 Minuten. Durch eine Verkleinerung des zu scannenden Bereiches und eine Erhöhung des Messpunkteabstandes ist demnach eine starke Optimierung der Messzeit möglich, was in dieser Machbarkeitsstudie aber nicht im Fokus stand.

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 2: Schweißparameter für die Probenherstellung

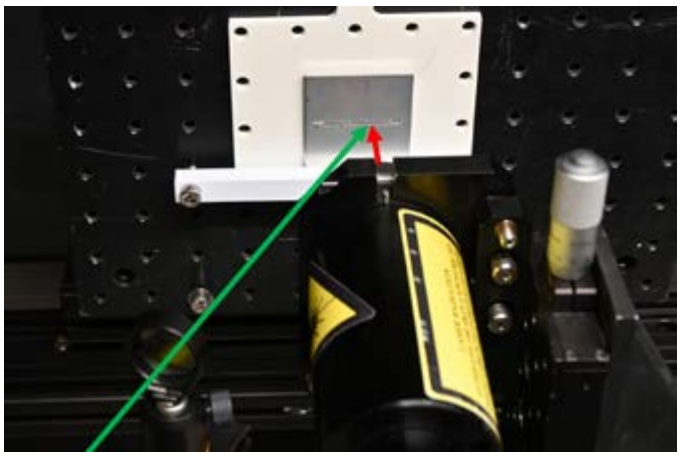


Abbildung 3: Laborsystem zum Scannen der auf einer x-y-Positioniereinheit befestigten Schweißproben. Grün: Anregungsstrahl, Rot: Detektionsstrahl.

LUS-Ergebnisse im Vergleich zu Referenzmessungen

Der zeitliche Verlauf des Detektionssignals an einem Messpunkt, welcher als A-Scan bezeichnet wird, ist in Abbildung 4 zu sehen. In diesem Fall handelt sich um einen Bereich in der Mitte der Schweißnaht.

Der hohe Signal-Peak bei 330 ns entsteht kurz nach dem Auftreffen des Anregungslasers durch die starke Bewegung der Oberfläche bei der Erzeugung des Ultraschallpulses und durch die Plasmabildung. Weiter sind die ersten beiden Reflexe an der Schweißnaht gut zu erkennen – die Schallwelle pendelt im ersten Blech hin und her.

Zusätzliche, kleinere Signal-Peaks werden unter anderem durch transversale Wellen mit geringerer Schallgeschwindigkeit und Modenkonversionen von longitudinalen und transversalen Wellen ausgelöst. Diese werden jedoch zur Auswertung nicht weiter betrachtet.

Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf des Detektionssignal (A-Scan) an einem Punkt auf einer Schweißnaht.

Die Schallwelle wird zum Teil an Grenzschichten und Materialübergängen innerhalb der Probe reflektiert. Die Schallgeschwindigkeit hängt dabei wesentlich vom Material ab und beträgt für reines Aluminium ca. vAlu = 6350 m/s. Diese kann jedoch, je nach verwendeter Legierung und lokaler Temperatur, variieren. Der Zeitpunkt zu dem das Echo empfangen wird, hängt vom Weg der Schallwelle durch das Material ab und lässt sich einfach berechnen.

Bei Reflexionsmessungen, wie in Abbildung 5 (oben) dargestellt, wird die Schallwelle bei fehlender Verbindung zwischen den Blechen an der Grenzschicht vollständig reflektiert und durchläuft einen Weg, der der doppelten Blechdicke entspricht. Bei der Messung auf der Schweißnaht sind die Bleche im fehlerfreien Fall verbunden, die Schallwelle durchläuft also den weiteren Weg von 4-mal der Blechdicke, wodurch das zurückkommende Signal entsprechend später erwartet wird.

Werden alle Messungen entlang einer gescannten Linie als Grauwertebild dargestellt, erhält man einen im Ultraschall üblichen B-Scan. Dabei sind auf der vertikalen Achse die einzelnen Messpunkte und auf der horizontalen Achse die Zeit aufgetragen; der Grauwert entspricht der Amplitude des Signals.

Abbildung 5 zeigt unten einen LUS-B-Scan entlang der Mitte einer Schweißnaht einer Probe aus VP8 (siehe Tabelle 2). Deutlich zu erkennen sind die starken Pendelechos des ersten Bleches oben und unten im Bild. Dazwischen ist die Schweißnaht, sowie die Rauheit der Schweißraupe an der Oberfläche zu sehen (siehe Abbildung 5,

erstes Rückwandecho der Schweißnaht). Unterbrechungen im Echo im Bereich der Fügeebene deuten auf Fehler wie Poren, Einschlüsse oder Risse in der Schweißnaht hin.

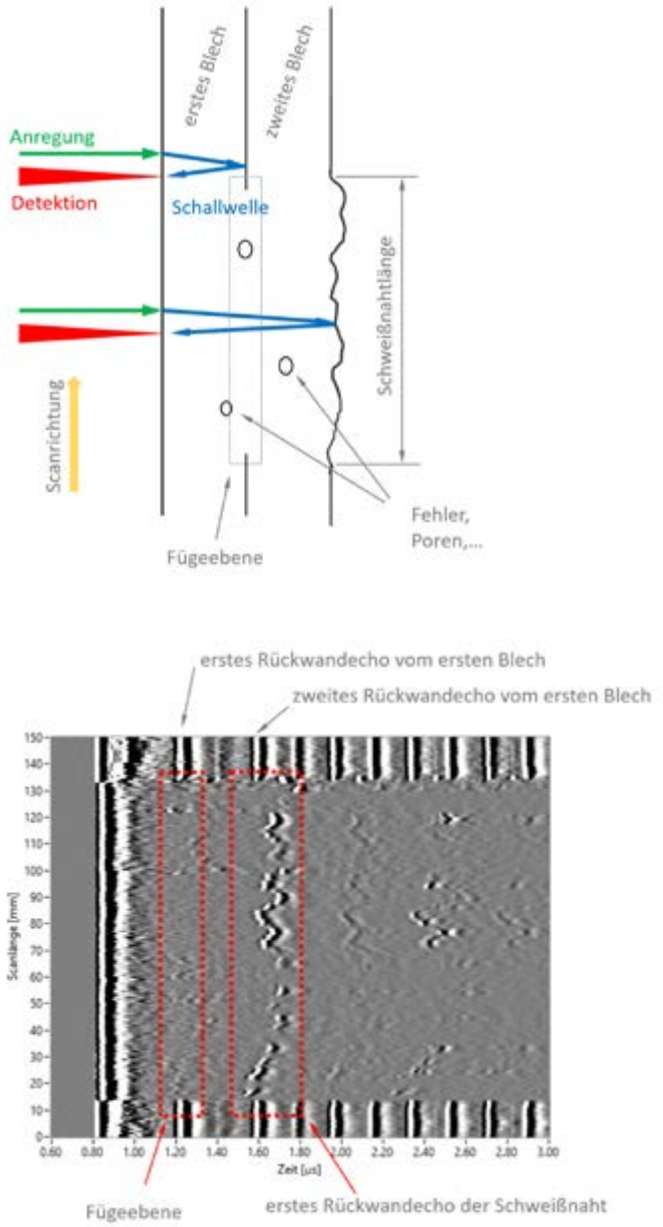


Abbildung 5: Oben: Prinzip der Ultraschallanregung, -detektion und des Schallwellenverlaufs. Unten: LUS-B-Scan einer Probe aus VP8.

Eine Vergrößerung des relevanten Bereiches des B-Scans aus Abbildung 5 wird in Abbildung 6 der ausgewertete XCT-Messung der selben Probe (rechts außen) gegenübergestellt. Die Zeit wurde mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit auf die entsprechende Tiefe umgerechnet. Das starke Echo der Schweißnahthinterseite ist deutlich zu erkennen. Es handelt sich hier um eine als gut bewertete Schweißnaht, da sie nur vereinzelt kleine Poren enthält, die im XCT-Bild zur besseren Erkennbarkeit eingefärbt sind (Farbe variiert nach berechnetem Volumen der Poren). Der Vergleich LUS-B-Scan und XCT-Bild zeigt, dass die beiden rot markierten Porenbereiche (> 0,1 mm³) in beiden Auswertungen übereinstimmen. Weiter ist zu erkennen, dass im LUS-B-Scan das Echo der Schweißnahthinterseite (bei ca. 2.5 mm) im Bereich der rot markierten Poren aufgrund der Abschattung aussetzt, was als zusätzliches Identifikationsmerkmal verwendet werden kann. Auch die kleineren Poren sind in Form von schwächeren Echos im mittleren Bereich zu sehen. Poren, wie auch alle anderen Inhomogenitäten in der akustischen Impedanz, streuen die enthaltenen Frequenzen der Ultraschallwellen je nach Größe und Form unterschiedlich und bedürfen einer spezialisierten Auswertung.

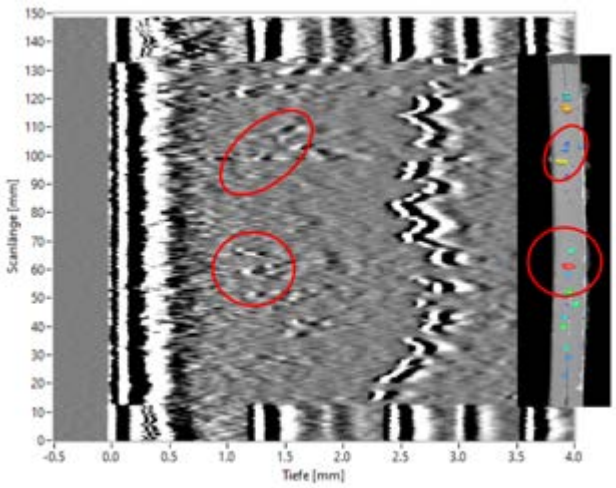


Abbildung 6: Links: LUS-B-Scan einer Probe aus VP8. Rechts: entsprechende XCT-Auswertung. Zwei größere Poren (> 0,1 mm3) sind rot markiert, deren Lage bei beiden Methoden übereinstimmen.

Abbildung 7 zeigt die Gegenüberstellung eines LUS-B-Scans einer weiteren Probe mit der entsprechenden XCT-Messung. Auch in dieser Darstellung ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Messverfahren abzuleiten. An den Positionen, an dem im XCT-Bild Poren identifiziert werden, ist im LUS-B-Scan wieder ein Aussetzen der Echos der Schweißnahthinterseite zu erkennen, das offensichtlich durch Poren (rot markierte Echos bei ca. 1,3 mm) verursacht wurde.

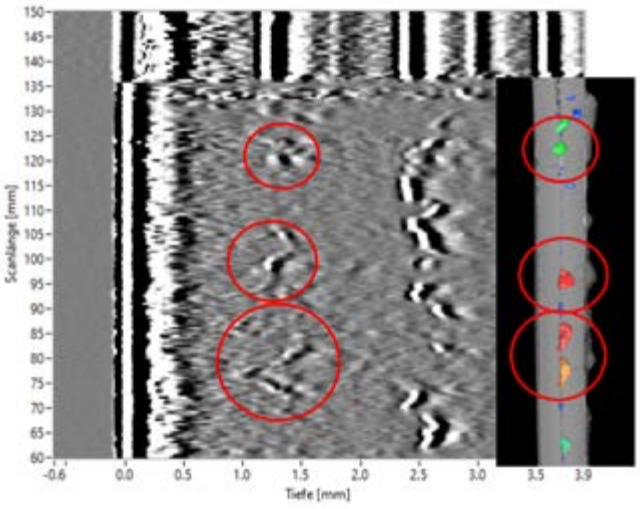


Abbildung 7: Links: LUS-B-Scan einer Probe aus VP9. Rechts: entsprechende XCT-Auswertung. Die rot markierten Poren stimmen wieder überein. Echo der Schweißnahthinterseite im LUS-B-Scan eindeutig im Bereich des 2 Blechechos (bei ca. 2,5 mm) erkennbar.

Beurteilung der Gesamtgüte von Schweißnähten

Um die Interpretation der Messdaten zu erleichtern und die Schweißnahtqualität schnell (eventuell auch automatisiert) beur-

teilen zu können, wurde ein Algorithmus entwickelt, der aus den LUS-Daten ein farblich kodiertes Bild generiert. 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, so ist diese Position der Schweißnaht mit großer Sicherheit fehlerfrei (im Bild grün markiert), da der Ultraschall dort nicht reflektiert wurde. Falls das erste Signal bereits vor 0,8 µs detektiert wird, stammt es von einer Inhomogenität, z. B. einer Pore, woraufhin der Punkt in der Auswertung rot markiert wird. Falls der Algorithmus keine eindeutige Zuordnung treffen kann, wird der Punkt schwarz markiert, wobei ein vermehrtes Auftreten von schwarzen Bereichen eher auf eine schlechte Qualität der Schweißnaht hindeutet. Die so durchgeführte Auswertung ist an drei verschiedenen Proben in Abbildung 8 zu sehen. Um ein robustes und aussagekräftiges Bild zu erhalten, muss eine entsprechende Signalvorverarbeitung durchgeführt werden, die unter anderem eine präzise Parametrisierung der Filter und Schwellwerte beinhaltet. Aus diesen Bildern werden derzeit nur qualitative, nicht aber quantitative Aussagen, wie beispielsweise über die Anzahl der Poren, die Porengröße oder eine Defektgeometrie getroffen.

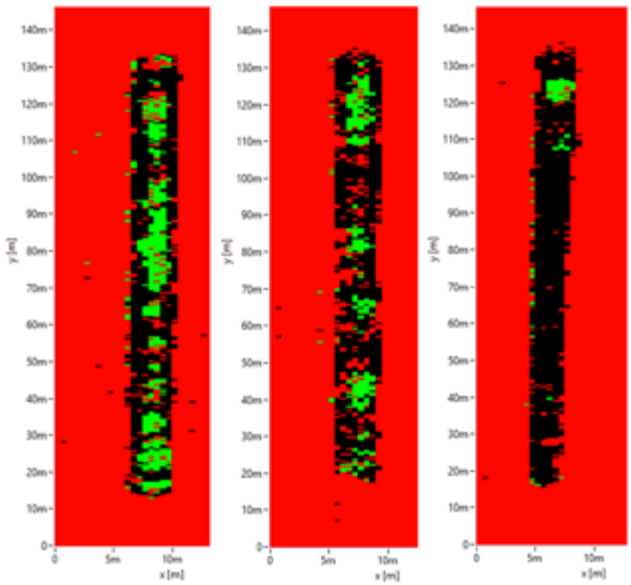


Abbildung 8: Farblich kodierte Bilder zur Beurteilung der Schweißnahtqualität: rot=keine Verbindung, grün=gute Verbindung, schwarz=nicht eindeutig. Proben aus VP 8 (gute Referenzproben, links), VP12 (Fokusvariation, mittig) und VP13 (starke Fokusvariation, rechts).

Für die farblich kodiert ausgewerteten Proben ist in Abbildung 9 jeweils die Anzahl der grünen Punkte aufgetragen und eine Korrelation zu den Schweißprozessparametern der verschiedenen Proben ersichtlich. Die durch Leistungsverlust und Fokusvariation absichtlich verschlechterten Proben sind im Vergleich zu den gut geschweißten Referenzproben eindeutig erkennbar, da hier die Anzahl der grünen Punkte wesentlich geringer ist. Die Auswirkungen von Leistungsverlust und Fokusvariation sind mit dieser Methode evident und ermöglichen somit eine Qualitätsaussage über die Schweißqualität.

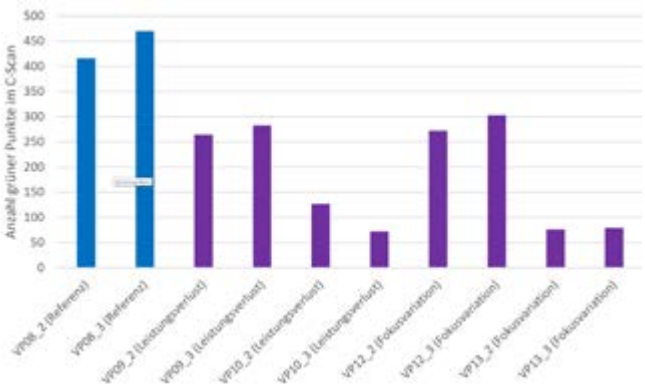


Abbildung 9: Anzahl der grünen Punkte in den Auswertungen. Die durch Leistungsverlust und Fokusvariation bewusst verschlechterten Schweißnähte sind hier deutlich zu erkennen.

Conclusio und Ausblick

In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass sich Laser-Ultraschall für die Qualitätskontrolle von Schweißnähten (hier Laserstrahlschweißnähten) sehr gut eignet. Die Berührungslosigkeit, Breitbandigkeit und Automatisierbarkeit von LUS bieten hier eindeutige Vorteile im Vergleich zu piezoelektrischen Ultraschallverfahren. Die Vergleiche der LUS-Ergebnisse mit den XCT-Referenzmessungen an Proben unterschiedlicher Qualität und Porengröße zeigen sehr gute Übereinstimmungen und ein hohes Detektionsvermögen von LUS gegenüber den gesuchten Fehlstellen. Die in den XCT-Bildern gefundenen Poren ab etwa 0,1 mm^3 konnten auch in den LUS-B-Scans eindeutig identifiziert werden. Weiter wurde ein Algorithmus zur qualitativen Beurteilung einer Schweißnaht entwickelt und die einfach zu interpretierenden Ergebnisse anhand drei gemessener Proben visuell dargestellt (Abbildung 8) und die Messresultate aller Proben in einer Tabelle (Abbildung 9) verglichen.

Über die Partner in dieser Forschungsarbeit

Das Leistungsspektrum der Research Center for Non-Destructive Testing GmbH (RECENDT) umfasst die gesamte F&E-Prozesskette von der anwendungsorientierten Grundlagenforschung bis zur Entwicklung neuester Gerätetechnologien für den Einsatz in der Industrie. RECENDT erforscht und realisiert kundenspezifische, maßgeschneiderte Hightech-Lösungen im Bereich der Materialcharakterisierung und zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Das interdisziplinäre Team aus PhysikerInnen, ChemikerInnen, MechatronikerInnen und EntwicklungsingenieurInnen ist mit modernsten Laboren ausgestattet, um mit seinen Kompetenzen nachhaltig zum Erfolg heimischer und internationaler Unternehmen beizutragen.

Die BMW Group ist mit ihren Marken BMW, MINI, Rolls-Royce und BMW Motorrad der weltweit führende Premium-Hersteller von Automobilen und Motorrädern und Anbieter von Premium-Finanz- und Mobilitätsdienstleistungen. Das BMW Group Produktionsnetzwerk umfasst 31 Produktions- und Montagestätten in 15 Ländern; das Unternehmen verfügt über ein globales Vertriebsnetzwerk mit Vertretungen in über 140 Ländern.

Das Produktionssystem der BMW Group zeichnet sich durch eine einzigartige Flexibilität und hohe Effizienz aus. Dies ermöglicht eine schnelle Reaktion auf Marktveränderungen und regionale Absatzschwankungen. Die Produktionskompetenz der BMW Group trägt zudem zur Profitabilität des Unternehmens bei.

In ihrem Produktionsnetzwerk setzt die BMW Group innovative Technologien aus den Bereichen Digitalisierung und Industrie 4.0 ein, wie Anwendungen aus der virtuellen Realität, der künstlichen Intelligenz und dem 3D-Druck. Standardisierte Prozesse und Strukturen sorgen im Produktionssystem für eine gleichbleibende Premiumqualität. Gleichzeitig bietet die BMW Group ihren Kunden einen hohen Individualisierungsgrad.

Seit jeher sind langfristiges Denken und verantwortungsvolles Handeln die Grundlage des wirtschaftlichen Erfolges der BMW Group. Das Unternehmen hat ökologische und soziale Nachhaltigkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette, umfassende Produktverantwortung sowie ein klares Bekenntnis zur Schonung von Ressourcen fest in seiner Strategie verankert.

Referenzen

[1] *Scherleitner E, Reitinger B, Hettich M, Berer T and Burgholzer P 2019 Laser Ultrasonics Handb. Adv. Nondestruct. Eval. 1–26*

[2] *Scruby C B and Drain L E 1990 Laser Ultrasonic Testing and Applications (Bristol)*

[3] *Blouin A and Monchalin J 1998 Detection of ultrasonic motion of a scattering surface by two-wave mixing in a photorefractive GaAs crystal Appl. Phys. Lett. 65 932*

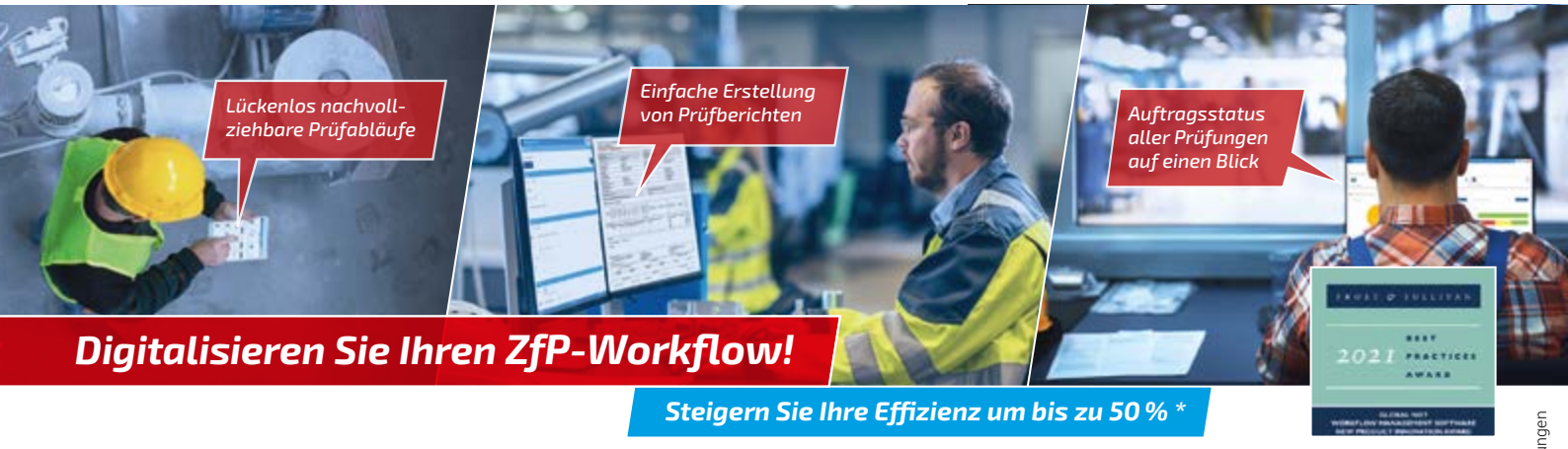
[4] *Scherleitner E, Kerschbaummayr C, Haderer W, Reitinger B, Mitter T and Gruensteidl C 2021 Characterization of Microstructure Variations by Laser-Ultrasound during and after the Heat Treatment of Metals IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 1178 012050*

[5] *James V, Carswell D, Riise J, Nicholson P I, Graf N, Huber N, Gärtner M, Reitinger B, Scherleitner E, Burgholzer P, Phipps J, Burns D and Incarnato C 2021 Robot deployed Laser-Ultrasonic NDT system for inspection of large aircraft structures IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 1024 012032*

[6] *Grünsteidl C, Veres I, Berer T, Kreuzer S, Rothemund R, Hettich M, Scherleitner E and Ryzy M 2020 Measurement of the attenuation of elastic waves at GHz frequencies using resonant thickness modes Appl. Phys. Lett. 117*

[7] *Langer G, Buchegger B, Jacak J, Klar T A, Berer T and Dasa M K 2018 Photoacoustic microscopy of single cells employing an intensity-modulated diode laser 91*

Dieser Artikel erschien in der Ausgabe 01-02/2021 der „SCHWEISS- UND PRÜFTECHNIK“ der ÖGS, Wien und wurde für diese Ausgabe überarbeitet.



Digitalisieren Sie Ihren ZfP-Workflow!

Steigern Sie Ihre Effizienz um bis zu 50 % *

Mit der Cloud-basierten Management-Software DRIVE NDT können Sie Ihren gesamten ZfP-Workflow für alle Prüfverfahren zentral organisieren und steuern.

- Umfassendes Auftragsmanagement
- Individuelle und automatisierte Prüfberichterstellung
- Verwaltung von Prüfpersonal inkl. Dosismanagement
- Prüfmittelüberwachung und -verwaltung
- Anlage von Prüfobjekten inkl. Prüfparameter, ROI, ...
- Zentraler Zugriff auf Prüfanweisungen und -vorschriften
- Unterstützende Systemhinweise und Erinnerungen
- Smarte Auswertbarkeit der Daten, z.B. für Statistiken
- Beschleunigung der Abrechnungsprozesse
- Benutzerzugriff jederzeit und von überall möglich

Jetzt Termin für eine kostenlose Demonstration vereinbaren!

DRIVENDT
www.drive-ndt.com

Eine Softwarelösung von
DÜRR NDT AAP NDT

AAP NDT Channel-Partner Deutschland
BW PLUS PTH GmbH

* Basierend auf Kundenerfahrungen