

# Überwachung und Qualitätssicherung des Laserschweißprozesses ultrahochfester Karosseriestähle durch integrierte ZfP-Verfahren

Matthias BASTUCK\*, Bernd VALESKE\*, Bernd WOLTER\*, Hans-Georg HERRMANN\*

\* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

**Kurzfassung.** Das Laserstrahlschweißen ultrahochfester (pressgehärteter) Stähle stellt im Vergleich zu konventionellen Stählen neue Herausforderungen an die Qualitätskontrolle sowie die Prozessüberwachung. Der Beitrag soll neue Lösungsansätze zur Dokumentation aber vor allem zur Überwachung der Qualität von Laserschweißnähten durch weiterentwickelte zerstörungsfreie Prüfverfahren zeigen, welche über alle Phasen (Pre-, In- und Post-Process) des Laserstrahlschweißens integriert werden. Der Vortrag zeigt den aktuellen Entwicklungsstand vor allem für In- und Post-Process bzw. Offline-Verfahren. Die Erfassung der Hochfrequenzemissionen eines Laserschweißprozesses oberhalb der Hörschallschwelle ist in der Prozesskette als In-Process-Überwachungsverfahren einzugliedern. Die Integration von verschiedenen Prüfköpfen und Prüfkopfkonzepten in den Laserschweißprozess wird vorgestellt. Anhand der Variation der Stellparameter der Laserschweißanlage sowie durch gezielte Einbringung von Testfehlern kann deren Leistungsfähigkeit beurteilt und verglichen werden. Die Ergebnisse werden mit optischen Prozessüberwachungssystemen, z.B. Photo-Dioden, nach aktuellem Stand der Technik und Wissenschaft sowie zerstörenden Prüfungen korreliert. Der Einsatz von Hochfrequenz-Ultraschall (Tauchttechnik) bei einer Prüfkopfnennfrequenz von 75 MHz stellt ein Offline-Verfahren zur Qualitätskontrolle des Laserschweißprozesses dar. Am Beispiel verschiedener Laserschweißverbindungen wird dieses Verfahren vorgestellt, um eine schnelle und wirtschaftliche Ermittlung optimaler Schweißparameter durch systematische Integration dieses ZfP-Tools z.B. in den Musterbau oder Vorserienanlauf zu realisieren. Dabei werden Qualitätsmerkmale der Schweißverbindung wie Nahtelfall, Wurzeldurchhang, Anbindequerschnitt, Poren oder Schweißnahtverlauf ermittelt und mit den Ergebnissen von Referenzuntersuchungen verglichen. Die im Beitrag vorgestellten Ergebnisse des Überwachungskonzeptes auf Basis von ZfP-Methoden über alle Prozessphasen (Pre-, In- und Post-Process) sind erste Bausteine zur Realisierung einer vollständigen Prozessbeherrschung beim Laserstrahlschweißen von ultrahochfesten Stählen, wodurch ein wichtiger Beitrag zur Steigerung des Leichtbaupotentials im automobilen Karosseriebau geleistet werden kann.

## 1. Einleitung

Zur Überwachung anspruchsvoller Fügeprozesse, wie z.B. dem Laserstrahlschweißen von ultrahochfesten Stählen, ist besonders eine ganzheitliche Prozessüberwachung mittels ZfP-Verfahren über alle Prozessphasen von großer Bedeutung. Dabei erfassen Sensoren prozessvorlaufend (Pre-Process) die relevanten Eingangsgrößen und können somit den Fügeprozess optimal einstellen. Die In-Process-Verfahren sind hinsichtlich der Überwachung der Prozessstabilität notwendig, um frühzeitig Abweichungen entdecken zu können. Prozessnachlaufend kann in Form einer Post-Process- oder Offline-Überwachung die Schweißnahtqualität als Ausgangsparameter schnell und effizient bestimmt werden.

Im Folgenden sollen ein neues Verfahren zur In-Process-Überwachung der akustischen Luftschallemissionen oberhalb der Hörschallschwelle ( $> 20$  kHz) beim Laserschweißen sowie die hochauflösende Hochfrequenz-Ultraschallprüfung in Tauchtechnik als Post-Process- oder Offline-Verfahren zur schnellen Ermittlung der Laserschweißnahtqualität vorgestellt werden. Diese sind wichtige Einzelbausteine zur Entwicklung einer ganzheitlichen Prozessüberwachungsstrategie eines Laserschweißprozesses, insbesondere für crashrelevante ultrahochfeste Stahlgüten.

## 2. In-Process-Verfahren

### 2.1 *Stand der Technik*

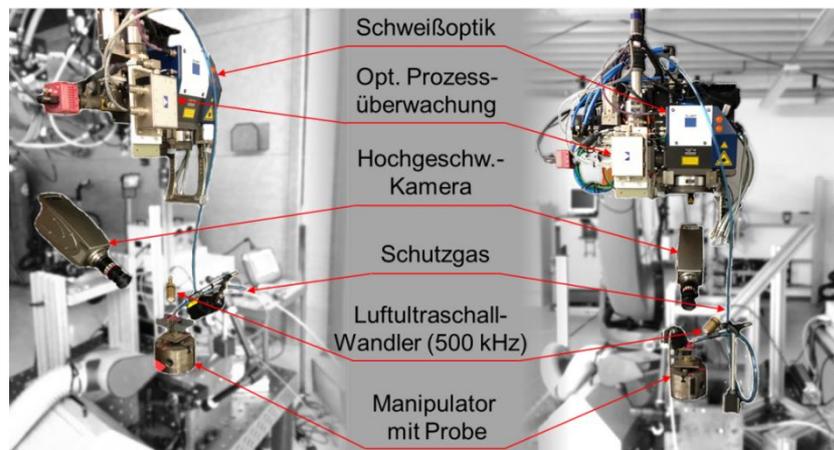
Ein systematischer Überblick der In-Process-Überwachungsverfahren beim Laserstrahlschweißen ist im Merkblatt DVS 3219 zusammengefasst [1]. Dazu gehören die optische und die akustische Überwachung von Prozessemissionen. Im industriellen Fertigungsumfeld (z.B. in der Automobilindustrie) werden vorwiegend optische Überwachungskonzepte eingesetzt. Dazu gehört der Einsatz von Photodioden, die in verschiedenen Wellenlängenbereichen sensitiv sind. Der Wellenlängenbereich der einfallenden Laserstrahlung (bei Festkörperlasern ca. 1000 nm) dient zur Ermittlung der vom Werkstück rückreflektierten Laserstrahlung. Eine Überwachung des Wellenlängenbereiches zwischen 400 nm und 600 nm liefert u.a. Aussagen über den abströmenden Metalldampf und die Plasmahelligkeit. Die Emissionen zwischen 1100 nm - 1800 nm sind der Temperatur des Schmelzbades bzw. der erstarrenden Schmelze zuzuordnen [2]. Um eine laterale Ortsauflösung bei der optischen Prozessüberwachung zu erreichen, ist auch der Einsatz von Kamerasystemen untersucht worden [3].

Auch die Überwachung des Schweißprozesses durch Erfassung akustischer Emissionen ist bekannt. Hier kann der Körperschall mittels am Werkstück angebrachter piezokeramischer Sensoren bis in den MHz-Bereich detektiert werden. Der in die Luft übertragene Schall des Schweißprozesses wird mittels Mikrofonen, welche im Hörschallbereich zwischen 20 Hz und 20 kHz empfindlich sind, erfasst und überwacht. Die Ursachen der akustischen Emissionen können das pulsierende Schmelzbad, die Metalldampfabströmung, die Entstehung eines laserinduzierten Plasmas, die Schwingung der Dampfkapillare, etc. sein [4].

### 2.2 *Versuchsmaterial*

Der Versuchsaufbau zur Erfassung der hochfrequenten Luftschallemissionen des Laserschweißprozesses ist in Abbildung 1 dargestellt. Als Laserstrahlquelle wurde ein Yb:YAG Festkörper-Scheibenlaser mit einer maximalen Laserleistung von 2 kW verwendet. Die verwendete Laserschweißoptik (PFO 33) hat einen Arbeitsabstand von ca. 530 mm und einen Fokusbereich von 600 µm. Es ist ein optisches

Prozessüberwachungspaket integriert, welches mittels Photodioden und koaxial im Strahlengang integrierter Kamera die Erfassung der elektromagnetischen Prozessemissionen als Referenz zur Luftschallauswertung erlaubt. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (max. 10.000 fps) können auch ortsauflösende Prozessbeobachtungen gemacht werden. Der Schweißprozess kann über eine externe Schutzgaszuführung auch unter inerter Argon-Atmosphäre durchgeführt werden. Die Erfassung der Luftschallemissionen erfolgt über einen am Fraunhofer IZFP entwickelten piezoelektrischen Luftultraschallwandler, welcher eine Nennfrequenz von ca. 500 kHz aufweist. Die Piezokeramik weist eine sphärisch gekrümmte Oberfläche auf, sodass eine konstruktive Fokussierung erreicht wird. Der Manipulator dreht die Schweißprobe mit zuvor eingestellter Schweißgeschwindigkeit.



**Abbildung 1: Versuchsaufbau zur In-Process-Überwachung der akustischen Luftschallemissionen (> 20 kHz) beim Laserstrahlschweißen**

Die hier vorgestellten grundlegenden Versuche wurden mit einem feuerverzinkten Kaltumformstahl (DX51) durchgeführt (vgl. Abbildung 5), wobei es sich bei der Laserschweißverbindung um eine Stumpfstoßverbindung handelt. Die Signale des Luftultraschallwandlers können mittels Vor- und Hauptverstärker um bis zu 120 dB verstärkt werden. Die Digitalisierung erfolgt mit einer Samplingrate  $F_S = 10 \text{ MS/s}$ . Zur Auswertung werden der zeitliche Verlauf des Signals sowie dessen Frequenzinhalt betrachtet. Die Short-Time-Fourier-Transformation (STFT) bietet eine Kombination der zeitaufgelösten Untersuchung der Frequenzinhalte eines Signals (vgl. Abbildung 6) und ist zur Auswertung der akustischen Luftschallemissionen besonders geeignet.

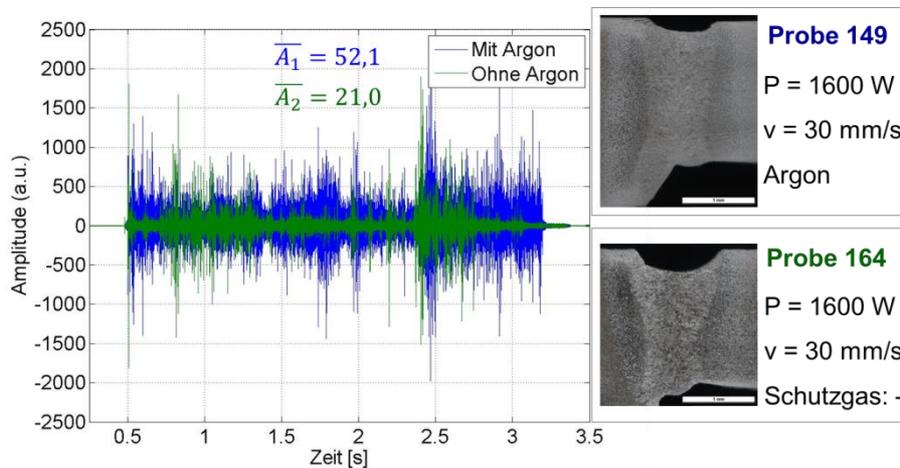
Zur ersten Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Prozessüberwachung durch Auswertung akustischer Luftschallemissionen (> 20 kHz) wurden verschiedene Einflüsse auf das Schweißergebnis und deren Korrelationen mit akustischen Emissionen betrachtet. Auszugsweise sollen hier der Schutzgaseinfluss (vgl. Abschnitt 2.3.1), der Einfluss der Variation der Laserleistung (vgl. Abschnitt 2.3.2) sowie die Überschweißung von vorher eingebrachten Bohrungen (vgl. Abschnitt 2.3.3) vorgestellt werden.

## 2.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

### 2.3.1 Schutzgaseinfluss

Abbildung 2, rechts zeigt den Einfluss von Argon auf die Laserschweißnaht (Probe 149) im Vergleich zum Schweißen ohne Argon (Probe 164). Beide Proben weisen sonst identische Schweißparameter auf. Der Querschliff zeigt, dass Probe 149 eine deutlich breiter ausgebildete Schweißnahtwurzel aufweist. Auch der Schweißnahteinfall ist hier nicht so deutlich ausgeprägt. Bei Betrachtung der Gesamprobe fällt auch die im Schnitt breitere

Schweißnaht bei Probe 149 auf. Es wurde also unter Argon-Atmosphäre bei sonst identischen Parametern insgesamt ein größeres Volumen aufgeschmolzen.



**Abbildung 2:** Links: Amplitude der akustischen Luftschallemissionen für einen Laserschweißprozess mit (blau) und ohne (grün) Schutzgas (Argon), Samplingrate  $F_s = 10$  MS/s; Rechts: Querschliffe der Proben 149 (mit Argon) und 164 (ohne Argon), Laserleistung  $P = 1600$  W, Schweißgeschwindigkeit  $v = 30$  mm/s, Werkstoff: DX51 mit Zinkbeschichtung;

In Abbildung 2, links sind die zeitlichen Amplitudenverläufe der Luftschallemissionen, welche mit dem 500 kHz-Ultraschallwandler für die Proben 149 (blau) und 164 (grün) aufgezeichnet wurden, abgebildet. Deutlich ist der Schweißprozessbeginn bei 0,5 s für beide Signalverläufe erkennbar. Das Schweißprozessende liegt bei ca. 3,2 s. Dies ist nur für Probe 149 scharf erkennbar. Die zeitlich darüber hinausreichenden Signale sind auf Umgebungsgeräusche, wie z.B. den Crossjet, zurückzuführen, welche erst mit einem zeitlichen Versatz zum Ende des Schweißprozesses abgeschaltet werden. Der Vergleich der Signale zeigt, dass das Schweißen mit Schutzgas im Mittel zu höheren Amplitudenwerten führt. Der Mittelwert  $\overline{A_1} = 52,1$  (Schweißen mit Argon) liegt deutlich über dem Mittelwert  $\overline{A_2} = 21,0$  (Schweißen ohne Argon). Der Vergleich der hier nicht dargestellten Frequenzspektren beider Signale zeigt, dass beim Schweißen mit Argon insgesamt ein größerer Frequenzinhalt, vor allem im Bereich unterhalb 250 kHz, zu verzeichnen ist.

In der Literatur [5], [6] sind verschiedene Effekte beim Laserstrahlschweißen unter Schutzgas-Atmosphäre beschrieben, welche ursächlich für die unterschiedlichen Luftschallemissionen sein könnten. Es hat sich gezeigt, dass durch die seitliche Zuführung von Schutzgas beim Laserschweißen von zinkbeschichteten Stahlblechen im Überlappstoß der abströmende Metall Dampf und die Schweißspritzer seitlich weggeblasen werden, so dass der einfallende Laserstrahl nicht so stark durch Interferenz, Absorption oder Streuung gestört wird, womit eine größere und vor allem konstantere Energiemenge zum Werkstück gelangen kann. Dadurch werden der Schweißprozess und die Ausbildung der Dampfkapillare stabilisiert. Weiter ist bekannt, dass durch Zumischung von  $O_2$  und  $CO_2$  zu Ar die Marangoni-Konvektion im Schmelzbad verändert, sogar umgekehrt werden kann. Wie diese oben beschriebenen bekannten Effekte beim Schweißen unter Schutzgasatmosphäre in Zusammenhang zu den gemachten Beobachtungen der Luftschallemissionen stehen, muss in weiterführenden Versuchsreihen geklärt werden.

### 2.3.2 Laserleistungseinfluss

Beim Laserstrahlschweißen ist mit Erhöhung der Leistungsdichte am Werkstück, z.B. durch Steigerung der Laserleistung, die Überschreitung einer charakteristischen Schwelle zwischen dem sog. Wärmeleit- und dem Tiefschweißen bekannt. Das Wärmeleitschweißen ist durch ein breites, flacheres Schmelzbad charakterisiert. Der größte Anteil des

Energietransports findet durch Wärmeleitung statt. Das Tiefschweißen ist durch die lokale Verdampfung des Werkstückes und die damit verbundene Bildung einer Dampfkapillaren gekennzeichnet. So können die Einschweißtiefe und damit auch der komplette Schweißnahtquerschnitt durch Mehrfachreflexionen der einfallenden Laserstrahlung sprunghaft ansteigen bis ggf. das Werkstück in seinem kompletten Querschnitt durchgeschweißt ist [7]. Diesen in der Literatur beschriebenen Verlauf gibt auch die gemessene Einschweißtiefe der Versuchsreihe 1 (vgl. Abbildung 3) wieder, bei der die Laserleistung schrittweise von 200 W auf 2000 W gesteigert wurde. Die Schwellleistung liegt hier bei etwa 600 W (rote Linie, Abbildung 3), eine Durchschweißung wird im Bereich zwischen 1100 und 1300 W (grauer Bereich, Abbildung 3) erzielt.

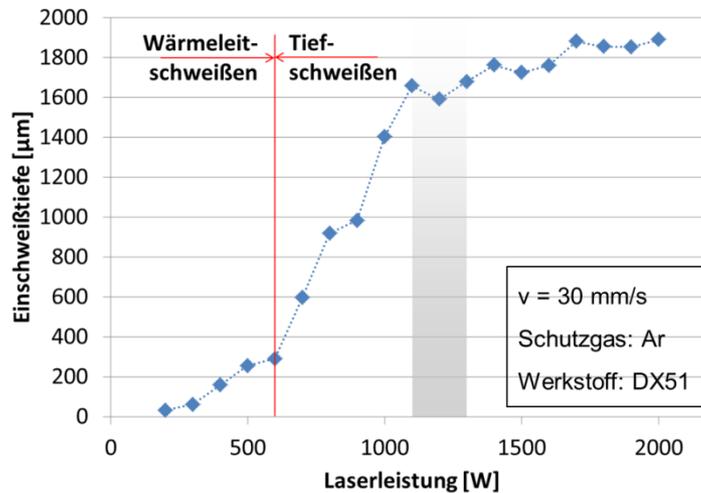


Abbildung 3: Einschweißtiefe in Abhängigkeit der Laserleistung für Versuchsreihe 1, Schweißgeschwindigkeit  $v = 30 \text{ mm/s}$ , Schutzgas Argon, Werkstoff: DX51 mit Zinkbeschichtung

Abbildung 4 zeigt die normierten Amplitudenmittelwerte der gemessenen akustischen Luftschallemissionen für Versuchsreihe 1. Es sind der Mittelwert des erfassten Rohsignals ( $A_{\text{mean,ges}}$ : rot) sowie die Mittelwerte aus der Short-Time-Fourier-Transformation (STFT, vgl. Abschnitt 2.3.3) für drei unterschiedliche Frequenzen (68 kHz: lila; 100 kHz: grün; 570 kHz: blau) in Abhängigkeit der Laserleistung dargestellt. Der Gesamtmittelwert, sowie die Amplituden der Frequenzbereiche 68 kHz und 100 kHz zeigen einen eher horizontalen Verlauf bei niedrigen Laserleistungen (200 W – 400 W) auf einem Niveau von 0,1 bzw. 0,3. Ab etwa 500 W ist ein Anstieg zu verzeichnen, welcher nach Überschreitung der Schwelle zwischen Wärmeleit- und Tiefschweißen deutlich zunimmt. Bei 800 W ist ein lokales Maximum zu finden. Bei weiterer Steigerung der Laserleistung sinken die Amplitudenwerte wieder ab. Im Bereich der Durchschweißung (1100 W – 1300 W) ist ein Plateau bei 0,2 (68 kHz), 0,35 (100 kHz) und 0,45 ( $A_{\text{mean,ges}}$ ) zu finden. Bei Steigerung der Leistung über 1400 W ist ein wiederum sprunghafter Anstieg der Werte für Gesamtmittelwert, 68 kHz und 100 kHz zu verzeichnen, wobei nach Überschreitung einer Laserleistung von 1600 W wiederum ein rascher Signalarückgang zu beobachten ist. Der Bereich hoher Laserleistungen ( $> 1700 \text{ W}$ ) ist durch einen horizontalen Signalverlauf auf etwa dem Niveau des Durchschweißungsbereiches gekennzeichnet. Der Verlauf des Mittelwertes bei 570 kHz unterscheidet sich von den anderen dargestellten Verläufen. Bei niedriger Laserleistung ist bereits ein relativ hoher Amplitudenwert von ca. 0,8 zu finden, welcher zunächst bei Erreichung der Laserleistung von 400 W auf 0,6 abnimmt. Nach Erreichung der Schwellleistung erreicht die 570 kHz-Linie ebenfalls ein lokales Maximum von 1,0. Bei weiterer Steigerung der Laserleistung ist ein mehr oder weniger linearer Rückgang bis zu einem Wert von ca. 0,5 bei 1900 W zu verzeichnen.

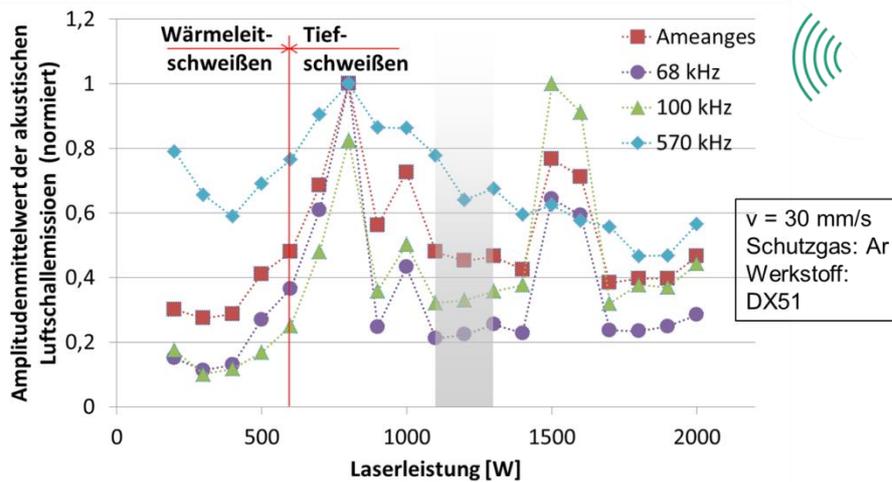


Abbildung 4: Amplitudenmittelwerte (normiert) der akustischen Luftschallemissionen in Abhängigkeit der Laserleistung für Versuchsreihe 1, Schweißgeschwindigkeit  $v = 30 \text{ mm/s}$ , Schutzgas Argon, Werkstoff: DX51 mit Zinkbeschichtung

Der sprunghafte Anstieg der akustischen Luftschallemissionen nach Erreichen der Tiefschweißschwelle kann auf die damit verbundene deutliche Zunahme des abströmenden Metalldampfes sowie auf die Bildung der Dampfkapillare und die damit einhergehende Zunahme des Pulsierens des Schmelzbades zurückgeführt werden. Das Absinken der Amplitudenwerte nach Erreichung der Durchschweißung könnte darauf zurückzuführen sein, dass durch die vollständig ausgebildete Dampfkapillare, welche das Werkstück in seiner gesamte Dicke durchzieht, auch Metalldampf nach unten hin abströmen kann. Weiter beruhigt sich das pulsierende Schmelzbad bei homogener Durchschweißung. Der zweite Anstieg der Amplitude bei weiterer Steigerung der Laserleistung kann bisher nicht zugeordnet werden. Hierzu sind weitere Versuchsreihen mit optimiertem Versuchsaufbau notwendig, um die Ursachen einzugrenzen.

### 2.3.3 Überschweißen von Bohrungen

Zur Bestimmung der Empfindlichkeit und Reaktionszeit sowie Veränderungen bei abruptem Zusammenbruch der Dampfkapillare und deren Neubildung im Hinblick auf die Prozessüberwachung durch Auswertung hochfrequenter akustischer Luftschallemissionen wurden Proben geschweißt, welche ein zuvor eingebrachtes Loch ( $\varnothing 1 \text{ mm}$ ) in der Fügelinie aufweisen. Die Nahtober- und Nahtunterseite für eine solche Probe ist in Abbildung 5 dargestellt.

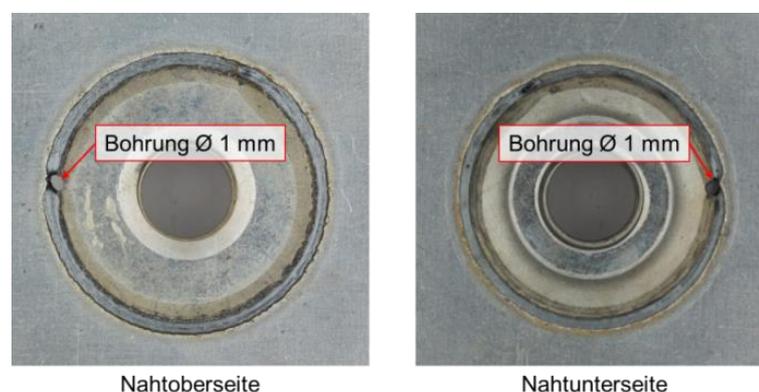
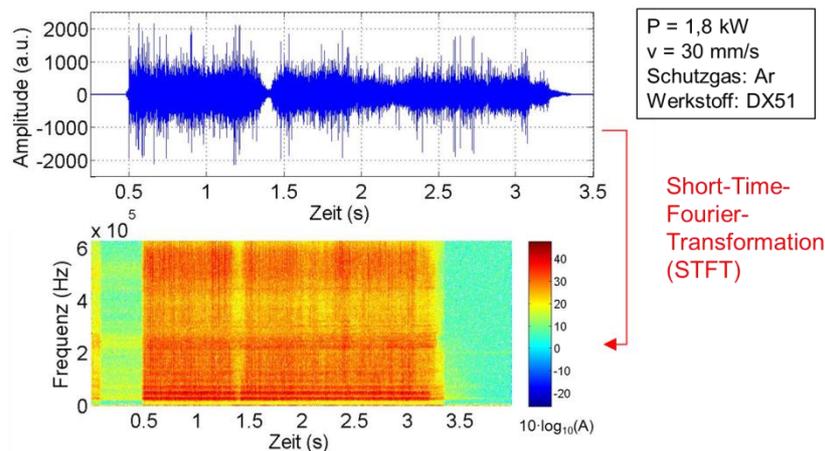


Abbildung 5: Nahtoberseite (links) und Nahtunterseite (rechts) einer geschweißten Probe mit vorher eingebrachter Bohrung ( $\varnothing 1 \text{ mm}$ ) in der Fügelinie, Laserleistung  $P = 1800 \text{ W}$ , Schweißgeschwindigkeit  $v = 30 \text{ mm/s}$ , Schutzgas Argon, Werkstoff: DX51 mit Zinkbeschichtung

Abbildung 6, oben zeigt den Signalverlauf der Amplitude der erfassten Luftschallemissionen des gesamten Schweißprozesses für die dargestellte Probe mit vorher eingebrachter Bohrung. Deutlich sind hier der Schweißbeginn bei 0,5 s und das Ende bei ca. 3,2 s vom Grundrauschen zu unterscheiden. Auch die überschweißte Bohrung ist bei ca. 1,4 s deutlich am Einbruch der Amplitude zu sehen. Das dargestellte Signal wurde mit Hilfe der Short-Time-Fourier-Transformation (STFT) sowohl im Frequenz- als auch im Zeitraum aufgelöst (vgl. Abbildung 6, unten), wobei die logarithmisch skalierte Amplitude farbcodiert dargestellt ist. Dadurch entsteht eine Art Prozesslandschaft, in welcher der Signaleinbruch über alle Frequenzbereiche beim Überschweißen der Bohrung deutlich wird. Weiterhin sind charakteristische Frequenzbänder (z.B. bei 210 – 230 kHz) erkennbar, welche den Umgebungsgeräuschen (v.a. dem Crossjet) zuzuordnen sind.

Die STFT zeigt, dass der Einbruch der Amplituden im Frequenzbereich unterhalb von 100 kHz zeitlich deutlich kürzer ist, als im höherfrequenten Bereich, beispielsweise bei 550 kHz. Er liegt bei 50 kHz in etwa bei einer Zeitdauer von 1/30 s, welche dem Überschweißen der 1 mm Bohrung bei einer Schweißgeschwindigkeit von 30 mm/s entspricht. Im Bereich von 550 kHz ist der Signaleinbruch symmetrisch zur tatsächlichen Fehlerstelle breiter. Das Signal bricht also schon vor dem Erreichen zusammen und baut sich auch erst mit einem gewissen Zeitversatz nach dem Überschweißen der Bohrung wieder auf.



**Abbildung 6:** Oben: Zeitsignal der akustischen Luftschallemissionen der in Abbildung 5 dargestellten Probe, Samplingrate  $F_s = 5$  MS/s; Unten: Short-Time-Fourier-Transformation des oben dargestellten Zeitsignals mit logarithmisch skalierten Amplituden

Eine mögliche Ursache des unterschiedlichen zeitlichen Signalverlaufes bei 50 kHz und 550 kHz können die bereits vor Erreichen der Bohrung stattfindende Änderung in der Schmelzbadströmung, welche die Dampfkapillare umgibt, sein. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen auch, dass sich bei der Annäherung des Laserschweißspots an die Bohrung die Dampffackel in Schweißrichtung nach vorne neigt, was auch ursächlich für den unterschiedlichen Signaleinbruch sein kann. Da eine Wärmefront der Dampfkapillare vorausläuft, welche bereits vorlaufend Beschichtungsstoffe lokal verdampft, deren Abströmung wiederum zu einem akustischen Signal führt, könnte auch dies eine mögliche Ursache sein. Weiterführende Versuchsreihen sollen diese hier gemachte Einzelbeobachtung verifizieren.

### 3. Post-Process-, Offline-Verfahren

#### 3.1 Stand der Technik

Die Merkblätter DVS 3210 [1] und 3219 [8] enthalten einen Überblick der zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfverfahren für Laserschweißnähte. Zur Messung äußerer Geometriemerkmale einer Laserschweißnaht (Schweißnahtbreite, -einfall, etc.) werden industriell häufig optische Systeme (z.B. Lichtschnittverfahren, Lasertriangulation) eingesetzt [9]. Zur Vermessung innenliegender Geometriemerkmale, z.B. der Schweißnahtbreite im Fügequerschnitt bei einer Überlappverbindung, muss die Probe bisher zerstörend mittels metallografischer Analyse untersucht werden.

Zur Prüfung einer Laserschweißnaht auf Fehlstellen (Poren, „Falsche Freunde“, etc.) kommen wiederum die in den Merkblättern (s.o.) beschriebenen Prüfverfahren in Frage. Es sind u.a. Ansätze mittels aktiver Thermografie bekannt [10]. Auch die Wirbelstromprüfung wird in der Literatur beschrieben [11]. Weiter sind Ultraschallprüfverfahren zur Detektion von Fehlstellen in Tailor-Welded-Blanks dokumentiert [12].

#### 3.2 Versuchsmaterial

Zur Validierung der Hochfrequenz-Ultraschallprüfung wurden Laserschweißproben mit der gleichen Laserstrahlquelle hergestellt, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben. Die verwendete Schweißoptik (BEO D70) weist einen Fokusbereich von 200  $\mu\text{m}$  und einen Arbeitsabstand von ca. 170 mm auf. Bei dem Probenmaterial handelt es sich um einen pressgehärteten ultrahochfesten Stahl (22MnB5) mit einer Einzelblechdicke von 1,3 mm. Die Schweißproben wurden mittels Überlapp-I-Naht unter Variation der Stellparameter des Schweißprozesses (Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit, Fokusbereich, etc.) gefügt. Die so systematisch erstellten Proben wurden im Anschluss mittels automatisierter Hochfrequenz-Ultraschallprüfung (Prüfkopfnennfrequenz 75 MHz) in Tauchtechnik untersucht. Diese Prüfmethode wurde mittels optischen und metallografischen Referenzverfahren im Hinblick auf die Vermessung von Geometrieigenschaften und der Detektion von Fehlstellen validiert.

#### 3.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

##### 3.3.1 Geometrieigenschaften

Abbildung 7 zeigt die mittlere Abweichung der Messung mittels Hochfrequenz-Ultraschall in Tauchtechnik im Vergleich zur optischen bzw. metallografischen Messung im Querschliff. Die Schweißnahtbreite weicht bei einem Gesamtmessbereich zwischen 580  $\mu\text{m}$  und 2350  $\mu\text{m}$  um ca. 83  $\mu\text{m}$  vom Messwert des Referenzverfahrens ab. Eine Abweichung von ca. 70  $\mu\text{m}$  bei einem etwas kleineren Messbereich zwischen 390  $\mu\text{m}$  und 1440  $\mu\text{m}$  wurde für die Wurzelbreite festgestellt. Die Abweichung für die Bestimmung von Schweißnaht- und Wurzeleinfall bzw. -überhöhung liegt in etwa bei 17  $\mu\text{m}$ . Die Messbereiche sind hier kleiner als bei der Breitenbestimmung. Sie reichen von -370  $\mu\text{m}$  (Einfall) bis zu 230  $\mu\text{m}$  (Überhöhung) bei der Schweißnaht sowie von -110  $\mu\text{m}$  (Einfall) bis 340  $\mu\text{m}$  (Überhöhung) auf der Wurzelseite. Auch die zerstörungsfreie Bestimmung der Schweißnahtbreite im Fügequerschnitt kann mittels Hochfrequenz-Ultraschallprüfung in Tauchtechnik erfolgen. Im Vergleich zum zerstörend gemessenen Wert ergibt sich eine mittlere Abweichung von ca. 60  $\mu\text{m}$  bei einem Messbereich zwischen 360  $\mu\text{m}$  und 1350  $\mu\text{m}$ . Ein weiterer wichtiger Parameter bei Überlappverbindungen ist das Spaltmaß der

Fügepartner, vor allem im Hinblick auf die Entstehung von Bindefehlern. Dieses ist auch mittels Ultraschalltechnik mit einer mittleren Abweichung von ca. 18 µm im Vergleich zur zerstörenden Prüfung messbar.

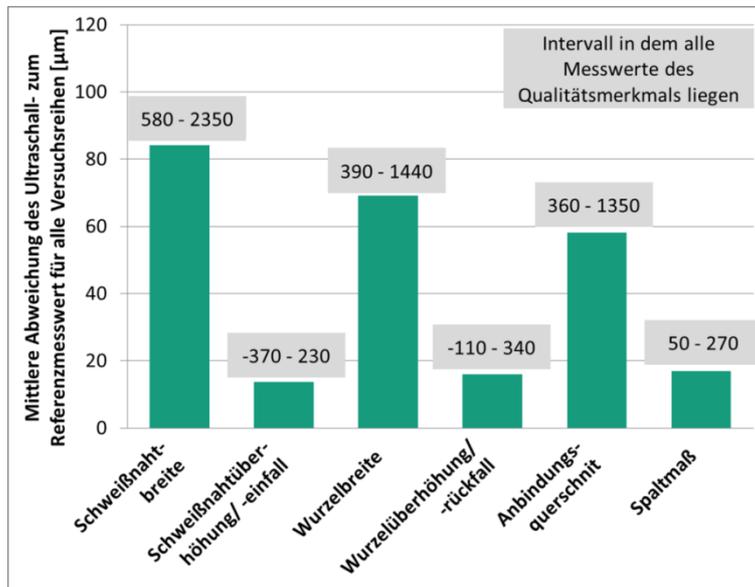


Abbildung 7: Mittlere Abweichung des Ultraschall- zum Referenzmesswert für verschiedene geometrische Merkmale einer lasergeschweißten Überlapp-I-Naht

Anhand der oben beschriebenen Abweichungen der Messwerte der Ultraschallprüfung im Vergleich zu den eingesetzten Referenzmessverfahren ist festzustellen, dass das Ultraschallprüfverfahren geeignet ist, um äußere und innere Geometriemerkmale mit relativ geringen Abweichungen zu bestimmen.

### 3.3.2 Fehlstellen

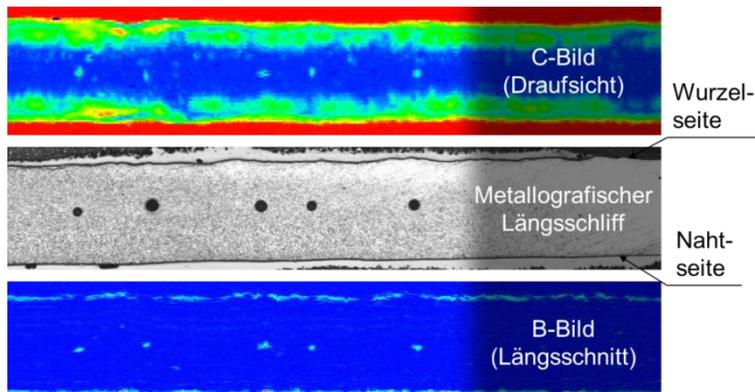


Abbildung 8: Mitte: Längsschliff einer Porenzeile (Porendurchmesser 0,2 – 0,4 mm) in einer lasergeschweißten Überlapp-I-Naht; Oben: C-Bild der Hochfrequenz-Ultraschallprüfung mit lateraler Porenlage; Unten: B-Bild der Hochfrequenz-Ultraschallprüfung mit Tiefenlag der Poren

Die beschriebene Hochfrequenz-Ultraschallprüfung in Tauchtechnik konnte auch zur Prüfung auf Fehlstellen in der Schweißnaht validiert werden. Abbildung 8 zeigt eine Porenzeile im metallografischen Längsschliff (Mitte). Die Porengröße liegt zwischen 0,2 mm und 0,4 mm bei einem gesamten Fügequerschnitt von 2,6 mm. Das Ultraschall-B-Bild (vgl. Abbildung 8, unten) zeigt einen deutlichen Kontrast für alle fünf Poren. Über die Laufzeiten der Ultraschallsignale lässt sich die Tiefenlage ermitteln, alle Poren liegen in der Fügeebene des Überlappstoßes. Im C-Bild (vgl. Abbildung 8, oben) ist die laterale Lage der Poren erkennbar. Die Fehlstellen befinden sich mittig in der Schweißnaht.

#### 4. Zusammenfassung, Ausblick

Die Erfassung hochfrequenter Luftschallemissionen oberhalb der Hörschallschwelle liefert ergänzend zu den gängigen optischen Verfahren Informationen für den Laserschweißprozess. Es konnten in einem ersten einfachen Versuchsaufbau Korrelationen zur Verwendung von Schutzgas, zur Laserleistung sowie Effekte beim Überschweißen von Bohrungen herausgearbeitet werden. Damit bietet sich das Potential dieses Verfahren für eine Prozessüberwachung einzusetzen. Um dies zu erreichen, soll zunächst ein speziell adaptierter Versuchsaufbau gemacht werden, mit welchem eine exakte Positionierung des Ultraschallwandlers ermöglicht wird. Dadurch soll versucht werden, die gemachten Beobachtungen besser zuzuordnen sowie eine Reproduzierbarkeit zu erreichen.

Die Hochfrequenzultraschallprüfung konnte im Hinblick auf eine schnelle Post-Process bzw. Offline-Bestimmung der Schweißnahtqualität validiert werden. Es ist ein schnelles und effizientes Tool zur Bestimmung von äußeren und inneren Geometriemerkmale einer lasergeschweißten Überlapp-I-Naht. Auch Fehlstellen, wie zum Beispiel Poren, lassen sich hinsichtlich ihrer Lage erfassen. Dadurch kann eine gute von einer schlechten Schweißnahtqualität unterschieden werden, was einen Rückschluss auf die Stellparameter des Laserschweißprozesses erlaubt. Damit können im Vorserienanlauf oder im Musterbau die optimalen Schweißparameter schneller im Vergleich zu zerstörenden Verfahren ermittelt werden.

#### Referenzen

- [1] DVS 3219, 2005 11: Qualitätssichernde Sensorik während des Laserstrahlschweißens.
- [2] Eriksson, I. (2011): Optical monitoring and analysis of laser welding. Licentiate Thesis. Luleå University of Technology.
- [3] Müller-Borhanian, Jürgen (2009): Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen. München: Utz, Wiss.
- [4] Huang, W. (2010): Investigation of sensing, monitoring and control issues in welding process. Dissertation. Southern Methodist University, Dallas. School of Engineering.
- [5] Daub, Rüdiger (2012): Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen. München: Utz (Forschungsberichte IWB, 263).
- [6] Yang, S.; Carlson, B.; Kovacevic, R. (2011): Laser Welding of High-Strength Galvanized Steels in a Gap-Free Lap Joint Configuration under Different Shielding Conditions. In: *The Welding Journal* 2011 (90), S. 8-s - 18-s.
- [7] Ruß, Andreas (2006): Schweißen mit dem Scheibenlaser. Potentiale der guten Fokussierbarkeit. München: Utz, Wiss.
- [8] DVS 3210, 2007 07: Prüfverfahren zur Qualitätssicherung von Elektronenstrahl- und Laserschweißnähten.
- [9] Dorsch, F.; Braun, H.; Keßler, S.; Magg, W.; Pfitzner, D.; Plaßwich, S. (2012): Process Sensor Systems for Laser Beam Welding. In: *LTJ* 9 (3), S. 24–28.
- [10] Hierl, T. (2011): Laser welding & heat flux thermography. In: *LTJ* 8, 2011 (3), S. 54–57.
- [11] Zösch, A.; Seidel, M. (2006): Non destructive testing of laser-welded lap seams by eddy current technique. In: 9th European Conference on NDT. ECNDT Berlin 2006 ; September 25 - 29, 2006. Berlin.
- [12] Salzburger, H. J.; Hübschen, G.; Niese, F. (2004): Dry UT by Guided Shear Horizontal Using EMAT's. 16. World Conference on Nondestructive Testing. Montreal, 16.08.2004.

#### Kontakt Daten

Matthias Bastuck  
Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)  
Prozessüberwachung und -beherrschung  
Campus E3.1  
66123 Saarbrücken  
Tel.: +49 (681) 9302 - 3659  
E-Mail: [matthias.bastuck@izfp.fraunhofer.de](mailto:matthias.bastuck@izfp.fraunhofer.de)