

Einsatz einer körperschallbasierten In-Prozess-Sensorik zur Identifizierung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten beim Elektronenstrahlschweißen

Christian WOLF¹, Igor KRYUKOV¹, Michael WIEGAND¹, Stefan BÖHM¹

¹ Universität Kassel - Fachgebiet für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren, Kassel

Kontakt E-Mail: c.wolf@uni-kassel.de

Kurzfassung.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird das Potential der körperschallbasierten Schallemissionsprüfung während des Elektronenstrahlschweißens zur Detektion von Schweißnahtunregelmäßigkeiten vorgestellt. Dazu wurden die Fügepartner aus unterschiedlichen Werkstoffen im Stumpfstoß miteinander verschweißt und die Prozessgeräusche mittels Körperschallsensoren aufgezeichnet. Bei den Schweißversuchen wurden typische Unregelmäßigkeiten (z. B. unvollständige Durchschweißung, Risse) eingebracht und untersucht. Im Anschluss wurden die akustischen Signale hinsichtlich fehlerspezifischer Auffälligkeiten untersucht und mit den Ergebnissen der zerstörenden Prüfung (u. a. Querschliffe) korreliert.

1. Einleitung

Aufgrund der hohen erreichbaren Nahtqualität (geringes Nahtfehleraufkommen, minimaler Energieeintrag, minimaler Schweißverzug) und der endkonturnahen Fertigungsmöglichkeit wird das Elektronenstrahlschweißen (EB) häufig innerhalb der letzten Fertigungsschritte einer Produktionskette eingesetzt [1]. Die Nutzung der vollautomatisierten Fertigung kann hierbei durch nicht detektierte Prozessschwankungen zu folgenschweren Produktionsausfällen führen. Aus wirtschaftlicher Sicht fordern die Anwender der EB-Technologie eine grundsätzliche Reproduzierbarkeit durch maximale Prozessstabilität. Die Anforderungen an Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit wachsen allerdings mit immer komplexeren Fügeaufgaben und erfordern so immer konstantere Randbedingungen.

Trotz der Tatsache, dass beim Elektronenstrahlschweißen alle Prozessparameter als gut mess- und protokollierbare elektrische Größen (Strahlstrom, Linsenstrom, Beschleunigungsspannung usw.) vorliegen, kann allein aus der Erfassung dieser Parameter nicht auf eine hinreichende Qualität der erzeugten Schweißnaht geschlossen werden. Neben der nicht ausreichenden Entmagnetisierung mit unzulässiger Strahlablenkung können kathodeninduzierte Schweißnahtunregelmäßigkeiten zu einer ungewollten und derzeit nicht erfassbaren Abweichung in der Schweißnahtqualität führen. Auch Fehler bei der Nahtkantenvorbereitung und bauteil- oder werkstoffbedingte Prozesseinflüsse, die zu Poren oder Rissen führen, können über die Parameterüberwachung der EB-Schweißanlage nicht oder nur unzureichend detektiert werden. Die bisherige, mangelnde Detektierbarkeit führt



dazu, dass bei steigendem Automatisierungsgrad der nachgelagerte Prüfaufwand deutlich erhöht werden muss. Diese Erhöhung geht zwangsläufig mit gesteigerten Kosten pro Bauteil und/oder einer geringeren Produktivität einher. Auch die Forderung vieler Kunden nach einer lückenlosen Dokumentation des Schweißprozesses inklusive einer Qualitätsprüfung sind für das Elektronenstrahlschweißen bislang nur über nachgelagerte Prüfmethoden realisierbar, mit oben genannten Folgen für Kosten und Produktivität. Aus diesen Gründen ist die Forderung der Industrie nach prozessparallelen In-Line-Prüfsystemen aktueller denn je.

Ein vielversprechender Ansatz zur Prozessüberwachung ist dahingehend die Nutzung der Schallemission des Schweißprozesses zur Qualitätsbeurteilung. Bedingt durch das Vakuum in der Arbeitskammer der Elektronenstrahl-Schweißanlage ist eine Ausbreitung von Luftschall nicht möglich, jedoch können Körperschallsignale ausgewertet werden. Eine Schallüberwachung ermöglicht zudem auch die Detektion metallurgisch bedingter Fehler wie beispielsweise Risse oder Schmelzbadauswürfe. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit von Körperschallaufnehmern ist, im Vergleich zu optischen Systemen, auch die Prozessüberwachung sehr kleiner Schmelzbäder (beispielsweise beim Mikro-Elektronenstrahlschweißen) möglich.

2. Stand der Technik

Im Nachfolgenden soll ein Überblick über den Stand der Technik und die aktuellen Erkenntnisse und Problematiken, die bei der Prozessüberwachung beim Elektronenstrahlschweißen auftreten, beschrieben werden.

Inline-Prüfungen von Schweißprozessen gehören schon seit Jahren zum Stand der Technik. Bei verschiedenen Lichtbogenschweißverfahren kann über die elektrischen Ströme und Spannungen eine direkte Korrelation zum Prozess (u. a. Kurzschluss, Tropfenablösung) hergestellt werden. Auch optische Verfahren über Kameras o.ä. können aufgrund der großen Schweißzone relativ einfach Auffälligkeiten im Lichtbogen oder der Schmelze feststellen [2]. Die Inline-Prüfung von Strahlschweißprozessen stellt sich jedoch ungleich schwieriger dar, da die elektrischen Parameter im Strahlerzeuger nur eine indirekte Korrelation zum Prozess erlauben. Weiterhin sind die entstehenden Schmelzbäder erheblich kleiner und tiefer, der Energieeintrag ist wesentlich fokussierter und auch die Abkühlraten sind deutlich höher. Die Überwachung eines Strahlschweißprozesses geht daher im Regelfall mit einer Erfassung von Prozessemissionen einher, welche vom Prozess selbst ausgehen. Typische Verfahren der nachgelagerten zerstörungsfreien Prüfung, wie die Durchstrahlungsprüfung, können in der Industrie in der Regel nicht während eines Schweißprozesses durchgeführt werden [3]. Prinzipiell gehen von Schweißprozessen verschiedene Emissionen in Form von Schallwellen, elektromagnetischen Wellen sowie Partikeln aus, von denen sowohl die akustischen als auch die elektromagnetischen Emissionen zur Erfassung von Prozessereignissen genutzt werden können.

Weiterhin kann die Abbildung der Werkstückoberfläche mittels Rückstreuelektronen (oft elektronenoptischer Einblick oder ELO-Monitoring genannt) genutzt werden, um oberflächliche Risse oder andere Inhomogenitäten zu detektieren. Auch das Signal einer oftmals eingebauten CCD-Kamera kann zur Detektion von Schweißnahtfehlern (z. B. Risse) genutzt werden, wobei der Kontrast und die Auflösung solcher Kamerabilder dem elektronenoptischen Abbild oft unterlegen sind. Zudem sind diese Prozesse, bis auf die Überwachung der Anlagenparameter, keine wirklichen In-Line-Prozesse, da zur Erkennung von oberflächlichen Defekten eine dem eigentlichen Prozess nachgelagerte Abbildung der Nahtoberfläche erfolgt. Eine Ausnahme davon ist das „ELO-Online“ genannte Verfahren, bei dem mittels schneller Strahlableitung der Elektronenstrahl die Schweißstelle für wenige Millisekunden verlässt, um ein Bild der Schweißstelle mit Umgebung aufzunehmen. [4]

Auch wenn der Elektronenstrahl die Schweißstelle nur für einen sehr kurzen Zeitabschnitt, verglichen mit der Schweißzeit, zur Bildgebung verlässt, kann eine Rückwirkung auf den Prozess nicht ausgeschlossen werden. Auch lassen sich Erstarrungsrisse oder unerwünschte, im Material auftretende Unregelmäßigkeiten wie Poren, Risse oder Wurzelspiking, nicht detektieren.

Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung der entstehenden Röntgenstrahlung zur Prozessüberwachung. Ähnlich wie bei den Rückstreuelektronen lassen sich durch Auswertung der Strahlungsintensität Rückschlüsse auf die Fokusslage im Prozess oder die Position des Strahls relativ zur Schweißfuge ermitteln [5]. Weitere Schweißnahtunregelmäßigkeiten während des Elektronenstrahlprozesses können nach dem aktuellen Stand der Forschung noch nicht hinreichend detektiert werden. Gleiches gilt für die Auswertung des Bauteil- und Durchtrittstroms. Während hier eine saubere Durchschweißung (und damit indirekt auch eine korrekte Fokusslage) erkannt werden können, kann eine große Zahl weiterer Unregelmäßigkeiten (z. B. Poren, Risse, Bindefehler) nicht detektiert werden.

Optische Verfahren, welche die infrarote Strahlung des Prozesses und der Schmelze auswerten, können Poren oder Lunker detektieren, da bei deren Entstehung ein kurzzeitiger Signalabfall zu beachten ist. Allerdings hat sich die optische Prozessüberwachung innerhalb der Arbeitskammer nicht als langfristig zielführend herausgestellt, da eine Metallbedampfung von beispielsweise optischen Linsen bereits nach wenigen Sekunden bis Minuten der Schweißzeit stattfindet, die Signale signifikant beeinflusst [6] sowie die Prozesseigenschaft des Elektronenstrahls trägheitsfrei „zu springen“ einer optischen Auswertung entgegensteht.

Zur Überwachung des Elektronenstrahlschweißprozesses wurde in verschiedenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen die Schallemissionsanalyse verwendet. Aufgrund des Vakuums in der Arbeitskammer einer Elektronenstrahlschweißanlage gibt es keine Ausbreitung von Luftschall, weshalb immer der Körperschall aufgenommen und ausgewertet wurde. Erste Untersuchungen wurden dazu bereits 1973 von Steffens und Crostack durchgeführt, wobei hier insbesondere auftretende Frequenzen und deren Abhängigkeit von Laufwegen im Metall untersucht wurden (Schallemission Grundlagenveröffentlichung, kein Bezug zum EB Schweißen) [7]. Hierbei wurde das Körperschallsignal im Sinne einer Laufzeitmessung genutzt, um eine Aussage über die Position der Schallquelle zu erhalten. Erste Anwendungen beim Elektronenstrahlschweißen fanden 1975 statt [8]. Es wurden hierbei vier Arten von Körperschallsignalen unterschieden: Geräusche aus dem Schweißprozess (Phasenumwandlung, plastische Verformung und Rissbildung), Geräusche aus der Anlage (z. B. Antriebe), Kombinationsgeräusche aufgrund der Interaktion von Werkstück und Anlage (z. B. Reibung oder Temperatureinflüsse aufgrund der Wärmeausdehnung) und Störgeräusche aus der Umgebung, die die Autoren durch einen Hochpassfilter bei 50 Hz ausgeblendet haben [9]. Eine Zuordnung des Körperschallsignals zu einzelnen Ursachen (Schweißunregelmäßigkeiten) erfolgte aufgrund der fehlenden Auswertungsmöglichkeiten nicht. Etwa zeitgleich wurden in der Sowjetunion Schallemissionsanalysen durchgeführt, bei denen eine Rissbildung während und nach dem Schweißprozess detektiert werden konnte [10, 11].

Alle Körperschallanalysen aus den 70iger Jahren haben die Gemeinsamkeit, dass jeweils „nur“ Laufzeiten und Amplituden ausgewertet wurden. Die Möglichkeit in Echtzeit während des Prozesses eine Frequenzanalyse durchzuführen, war aufgrund fehlender Hard- und Software-Unterstützung nicht möglich. Hierdurch war auch eine Signal-Unregelmäßigkeit-Zuordnung nur sehr unspezifisch möglich.

Crostack et al. gelang es 1998 mit verbesserten Körperschallsensoren und neuerer Aufnahmetechnik den Entstehungsort von Schallereignissen (in diesem Fall: Riss in der Schweißnaht) mit einer hohen Genauigkeit ohne jegliches Wissen über die Schallgeschwindigkeit der Schweißwerkstoffe zu lokalisieren [12, 13]. Eine Zuordnung der

Schallsignale zu Fehlern erfolgte nicht. Aktuellere Untersuchungen auf dem Gebiet bestätigen die genannten Erkenntnisse [14]. Hier konnten eindeutige Aussagen zur Einschweißtiefe (Durchschweißung ja/nein) und zur Rissbildung beim Schweißen von Ti6Al4V getätigt werden, wobei lediglich die Amplitudensignale ausgewertet wurden. Die Unregelmäßigkeiten selbst wurden nicht während der Schweißphase detektiert, sondern nur solche Unregelmäßigkeiten, die nach dem Prozess während der Erstarrungsphase auftraten.

Während sich in den 70er und 80er Jahren des 20. Jahrhunderts getätigte Untersuchungen eine prinzipielle Machbarkeit zeigen, sich die Auswertung durch fehlende PC-Unterstützung aber schwierig darstellt, so ist in neueren Forschungsarbeiten durchaus eine verbesserte Auswertung durch PC-Unterstützung erkennbar.

Grundsätzlich ist die Schallemissionsanalyse bzw. das akustische Prozessmonitoring nach dem Stand der Forschung als ein gut geeignetes Verfahren zur Prozessüberwachung anzusehen, da sich der Entstehungsort einer Unregelmäßigkeit lokalisieren lässt und sich dem Signal auch Informationen entnehmen lassen, welche anhand bestimmter Merkmale dem Anwender die Ursachenfindung erleichtern. Eine konkrete Korrelation zwischen Schweißnahtunregelmäßigkeiten und Schallereignissen wurde bislang in diesem Zusammenhang noch nicht hergestellt. Aussagen aus den Schalldaten, um welche Fehler es sich handelt und ob aufgrund der Fehlergröße, -art und -lage eine fehlerhafte Schweißnaht vorliegt, sind bisher nicht erfolgt.

3. Versuchsaufbau und Arten der Unregelmäßigkeiten

Nachfolgend werden die Randbedingungen zur Schallemissionsmessung sowie der Versuchsaufbau erläutert. Des Weiteren werden die zu untersuchenden Fehlerarten sowie deren Einbringungsmethode beschrieben. Zur Erfassung der Prozessgeräusche während des Elektronenstrahlschweißens sind einige Rahmenbedingungen zu beachten. Zum einen findet der Schweißprozess im Vakuum statt, so dass nur ein Körperschallbasiertes Messsystem verwendet werden kann. Zum anderen sollen zur Reduzierung von Schallverlusten möglichst wenige Trennebenen zwischen dem Fügepart und dem Körperschallsensor vorhanden sein. Da der Frequenzbereich des während des Schweißprozesses emittierten Schalls bisher nicht bekannt ist, soll ein möglichst breites Frequenzspektrum abgedeckt werden. Weiterhin muss die Größe des Sensors berücksichtigt werden, da die Vakuumkammern von Elektronenstrahlanlagen nur so groß ausgelegt sind, wie für die Schweißaufgabe benötigt wird. Dadurch werden lange Evakuierungszeiten vermieden. Aus den genannten Rahmenbedingungen und den verwendeten Anlagentechniken ergibt sich folgende Versuchskonfiguration.

Für die Schweißversuche wird eine Mikro-Elektronenstrahlanlage vom Typ SEM 108 der Firma pro-beam eingesetzt. Als Körperschallsystem kommt ein Messsystem der Firma Vallen Systeme zum Einsatz. Da der vom Elektronenstrahlschweißen emittierte Frequenzbereich bisher noch unbekannt ist, werden 2 Sensoren zur Erfassung der Prozessgeräusche verwendet. Der erste Sensor ist ein niederfrequenter Sensor, der eine hohe Sensitivität im Frequenzbereich von 20 bis 85 kHz aufweist. Der zweite Sensor ist ein Breitbandsensor, der den Frequenzbereich von 50 kHz bis 1 MHz abdeckt [15, 16]. Durch die Verwendung der beiden Sensoren ist es möglich, ein breites Frequenzspektrum zu erfassen. Zur Vermeidung von Signalverlusten durch Materialübergänge werden beide Körperschallsensoren direkt auf der Spannvorrichtung befestigt.

In Abbildung 1 ist die Spannvorrichtung innerhalb der Elektronenstrahlanlage dargestellt. Mit Hilfe der Spannvorrichtung können unmittelbar nacheinander zwei Schweißungen durchgeführt werden. Die verwendeten Schallsensoren werden durch Spannleisten direkt auf der Spannvorrichtung befestigt. Durch die direkte Positionierung auf

der Spannvorrichtung ist nur eine Übergangsfläche vorhanden. Als Kontaktmittel wird ein Vakuummittel mit einer Beständigkeit bis 10^{-6} mbar verwendet. Um eine gleichbleibende Position und damit auch eine möglichst gute Reproduzierbarkeit der Sensorpositionierung auf der Spannvorrichtung zu erhalten, wurden in die Spannleisten kreisförmige Aussparungen ausgefräst. Der Anpressdruck zwischen Schallsensor und Vorrichtung kann über das Anzugsmoment der Schrauben eingestellt werden.

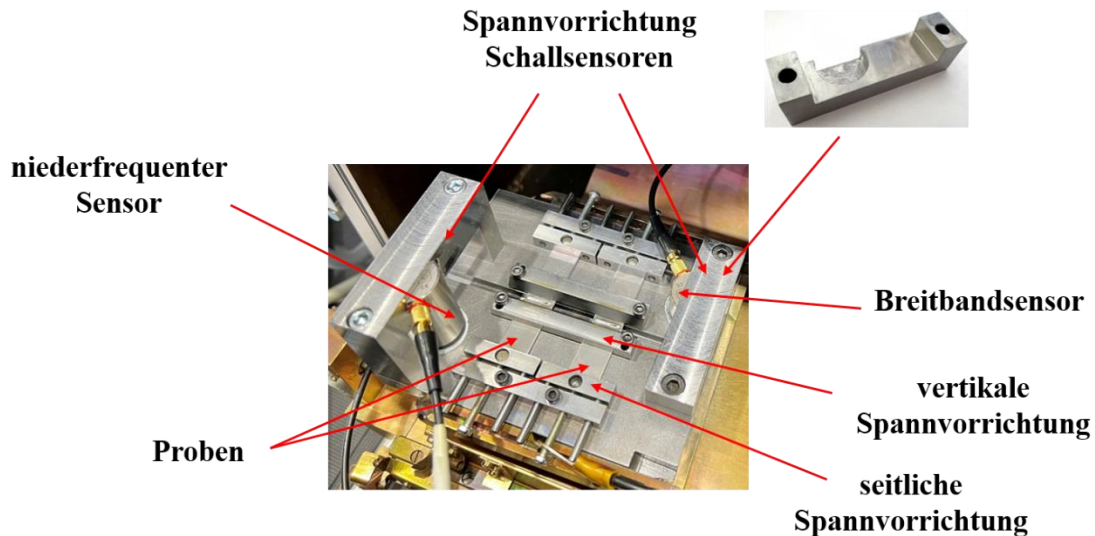


Abbildung 1: Übersicht der Spannvorrichtung in der Elektronenstrahlanlage

Das für die Versuche verwendete Probenmaterial weist die Größe 25 x 12,5 mm auf. Als Werkstoff wurde ein nichtrostender Stahl (X5CrNi18-10, 1.4301) in der Stärke 1 mm sowie eine Aluminiumlegierung (AlMg3, 3.3535) in der Stärke 1,5 mm verwendet. Die Schweißverbindungen wurden jeweils artgleich miteinander verschweißt. Die Proben wurden entlang der kurzen Kante gefügt. Um die für das Elektronenstrahlschweißen notwendige Nahtkantenvorbereitung zu erhalten, wurden die Proben entlang der Fügekante erodiert. Durch das Erodieren kann ein technischer Nullspalt, der für das Strahlschweißen notwendig ist, gewährleistet werden.

Mit Hilfe des In-Line Schallemissionssystems sollen relevante Unregelmäßigkeiten detektiert werden können. Um jedoch die fehlerspezifischen Klangsignaturen identifizieren zu können, müssen die industrierelevanten Unregelmäßigkeiten reproduzierbar nachgebildet werden können. In der nachfolgenden Tabelle sind die zu untersuchenden Fehlerarten mit der Einbringungsmethode dargestellt. Zur Einbringung von Rissen, wird beispielsweise ein rissanfälliger Werkstoff verwendet, der bei einem zu geringen Energieeintrag aufgrund von zu hohen Abkühlgeschwindigkeiten zu Rissen neigt. Porenester bzw. Porenzeilen sollen durch Verunreinigung von gasenden Werkstoffen an der Fügekante erzeugt werden. Weiterhin sollen beispielsweise unvollständige Durchschweißungen durch Reduktion der Streckenenergie bzw. durch Defokussierung des Elektronenstrahls in die Tiefe erzeugt werden. Durch diese Maßnahmen wird der Tiefschweißeffekt reduziert, wodurch eine unvollständige Durchschweißung resultiert. Die weiteren Fehlerarten und deren Einbringungsmethode sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht der zu untersuchenden Fehlerarten und Einbringungsmethoden

Fehler	Methode
Riss	Rissgefährdeten Stahl mit zu geringem Energieeintrag (kein Vorw.) schweißen
Poren (-nester und -zeilen)	Einlegen / Einbringen von gasenden Werkstoffen oder Fremdstoffen (Al, Fett)
Lunker	Mechanische Präparation der Stoßkanten
Unvollst. Durchschweißung	Reduktion der Streckenenergie oder / und Defokussierung des Strahls
Bindefehler	Strahlversatz
Fehlerhafte Bauteilpositionierung	Verdrehen / Versatz der Fügekannte zu der Elektronenstrahlbewegung
Schmelzbadauswurf	Kurzzeitige Erhöhung der Energie
Spiking	Variation der Energie
Humping	Hohe Prozessgeschwindigkeit

4. Auswertansätze und Ergebnisse:

Die während des Prozesses aufgezeichneten Schalldaten können über verschiedene Ansätze ausgewertet werden. Die Auswertung der Messdaten kann zum einen als eine Hit-basierte oder als eine kontinuierliche Auswertung erfolgen. Da hier zunächst die fehlerspezifischen Klangsignaturen identifiziert werden sollen, ist eine kontinuierliche Erfassung und Auswertung dieser Messdaten sinnvoll. Für die Messungen wurde der niederfrequente Sensor an Kanal 1 und der Breitbandsensor an Kanal 2 angeschlossen. Von den aufgezeichneten Messdaten kann unter anderem die Lautstärke, die lineare Amplitude, die Schallenergie sowie die Schallstärke ausgewertet werden.

In Abbildung 2 ist links die Vorder- und Rückseite einer Probe mit teilweiser Durchschweißung dargestellt. Für die Schweißung wurde eine Beschleunigungsspannung von 60 kV, ein Strahlstrom von 6 mA sowie eine Schweißgeschwindigkeit von 20 mm/s verwendet. Es ist zu erkennen, dass ca. 1/3 der Schweißnaht nicht durchgeschweißt ist und dadurch die Schweißnaht breiter wurde. In dem Bereich, in dem eine vollständige Einschweißtiefe vorhanden ist, wird die Schweißnaht schmaler und eine Schweißbraupe ist auf der Rückseite zu erkennen. In Abbildung 2 (rechts) ist ein Überblick über die Messdaten dargestellt. Wie darin zu erkennen ist, wurden die Schallsignale bereits ca. 2,5 Sekunden vor dem eigentlichen Schweißprozess aufgezeichnet. Dieser Bereich dient als Referenzbereich und zum Herausrechnen von Hintergrundgeräuschen. Weiterhin ist zu erkennen, dass zu dem Zeitpunkt der Schweißung eine Erhöhung des Schallpegels, speziell im Anfangsbereich der Schweißnaht, auftritt. Des Weiteren wurde nach einer zeitlichen Verzögerung die Bildgebung aktiviert, bei der eine Abrasterung der Schweißnaht mit dem Elektronenstrahl erfolgt, wodurch ein hochauflösendes Bild von der Schweißnahtoberfläche erstellt werden kann. Dieses Abrastern der Oberfläche mit dem Elektronenstrahl erzeugt ebenfalls eine erhöhte Schallamplitude. Die Abweichungen zwischen den Maximalwerten des Schallpegels der einzelnen Kanäle, ist auf die unterschiedliche Empfindlichkeit der Sensoren bei bestimmten Frequenzbereichen zurückzuführen.

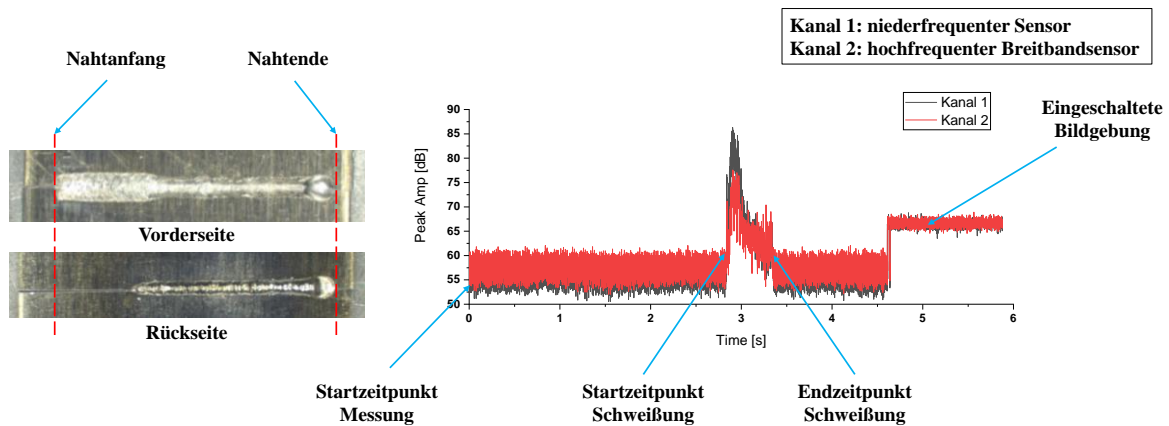


Abbildung 2: Schweißnahtober- und Schweißnahtunterraupe einer teilweise unvollständigen Durchschweißung (links) und Übersicht über die zeitlichen Messdaten (rechts)

In Abbildung 3 ist das zugeschnittene und aufbereitete Messsignal dargestellt. In den linken Messdaten ist der aus Abbildung 2 für beide Kanäle gemittelte Verlauf, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der maximale Schallpegel im Bereich der unvollständigen Durchschweißung um ca. 15 dB im Vergleich zum durchgeschweißten Bereich erhöht ist. In der linearen Amplitude bzw. der Schallenergie, wird der Bereich der unvollständigen Durchschweißung ebenfalls deutlich erkennbar. In den Messdaten der linearen Amplitude ist das Grundrauschen im Bereich von ca. 1000 - 2000 μV wohingegen der Mittelwert bei der Auffälligkeit bis zu 9000 μV beträgt. Das Grundrauschen bei der Schallenergie ist im Bereich von ca. 3×10^4 eu und die der Auffälligkeit von ca. 20×10^5 eu. Bei der Schallenergie ist der Abfall des Signals im Bereich des Schweißnahtendes nur mäßig zu erkennen. Weiterhin ist in den drei dargestellten Signalverläufen jeweils am Start des Schweißprozesses ein Maximum zu erkennen, welches auf das Aufbauen der Dampfkapillare zurückzuführen ist. Am Ende des Schweißprozesses ist in dieser Messung kein „Zusammenbrechen“ der Dampfkapillare zu erkennen, da durch die langsame Reduktion der Leistung dieser Effekt minimiert wird.

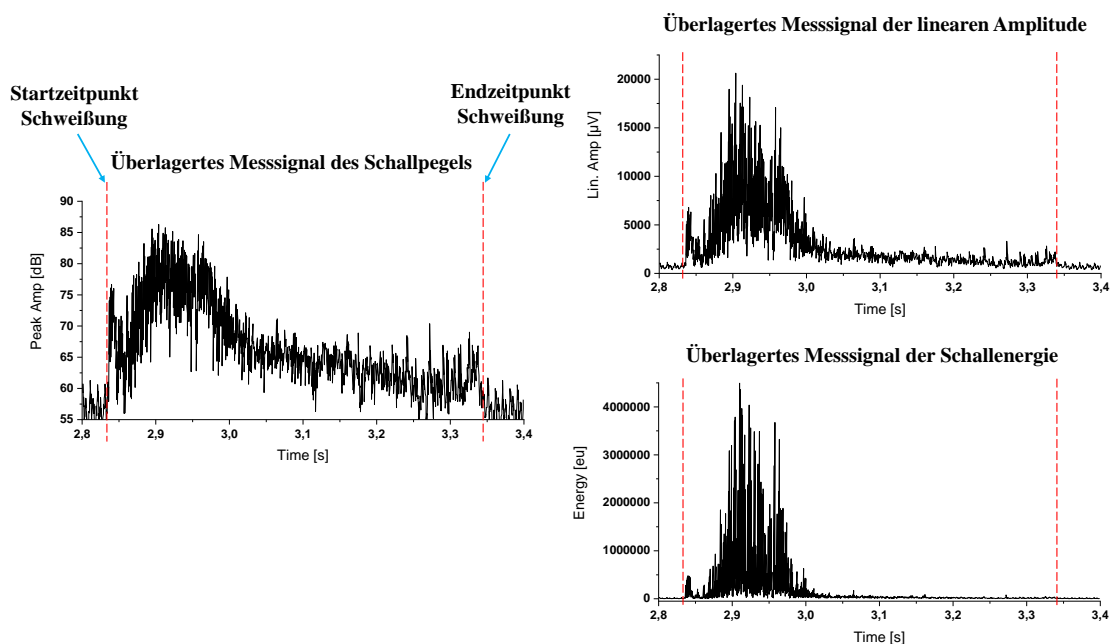


Abbildung 3: Übersicht über die Datenauswertung: Messdaten des Schallpegels (links), der lineare Amplitude (rechts oben) sowie der Schallenergie (rechts unten)

In der nachfolgenden Abbildung 4 ist ein Querschliff einer Aluminiumschweißverbindung sowie dem dazugehörigen Verlauf der Schallsignale dargestellt. Die

Schweißung wurde mit einer erhöhten Vorschubgeschwindigkeit geschweißt, ohne die Leistung anzupassen. Dadurch wird eine Reduktion der Streckenenergie erzielt. In den Messdaten links oben, ist das Schallsignal als lineare Amplitude über den zeitlichen Verlauf dargestellt. Der Bereich wurde zur Übersichtlichkeit der Schweißung sowie der Auffälligkeit eingegrenzt. Es ist zu erkennen, dass während des Schweißprozesses ein erhöhtes akustisches Signal vorliegt, welches auf eine unvollständige Durchschweißung zurückzuführen ist. Weiterhin ist zu erkennen, dass mit fortschreitender Reduzierung der Streckenenergie die Amplitude zunimmt. Der Bereich der nach dem Schweißprozess entstandenen Auffälligkeit ist in dem Auszug unten links vergrößert dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass das Grundrauschen zwischen 500 und 1000 μV liegt und in dem Bereich der Auffälligkeit der Wert bis auf ca. 3000 μV ansteigt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Dauer der Auffälligkeit ca. 1,5 ms beträgt. Im Anschluss an die Schweißung wurde die Schweißnaht durch Querschliffe untersucht. Dazu wurden entlang der Schweißnaht wiederholt Querschliffe erzeugt. Einer der geätzten Querschliffe ist in dem rechten Bild mit 200-facher Vergrößerung abgebildet. In dem Querschliff ist zu erkennen, dass die Schweißnaht nicht vollständig durchgeschweißt wurde und sich aus dem unverschweißten Blechstoß ein Riss in das Schweißgut ausgebildet hat. Auf Grund des Zeitpunktes des Auftretens des Risses und der Bruchcharakteristik lässt sich auf einen durch die Erstarrung entstehenden Heißriss hindeuten.

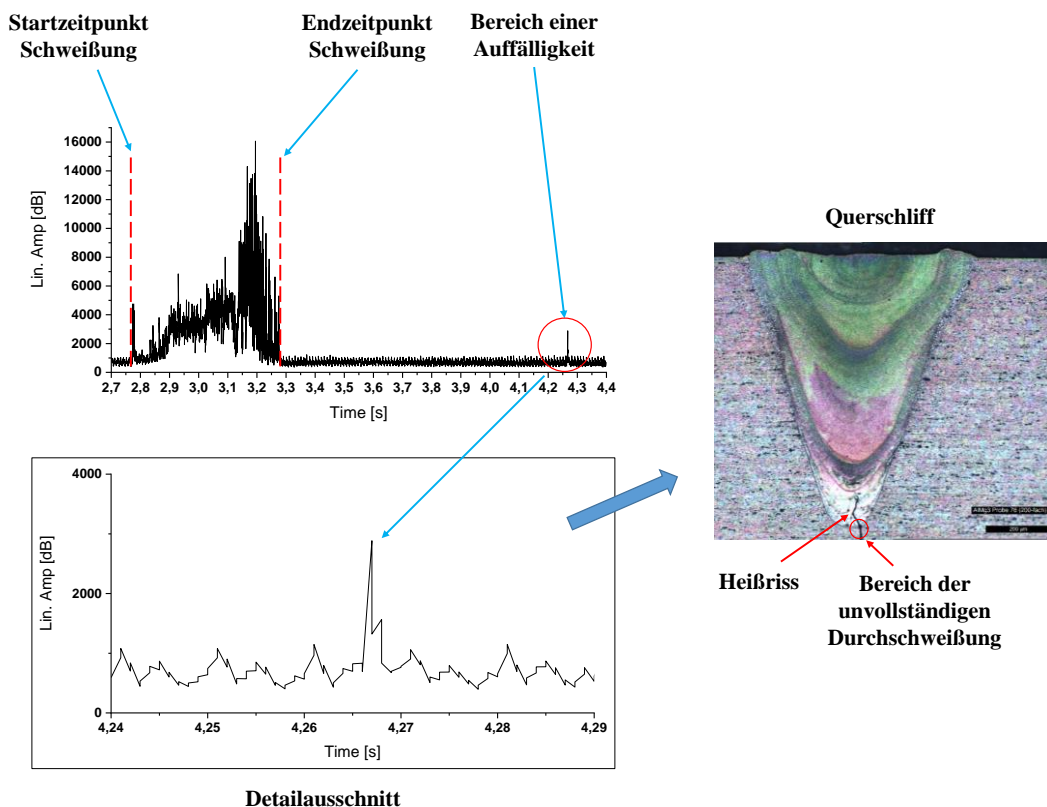


Abbildung 4: Übersicht über die Messdaten während der Schweißung (links oben), Vergrößerung des Bereichs einer Auffälligkeit (links unten) sowie geätzter Querschliff der Probe (rechts)

5. Schlussfolgerung

In dem Beitrag wurde die prinzipielle Eignung einer In-Line Prozessüberwachung beim Elektronenstrahlschweißen durch ein körperschallbasiertes Messsystem zur Qualitätssicherung von Schweißverbindungen vorgestellt. Es wurden die Rahmenbedingungen für die Erfassung der Prozessgeräusche mit Hilfe eines

körperschallbasierten Messsystems sowie dessen Implementierung an einer Elektronenstrahlanlage aufgezeigt. Außerdem wurden Methoden erläutert, mit denen typische industrierelevante Unregelmäßigkeiten eingebracht werden können. Weiterhin wurden Möglichkeiten der Messdatenauswertung anhand von verschiedenen Signalauswertungen bzw. -darstellungen aufgezeigt. Abschließend wurden die in den Messdaten vorhandenen Auffälligkeiten für die Fehlerart unvollständige Durchschweißung sowie Heißrisse diskutiert.

Anhand der zerstörenden Untersuchung der Schweißverbindungen konnten die Methoden zur Einbringung der Unregelmäßigkeiten validiert werden. So kann durch Änderung der Streckenenergie eine partielle, unvollständige Durchschweißung realisiert werden. Anhand der Messdaten konnte gezeigt werden, dass der Unterschied zwischen Einschweißen und Durchschweißen sowohl im Maximalwert des Schallpegels, der linearen Amplitude sowie der Schallenergie deutlich erkennbar ist. Des Weiteren konnte, durch Reduzierung der Streckenenergie und der damit erhöhten Abkühlgeschwindigkeit in Verbindung einer ungenügenden Einschweißtiefe, eine Bildung von Heißrisen erzeugt werden. Diese treten nach dem Schweißprozess zeitlich verzögert auf und können anhand des Schallpegels detektiert werden.

Ergänzend zu gezeigten Ergebnissen sollen im weiteren Projektverlauf die weiteren genannten Fehlerarten und deren Klangcharakteristika untersucht werden. Weiterhin sollen die Messdaten für eine automatisierte Auswertung aufbereitet werden. Abschließend folgt die Anwendung von Machine Learning Vorhersagensmodellen zur automatisierten Fehlererkennung.

Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „ProEBSchall“ (IGF-Forschungsvorhaben 21.887 N / DVS-Nr. 06.3453) erzielt. Unser besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz als Mittelgeber sowie der Forschungsvereinigung des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. und der AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V.. Zudem bedanken wir uns bei den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses für ihre Unterstützung.

Referenzen

- [1] Schultz H (2017) Elektronenstrahlschweißen. Grundlagen, Maschinen und Anwendungen, 3. Aufl. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 93. DVS Media, Düsseldorf
- [2] Na S-J (2008) Weld seam monitoring. In: Zhang Y (Hrsg) Real-time weld process monitoring. Woodhead Pub. and Maney Pub. on behalf of the Institute of Materials Minerals and Mining, Cambridge, England, Boca Raton, S 131–163
- [3] Erhard A (2014) Verfahren der zerstörungsfreien Materialprüfung. Grundlagen, 1. Aufl. DVS Media, Düsseldorf
- [4] Adam V, Clauß U, Dobeneck Dv, Krüssel T, Löwer T (2011) Elektronenstrahlschweißen. Grundlagen einer faszinierenden Technik
- [5] Braverman VY, Skurikhin DA, Bayakin SG, Shabanov VF, Bashenko VV (1997) A device for controlling focusing and penetration depth on the basis of inherent X-radiation in electron beam welding with modulation of the focusing level. *Welding International* 11(7):560–563. doi:10.1080/09507119709452015
- [6] Overrath J, Decker I, Wohlfahrt H (1998) Prozeßintegrierte Qualitätsüberwachung beim Elektronenstrahlschweißen von Aluminium-Druckguß. *DVS Berichte* (194):142–148
- [7] Steffens H-D, Crostack HA (1973) Einflußgrößen bei der Analyse von Schallemissionen. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 4(8):442–447. doi:10.1002/mawe.19730040808

- [8] Dickhaut E, Eisenblätter J (1975) Acoustic Emission Measurements During Electron Beam Welding of Nickel-Base Alloys. *Journal of Engineering for Power* 97(1):47–52. doi:10.1115/1.3445912
- [9] Steffens H-D, Jüptner W, Crostack H-A (1975) Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Überwachung des Elektronenstrahl-Schweißprozesses. *Strahltechnik VII. DVS Berichte* (34)
- [10] Kharchenko GK, Zaderii BA, Kotenko SS (1973) Acoustic Technique for Revealing Cracks upon Electron- Beam Welding of Niobium and Molybdenum. *Avtomat. Svarka* (2):72–73
- [11] Trunov EN, Leskov GI (1977) Instruments for Evaluating the Process of Electron-Beam Welding by Acoustic Emission. *Materialy V Vsesoyuznoi konferentsii po ELS 1975 (Proc. of V All-Union Conf. on Electron-Beam Welding 1975):*132–136
- [12] Crostack HA, Reuss G, Bach F-W, Honekamp E (1998) Non-destructive Control of the Electron Beam (EB) Welding Process by means of acoustic emission. *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society : Aachen-Germany august 31-september 4, 1998. IEEE, Piscataway, NJ*
- [13] Crostack H-A, Kock K-H, Steffens H-D (1981) Trennung von Schallemissionssignalen durch rechnerische Analysen. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 12(5):160–167. doi:10.1002/mawe.19810120506
- [14] A. Sharma, M.I. Junaidh, K.K. Purushothaman, C.P Kotwal, J. Paul (2006) Online Monitoring of Electron Beam Welding of Ti6Al4V Alloy Through Acoustic Emission
- [15] Vallen Systeme GmbH: Vallen VS900-M, Rev: VS900-M_2104.docx, URL: <https://www.vallen.de/zdownload/DataSheets/Sensors/VS900-M.pdf>
- [16] Vallen Systeme GmbH: Vallen VS30-V, Rev: VS30-V_2104.docx, URL: <https://www.vallen.de/zdownload/DataSheets/Sensors/VS30-V.pdf>