

Neue Ansätze zur Überwachung und Optimierung des Rührreibschweißens mit ZFP

Christian CONRAD*, Gerd DOBMANN*, Bernd WOLTER*

* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

Kurzfassung. Das Rührreibschweißen (friction stir welding, FSW) weist gegenüber den klassischen Schmelzschweißverfahren eine Reihe von Vorteilen auf, weshalb sich vermehrt Anwendungen dieses wärmearmen Fügeverfahrens in der Industrie finden. Mit der zunehmenden industriellen Verbreitung steigt auch der Bedarf an geeigneten, qualitätssichernden Maßnahmen. Hierzu zählt der Einsatz von mit ZFP zum Nachweis von Schweißnahtunregelmäßigkeiten. Neben den konventionellen Unregelmäßigkeiten, die in gleicher oder ähnlicher Form auch bei den klassischen Schmelzschweißverfahren auftreten, kommt es beim Rührreibschweißen zu verfahrenstypischen Unregelmäßigkeiten, die bisher weder bzgl. ihrer Auswirkungen auf die Belastbarkeit der Schweißverbindung noch bzgl. der Möglichkeiten ihres zerstörungsfreien Nachweises umfassend beschrieben sind. Hierzu zählen das kollabierte Schweiß-Nugget und die Anhäufung von oberflächennahen Riefen und Blasen. Besonders kritisch sind langgezogene Schlauchporen und sogenannte Oxidbänder. Schlauchporen entstehen hier anders als bei Schmelzschweißverfahren nicht durch Ausgasungen, sondern sind das Ergebnis ungeeigneter Einstellungen der Prozessparameter. Oxidbänder sind Reste der ursprünglich auf den Bauteiloberflächen haftenden Oxid- / Hydroxidschicht, die während der Schweißung in die Naht eingerührt wurden. Beide Fehlerarten können die statische und besonders die dynamische Belastbarkeit der Schweißverbindung dramatisch schwächen. FSW ist in besonderer Weise geeignet, Mischverbunde zwischen verschiedenen Materialien (Al, Mg, Stahl und neuerdings auch CFK) herzustellen. Hieraus ergeben sich neue Aufgaben für die ZFP, wie die Charakterisierung der Durchmischung der Materialien beider Fügepartner. Am IZFP wurden verschiedene Verfahren der Wirbelstrom-, Ultraschall- und Röntgenprüfung zur Bestimmung dieser verfahrenstypischen Qualitätsmerkmale wie zum Beispiel Schlauchporen, lack of penetration und lack of fusion eingesetzt und entsprechend den besonderen Anforderungen des FSW weiterentwickelt. Die Fehler sollen aber nicht nur im Post-Prozess detektiert, sondern bereits ihre Entstehung erkannt und im günstigsten Fall durch Einleitung geeigneter Korrekturmaßnahmen sogar vermieden werden. Hierfür wurden am IZFP geeignete In-Prozess-Verfahren entwickelt, sowie Methoden zur Prozessoptimierung.

1. Einleitung

Rührreibschweißen ist ein innovatives Pressschweißverfahren, das sich seit seiner Erfindung im Jahre 1991 [1] schnell als ein besonders leistungsfähiges Fügeverfahren erwiesen und eine rasante Entwicklung durchlaufen hat. Es wird bereits erfolgreich im Schiff- und Schienenfahrzeugbau sowie in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt. Die Fügetemperatur liegt bei artgleichen Verbunden grundsätzlich bei maximal 80% der Schmelztemperatur des Fügepartierwerkstoffs. Mit diesem Verfahren können insbesondere Werkstoffe gefügt werden, die als nicht oder nur schwer schmelzschweißbar gelten [2]. Das grundlegende Verfahrensprinzip des Rührreibschweißens ist im Folgenden dargestellt (Abb. 1) dargestellt.

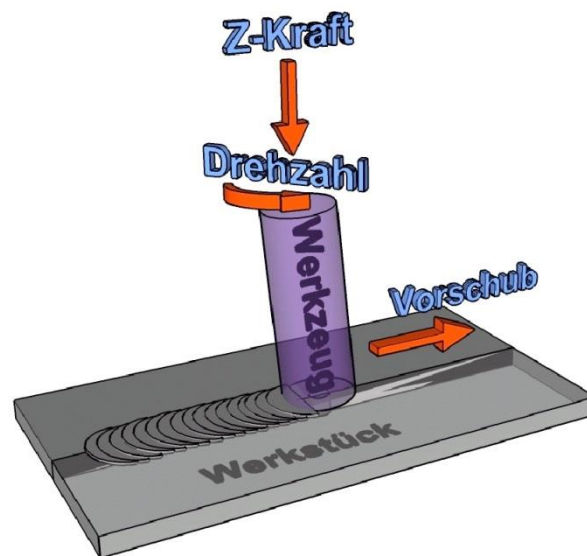


Abb. 1: Verfahrensprinzip Rührreibschweißen

Es wird ein zylindrisches Werkzeug verwendet, aus dem ein profilierter Rührstift, auch Pin genannt, herausragt. Das Werkzeug wird rotierend in den Stumpfstoß der auf einer Unterlage fixierten Fügepartner eingedrückt und entlang der Fügelinie geführt.

Wesentlicher Unterschied zum Reibschweißen ist, dass die notwendige Reibungswärme zur lokal begrenzten Plastifizierung des Werkstoffbereichs in der Fügezone nicht durch Relativbewegung zwischen den Fügepartnern, sondern durch die Reibung der Schulter des Schweißwerkzeugs auf der Fügepartieroberfläche erzeugt wird [3]. Die Geometrie der Fügepartier ist daher beim FSW weitgehend frei wählbar. Weitere wichtige Vorteile des Verfahrens sind, dass keine Zusatzwerkstoffe benötigt werden und dass es aufgrund des niedrigen Energiebedarfs und der nicht vorhandenen Rauch- oder Dampfentwicklung äußerst umweltverträglich ist.

Um gleichbleibende Qualität der Schweißnähte sicherzustellen und eventuell auftretende Prozessschwankungen zu erkennen, ist der Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren notwendig. Im Folgenden sind diese Verfahren und die damit erzielten Ergebnisse beschrieben und nach Post-Prozess und In-Prozess-Verfahren gegliedert.

2. Post-Prozess Verfahren

2.1 Stand der Technik

2.1.1 Röntgenographische Verfahren

Röntgenographische Verfahren gehören zu den zerstörungsfreien, bildgebenden Verfahren, die in der Industrie im Besonderen in der Prüfung sicherheitsrelevanter Bauteile eingesetzt werden und sich dort auch bewährt haben. Vor allem im Bereich Fehlerdetektion und Charakterisierung von Materialeigenschaften bieten sie viele Vorteile.

Die Durchstrahlungsprüfung kann als einfachste Variante der Röntgenverfahren angesehen werden. Hierbei wird die dreidimensionale Objektstruktur auf ein zweidimensionales Medium als Schattenbild (Film) abgebildet [4]. Durch die unterschiedlichen Absorptionseigenschaften verschiedener Medien kann eine Fehlerprüfung realisiert werden. Eine Fehleranalyse kann durch ein digitales Bildverarbeitungssystem, welches dem Durchstrahlungsvorgang nachgeschaltet wird, automatisiert werden. Auf Grund der Projektion des dreidimensionalen Objektbildes auf ein zweidimensionales Abbild, werden die Objektstrukturen in Durchstrahlungsrichtung überlagert. Schwierigkeiten treten deswegen bei der Prüfung von Bauteilen mit flächenartigen Fehlern, wie es z.B. bei Rissen der Fall ist, auf.

Ein weiterer Nachteil dieser Methode ist die Bestimmung der genauen Position und Geometrie der Fehlstelle in ihrer Lage in Durchstrahlungsrichtung. Um diese Tiefenlage der Fehler eindeutig zu bestimmen, muss man sich der Tomographie bedienen, die den inneren und äußeren Aufbau von Bauteilen sowohl zerstörungsfrei als auch berührungslos dreidimensional abbildet [5].

Dieses Verfahren kann zur Detektion von Dichteunterschieden, Fehlern (auch die Lage, Art und Geometrie) sowie zur Vermessung von inneren, verdeckten Strukturen eingesetzt werden. Es ist möglich sowohl ein Gesamtbild des Volumens des zu untersuchenden Körpers zu erzeugen bzw. zu rekonstruieren, als auch einzelne Volumenbereiche gesondert zu analysieren, die im Voraus als besonders beachtenswert angesehen werden.

2.1.2 Ultraschalltauchtechnik

Schallwellen breiten sich in festen Körpern in Form von Longitudinal- und Transversalwellen aus, deren Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von Werkstoff und Wellenart abhängen (Tab. 1).

	Stahl	Al	Al-Oxid	Wasser	Luft
Elastizitätsmodul E [GPa]	210	70	262	--	--
Dichte ρ [kg/m ³]	7850	2700	3600	1000	1,29
Poissonzahl	0,27..0,30	0,33	0,25	--	--
Longitudinalgeschwindigkeit c_L [m/s]	5900	6260	9000	1490	343
Transversalgeschwindigkeit c_T [m/s]	3250	3080	5500	--	--

Tab. 1: Übersicht werkstoffspezifischer Kenngrößen verschiedener Werkstoffe

Handelsübliche Tauchtechnik-Prüfköpfe nutzen das Prinzip des Piezo – Effektes aus, um die Ultraschallwellen im Schwinger zu erzeugen. Anzumerken ist hier, dass sich die Kugelwellenfronten jedes Piezo-Kristalls innerhalb der vom Schwingerdurchmesser abhängigen Nahfeldlänge zu einer gemeinsamen Wellenfront vereinigen [6]. Das Schallbündel kann in das inhomogene Nahfeld und das homogene Fernfeld unterteilt werden. Der in das Werkstück eingebrachte Schall ist gerichtet und stark gebündelt.

Bei der Ultraschalltauchtechnik sind sowohl der Prüfkopf als auch das Werkstück von Wasser umgeben, wie man in Abb. 2 sehen kann. Durch die berührungslose Messung kann dieses Verfahren einfach automatisiert ausgelegt werden. Um Messungen in unmittelbarer Nähe zur Werkstückoberfläche zu realisieren, wird die Vorlaufstrecke größer als die Nahfeldlänge gewählt. Der Abstand des Prüfkopfs zur Oberfläche des Prüfobjektes variiert den Fokuspunkt der eingebrachten Welle in Abhängigkeit von Schwingerdurchmesser und Wellenlänge.

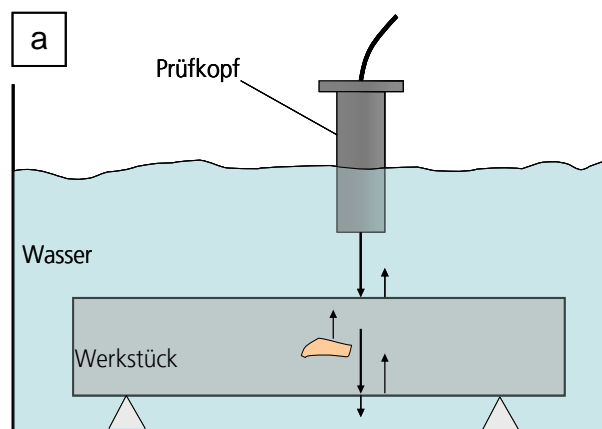


Abb. 2: Skizze einer Ultraschalltauchwanne

Einen A-Scan kann man in Abb. 3 sehen, welcher die Laufzeit in Bezug auf den Ultraschallsignalverlauf darstellt. Beim Auftreffen der Ultraschallwelle auf die Werkstückoberfläche wird ein Teil der Welle zum Prüfkopf zurückreflektiert und als Eintrittsecho im A-Scan sichtbar, während der Rest der Ultraschallwelle durch das Werkstück hindurch läuft, bis sie auf eine Rückwand trifft, dort reflektiert wird und zurück zum Prüfkopf gelangt. Dies wird dann als Rückwandecho in der Ultraschallsignalfolge sichtbar.

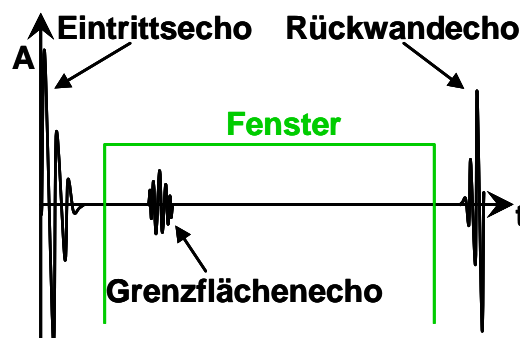


Abb. 3: Ultraschallechofolge (A-Scan)

Der Laufzeitunterschied bzw. der Abstand zwischen Eintritts- und Rückwandecho ist proportional zur Dicke des betrachteten Werkstückes. Weitere Echo - Anzeigen sind möglich, wenn sich innerhalb des betrachteten Bereiches eine weitere Grenzschicht befindet, die z.B. durch eine Fehlstelle im Material gebildet wird. An dieser weiteren

Grenzschicht wird die Ultraschallwelle, je nach Größe und räumlicher Ausdehnung gestreut bzw. reflektiert.

2.2 Ergebnisse

2.2.1 Röntgenographische Verfahren

Das Verhalten in Bezug auf die Orientierung, die Größe und den Verlauf einer Schlauchpore zu erhalten, wurde die Röntgen-CT eingesetzt. Ein weiterer Beweggrund, diese Technik einzusetzen, ist die sehr gute Unterstützung der gefundenen Ergebnisse und das einfachere Verständnis (durch die 3D – Darstellung) der betrachteten Unregelmäßigkeiten. Abb. 4 und Abb. 5 zeigen das Ergebnis der Röntgen – CT inkl. der 3D – Rekonstruktion in verschiedenen Ansichten. Die Schnittebene wurde hierbei in die Mitte der Schweißnaht gelegt, da in den Durchstrahlungsbildern der Ausgangspunkt der Schlauchpore eindeutig erkannt werden konnte. Erkennbar ist eine Schlauchpore, die sowohl ihre Orientierung als auch ihre Lage variiert.

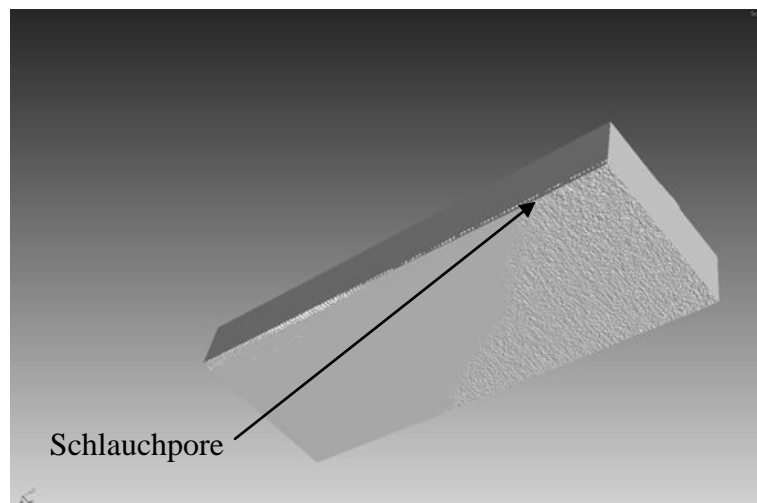


Abb. 4: Schlauchpore von der Unterseite der verschweißten Bleche

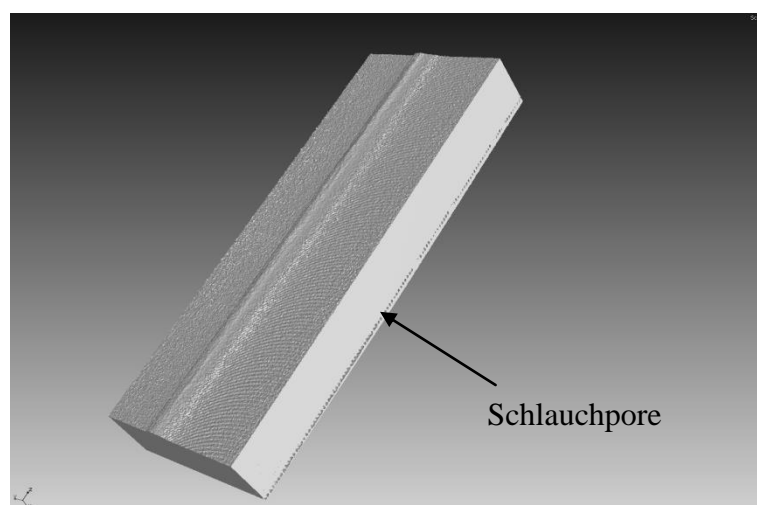


Abb. 5: Ansicht von der Oberseite

2.2.2 Ultraschalltauchtechnik

Schlauchporen können unter anderem durch einen zu hohen Vorschub oder zu geringe Rotationsgeschwindigkeiten, was gleichbedeutend mit einem ungenügend bzw. nur ungleichmäßigen Werkstofffluss ist, auftreten. In Abb. 6, die das B-Bild einer untersuchten Schweißnaht zeigt, ist die Tiefenlage der Schlauchpore, die ein charakteristisches eher zusammengedrücktes Aussehen aufweist, in Abb. 7 das dazugehörige C-Bild zu sehen.

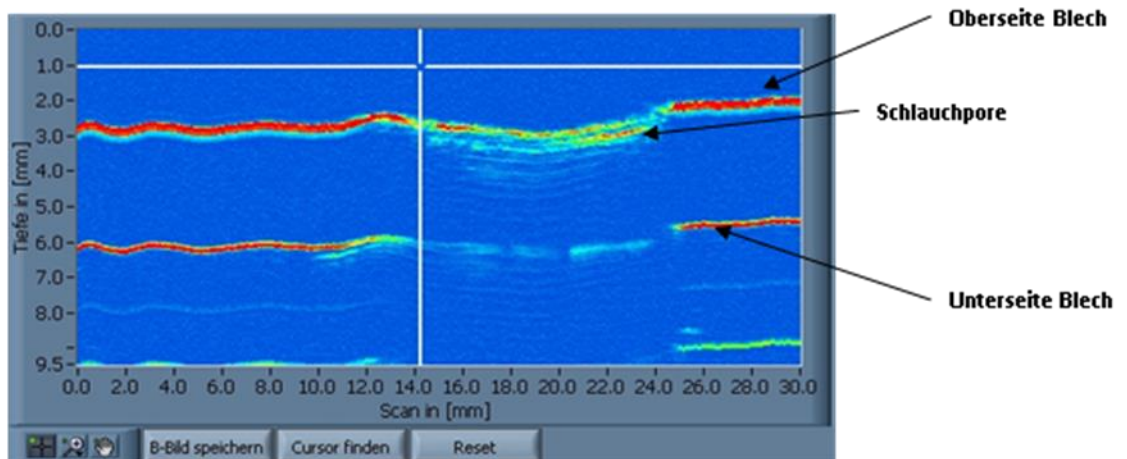


Abb. 6: B-Bild mit Fehleranzeige im Bereich der Nahtoberfläche

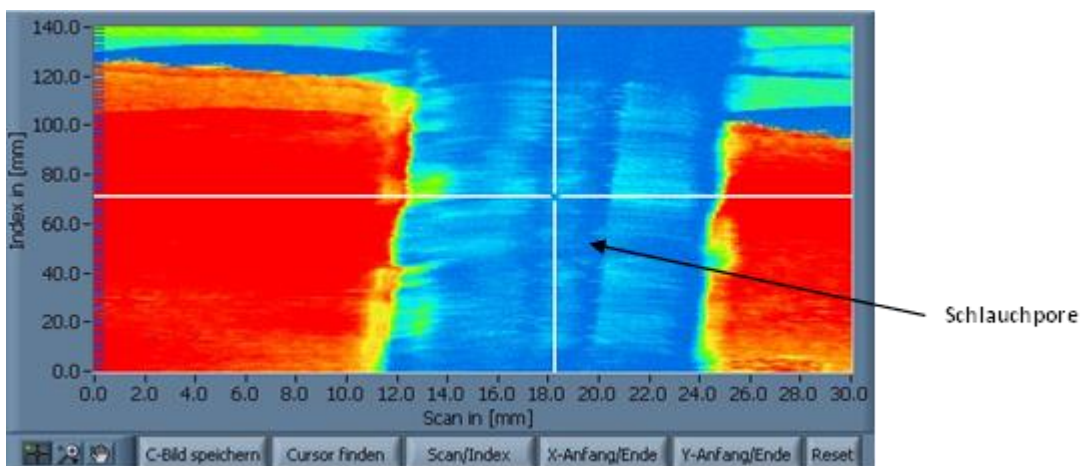


Abb. 7: C-Bild mit Fehleranzeige im Mittenbereich der Naht

3. In-Prozess Verfahren

3.1 Stand der Technik

Elektromagnetisch angeregter und empfangener Ultraschall (EMUS), der hier zur Anwendung kommt, kann man als eine sehr effektive und schnelle Methode ansehen, die viele Vorteile gegenüber anderen hier behandelten Verfahren aufweist. Zu diesen gehören die koppelmittelfreie Anwendung, die es auch erlaubt, heiße Bleche zu vermessen oder die leichte Integrierbarkeit des Verfahrens in eine online – Prüfung. Zu den Nachteilen gehört die etwas geringere Empfindlichkeit (im Vergleich zur Ultraschalltauchtechnik) gegenüber Unregelmäßigkeiten, die aber bei den hier betrachteten Fehlerarten kaum bzw. überhaupt

nicht ins Gewicht fällt. Die Auflösungsgrenze liegt momentan bei ca. 0,5 mm in allen drei Raumrichtungen. Zu den von diesem Verfahren nicht erfassbaren Fehlern gehören die Oberflächenporen bzw. -risse sowie die eher sporadisch auftretenden Oxidlinien, die aufgrund ihrer Größe (ca. 5 bis 30 μm) und ungleichmäßigen Orientierung in der Schweißnaht nur sehr schwer zu finden sind. Die bei diesen Messungen verwendeten Prüfköpfe, die als SH – Prüfköpfe bezeichnet werden und um im sogenannten SS_0 – Mode (sowohl für rissartige als auch für globulare Fehler sehr gut geeignet) betrieben werden, weisen eine Frequenz von 750 kHz bis zu 1 MHz auf.

3.2 Ergebnisse

Die Anzeigen in Abb. 8 und Abb. 9 wurden bei geschweißten Blechen detektiert, sie zeigen zum einen Poren und ungenügende Durchschweißung, zum anderen Schlauchporen.

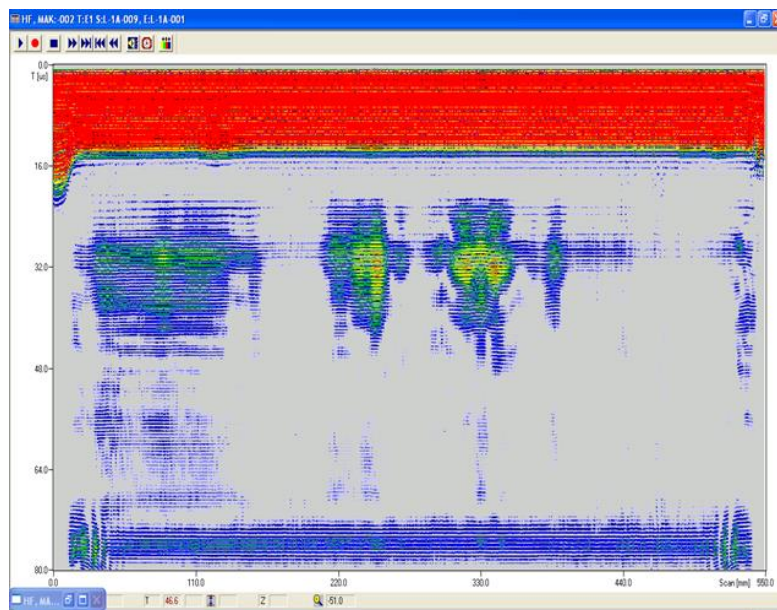


Abb. 8: Ungenügende Durchschweißung und Poren entlang der Schweißnaht

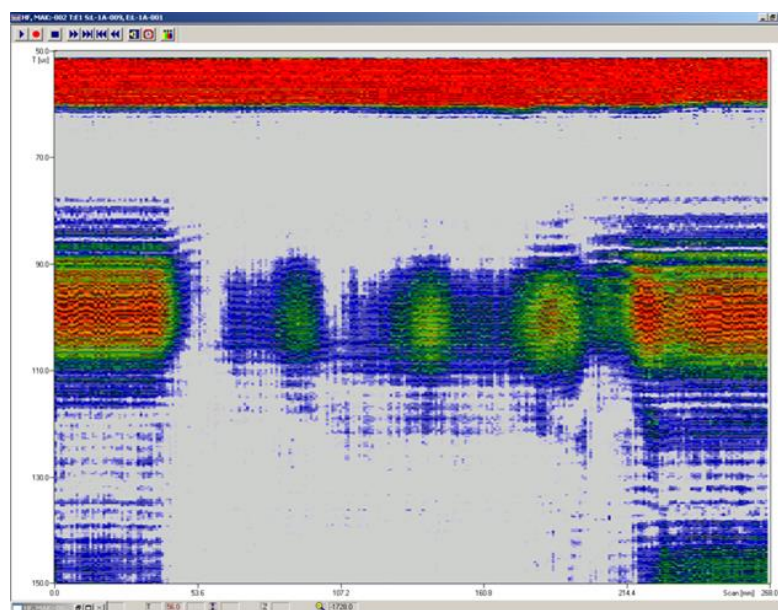


Abb. 9: Ungenügende Durchschweißung und Schlauchporen entlang der Schweißnaht

4. Prozessoptimierung

4.1 Verwendete Technik und erste Ergebnisse

Die Beaufschlagung der Fügezone mit Leistungsschall (Abb. 10) während des Rührreißschweißprozesses kann sich positiv auf die technologischen Eigenschaften der erzeugten Verbunde auswirken. Dieser Effekt tritt sowohl bei rührreibgeschweißten artgleichen als auch bei artfremden FSW-Verbunden auf.

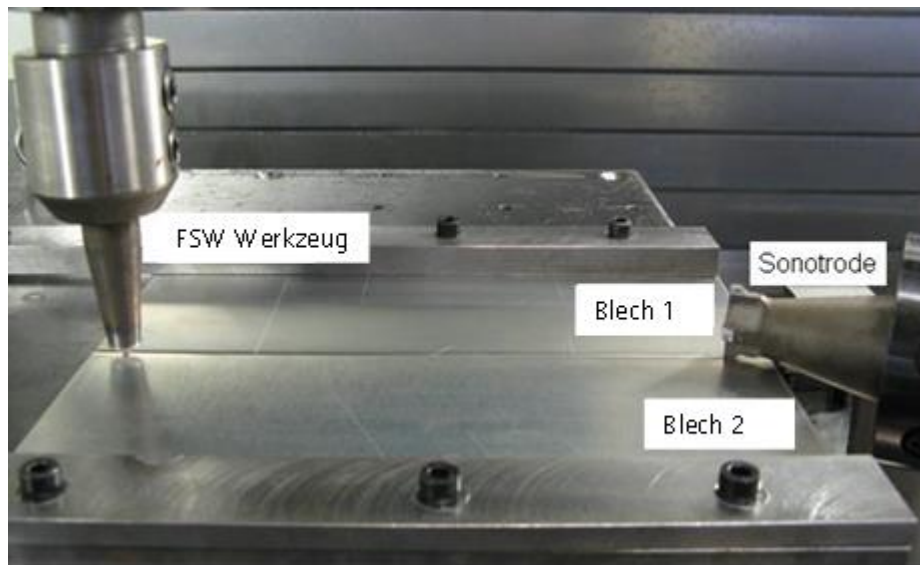


Abb. 10: Einprägung von Leistungsschall während des Schweißprozesses [Quelle: WKK]

Zum einen werden zusätzliche Vibrationen in der Schweißnaht erzeugt, die das „Aufbrechen“ zusammenhängender Oxidstrukturen unterstützen, und zum anderen werden die aufgebrochenen Oxidpartikel in der Schweißnaht gleichverteilt. Zusätzlich wird durch das Einbringen des Leistungsschalls eine zusätzliche Kornfeinung in der Fügezone initiiert und die Zugfestigkeit gesteigert (Abb.11).

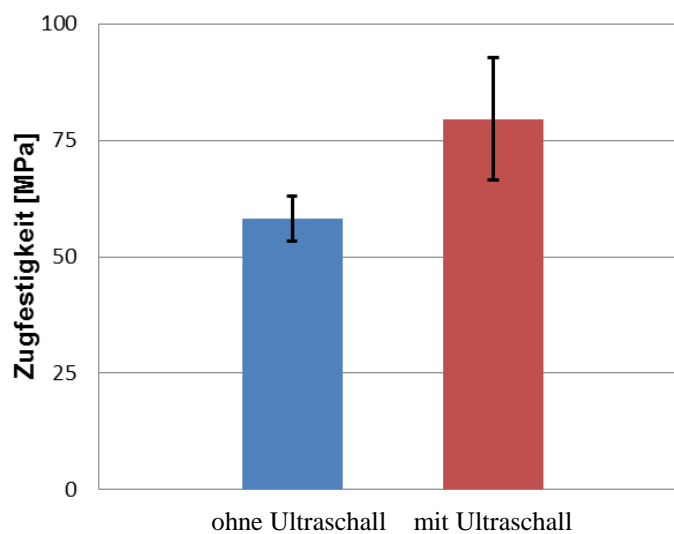


Abb. 11: Erhöhung der Zugfestigkeit durch Anwendung von Leistungsschall [Quelle: WKK]

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das Rührreibschweißen unterliegt in Bezug auf die zerstörungsfreie Prüfung ähnlichen Gesetzmäßigkeiten wie die etablierten bzw. konventionellen Schweißverfahren. Auch hier muss die Schweißnahtqualität sichergestellt und Fehler bzw. Fehlstellen detektiert werden, die sich negativ auf die Haltbarkeit der Schweißnaht auswirken können. Zu diesen Fehlerarten gehören u.a. Poren, Risse und weitere bekannte Defekte.

Die Durchstrahlungsprüfung und der Hochfrequenzultraschall (Ultraschalltauchtechnik) sind adäquate Techniken der zerstörungsfreien Prüfung, die bestens geeignet sind, um Fehlerarten zu detektieren, die beim Rührreibschweißen auftreten können. Einschränkend ist anzumerken, dass diese Verfahren nicht in der Lage sind, Oxidlinien zweifelsfrei zu erkennen.

Um eine online - Prüfung zu realisieren, ist es notwendig koppelmittelfreie EMUS (elektromagnetisch angeregter und empfangener Ultraschall) - Sensoren zu verwenden, die eine hohe Prüfgeschwindigkeit und eine ausreichende Auflösung (Detektionsumfang ist geringer als bei der Ultraschalltauchtechnik) der zu detektierenden Fehlstellen garantieren. Diese Methodik wird schon seit geraumer Zeit bei der Prüfung von lasergeschweißten Nähten genutzt.

Referenzen

- [1] M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith: Improvements to Friction Welding. TWI (Ed.), Vol. EU Patent 0 615 480 B1, GB, (1991).
- [2] S. Sheikhi, R. Zettler, J.F.d. Santos: Fortschritte beim Rührreibschweißen von Aluminium, Magnesium und Stahl. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 37, 9, (2006), 762 - 767.
- [3] A.P. Reynolds: Visualisation of material flow in autogenous friction stir welds. Science and Technology of Welding & Joining 5, 2 (2000), 120-124.
- [4] Schmitz, Reiter, Gebhardt, Rieder: Moderne Fehlerprüfverfahren für Bauteile und Produkte aus Al, ZfP-Zeitung 67 (1999)
- [5] M. Maisl, J. Zhou, J. Buck, H. Reiter: Non-destructive Testing of Ceramics, Composites and PCB by X-ray Tomographic Methods, DGZfP-Berichtsband 44 (1995)
- [6] Raj, B., Rajendran, V., and Palanichanmy, P.: Science and Technology of Ultrasonics, Alpha Science International Ltd., Pangbourne, U.K. (2005).

Kontakt Daten

Christian Conrad
Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)
Prozessüberwachung und -beherrschung
Campus E3.1
66123 Saarbrücken
Tel.: +49 (681) 9302 - 5302
E-Mail: christian.conrad@izfp.fraunhofer.de