

Verarbeitung von hybriden Stahl-Aluminium-Bauteilen zur Erzeugung von Hochleistungsbauteilen

Rotationsreibschweißen unter wechselnden Bedingungen

A. Piwek, A. Verschinin, J. Bosse, J. Peddinghaus, S. Barton, J. Uhe, K. Brunotte

ZUSAMMENFASSUNG Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften können beim Rotationsreibschweißen von Verbindungen aus Stahl und Aluminiumlegierungen geringe Abweichungen bezüglich Oberflächenzustand, Bauteiltemperatur und Reibfläche den Verbund deutlich beeinträchtigen. Die Auswirkungen dieser Eingangsbedingungen auf den Materialfluss, die Wulstbildung und die resultierende Verbundfestigkeit wurden systematisch in experimentellen Versuchen untersucht und per Ultraschallprüfung sowie Zugversuch bewertet.

Rotary friction welding under changing conditions

ABSTRACT Different material properties may induce slight deviations in surface condition, component temperature, and friction surface and thus significantly impair the bond of rotary friction welded steel-aluminium alloy joints. The effects of different input conditions on material flow, flash formation, and the resulting bond strength were systematically investigated in experimental tests and evaluated using ultrasonic examination and tensile testing.

STICHWÖRTER

Fügetechnik, Leichtbau, Messtechnik

1 Einleitung

Die Verarbeitung hybrider Werkstoffe stellt hohe Anforderungen an die Fertigungsprozesse, denn aufgrund der unterschiedlichen physikalischen und thermischen Materialeigenschaften sind nur geringe Abweichungen von den Sollwerten tolerierbar. Beim Tailored Forming – der Kombination von Fügen und Umformen zur Herstellung lastangepasster Bauteile – können bereits im Fügeschritt Abweichungen entstehen, welche sich in nachfolgenden Prozessschritten verstärken und die Bauteileigenschaften beeinträchtigen können [1, 2]. Das Rotationsreibschweißen hat sich als zuverlässiges Verfahren zum Fügen unterschiedlicher Werkstoffe wie Stahl und Aluminiumlegierungen etabliert und eignet sich aufgrund des vergleichsweise geringen Wärmeeintrags besonders für die Herstellung hybrider Verbindungen. Dennoch sind die Einflussfaktoren auf die Ausbildung der Fügezone von hybriden Stahl-Aluminiumlegierung-Verbindungen bislang nicht vollständig untersucht.

Diese Studie untersucht systematisch den Einfluss einzelner Parameterabweichungen auf die resultierende Verbundfestigkeit. Der Fokus liegt auf der gezielten Variation von Parametern wie Oberflächenzustand, Bauteiltemperatur und Reibflächengröße. Der Verbund wird quantitativ zunächst zerstörungsfrei mittels Ultraschallprüfungen und anschließend zerstörend durch Zugversuche bewertet. Das langfristige Ziel ist die Entwicklung einer Methodik zur In-situ-Bewertung der Verbundeneigenschaften sowie einer Vorhersage der Festigkeit im Rahmen des Tailored Forming. Ausschuss kann so durch eine prozessbegleitende Überwachung während der Fertigung verringert werden.

2 Stand der Technik

2.1 Rotationsreibschweißen

Beim Rotationsreibschweißen (RRS) werden die beiden Fügepartner während der Reibphase mit einem definierten axialen Druck zusammengepresst, wobei einer der Partner rotiert. Durch die entstehende Reibung wird die für das stoffschlüssige Fügen erforderliche Wärme eingebracht. In der anschließenden Stauchphase stoppt die Rotation und die Bauteile werden axial gestaucht. Das Material fließt in der Fügezone nach außen, dabei wird ein Stoffschluss erzeugt und es bildet sich ein Wulst [3, 4].

In der Studie von Ma *et al.* wurden Reibschißverbündungen aus EN AW-6061 und 1.4301 mit variierender Rauheit des Stahls untersucht. Grobe Oberflächen ($S_a > 0,6 \mu\text{m}$) führten im Zentrum der Fügefläche zu mangelhaften Verbunden, verursacht durch unzureichende Reibwärme. Polierte Flächen ($S_a \approx 0,02 \mu\text{m}$) begünstigten die Bildung einer durchgehenden amorphen Fe-Al-Zwischenschicht. Glatte, geometrisch definierte Stahloberflächen verbesserten die Kontaktverhältnisse, den lokalen Wärmeeintrag und die Diffusion in der Grenzschicht. [5]

In einer vorangegangenen Studie von Behrens *et al.* [6] wurde die Werkstoffkombination 20MnCr5 und EN AW-6082 analysiert. Dabei wurde sowohl die Oberflächenrauheit als auch die Temperatur der Halbzeuge vor dem Fügen variiert. Mit einer mittleren Rauheit $R_a = 2,25 \mu\text{m}$ beziehungsweise $R_z = 10,7 \mu\text{m}$ erreichten die Proben eine maximale Verbundfestigkeit von 252 MPa. Eine Erhöhung der Rauheit auf $R_a = 2,9 \mu\text{m}$ beziehungsweise $R_z = 17,02 \mu\text{m}$ reduzierte die Festigkeit auf 191 MPa. Zusätzlich wirkte die Vorwärmung der Aluminiumlegierung

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung der Versuchswerkstoffe (Mittelwert aus 5 Messungen).

	Si	Mn	Mg	C	Cr	Fe	Al
EN AW-6082	1,08	0,40	0,83	-	0,02	0,40	Balance
20MnCr5	0,24	1,29	-	0,17	1,07	Balance	0,02

auf 100 °C beziehungsweise 200 °C eine Steigerung der Festigkeit auf bis zu 267 MPa [6]. Diese Temperaturerhöhung verbessert zwar das Formänderungsvermögen und beschleunigt das Aufheizen der Fügezone, kann jedoch das Wachstum intermetallischer Phasen begünstigen. Bei übermäßiger Dicke führen diese spröden Schichten zur Schwächung der Verbindung [7, 8].

Eine weitere Studie von Irawan *et al.* untersuchte artgleiche Verbindungen aus EN AW-6061. Die Stoßflächen wurden unterschiedlich vorbehandelt: gesägt, plangedreht und manuell mit Schleifpapier in mehreren Körnungen bearbeitet. Es resultierten definierte Rauheiten zwischen $Rz = 0,697 \mu\text{m}$ und $1,067 \mu\text{m}$. Die Verbundbildung erfolgte bei konstanten Schweißparametern. Zusätzlich wurden Fasen mit verschiedenen Winkeln eingebracht, um Variationen im Materialfluss zu generieren. Die höchste Festigkeit (173 MPa) wurde bei der feinsten Rauheit und einer 15°-Fase erzielt. Gleichzeitig sank die Fügezonentemperatur mit abnehmender Rauheit, wodurch eine gleichmäßigere Kontakt- und Wärmeverteilung eingestellt wurde. [9]

Kimura *et al.* untersuchten Reibschißverbindungen aus Titan und Kupfer, die ein ähnliches Verformungsverhalten wie Paarungen aus Stahl-Aluminiumlegierungen aufweisen. Die Titanoberflächen wurden durch Schleifen, Polieren und Drehen gezielt variiert. Bei polierter Oberfläche und hohem Stauchdruck versagten die Proben im Zugversuch außerhalb der Schweißzone, während rauere Oberflächen zu Versagen und Materialdurchmischung innerhalb der Grenzfläche führten. [10]

Die Ergebnisse verdeutlichen den signifikanten Einfluss der Oberflächenrauheit sowie des Druckniveaus auf die Eigenschaften der Fügezone [9, 10].

In einer weiteren Studie wurde der Einfluss von Reibdruck, Reibweg, Stauchdruck und Stauchzeit auf die Verbundfestigkeit beim RRS von EN AW-6082 und 20MnCr5 systematisch untersucht. Als dominanter Faktor erwies sich der Stauchdruck, der sowohl die globale als auch die lokale Verbundfestigkeit maßgeblich erhöhte. Reibdruck und Stauchzeit wiesen einen geringeren, jedoch festigkeitsfördernden Beitrag zur resultierenden Verbundfestigkeit auf. Ein verlängerter Reibweg führte hingegen zu einer Reduktion der Festigkeit. Ergänzend erlaubten elektrische Leitfähigkeitsmessungen eine zerstörungsfreie Materialcharakterisierung der Aluminiumlegierung im Bereich der Fügezone. Da die elektrische Leitfähigkeit empfindlich auf die Verfestigung der Aluminiumlegierung reagiert, ließen sich daraus Rückschlüsse auf die Verbundfestigkeit ableiten. Eine direkte Betrachtung der Fügefäche erfolgte jedoch nicht, weswegen in dieser Studie nun die Ultraschallprüfung als Möglichkeit der zerstörungsfreien Analyse herangezogen wird. [11]

2.2 Ultraschallprüfung

Die Impuls-Echo-Methode, ein grundlegendes Verfahren der Ultraschallprüfung, nutzt einen Prüfkopf, der sowohl als Sender wie auch als Empfänger fungiert. Dieser misst den Schalldruck und die Laufzeit vom ausgesendeten zum empfangenen Impuls.

Dadurch lassen sich unter Kenntnis der materialabhängigen Schallgeschwindigkeit Materialdicken oder Tiefen von Unregelmäßigkeiten bestimmen. Die Ergebnisse werden typischerweise in einem A-Bild dargestellt, in welchem die Amplitude über der Zeit oder der Materialdicke aufgetragen ist [12, 13].

Die Impuls-Echo-Methode wird oft zur Bewertung der Dicke, zur Fehlererkennung und zur Beurteilung der Haftfestigkeit von Beschichtungen [14], Verbundstrukturen [15, 16] und (reib)geschweißten Verbindungen [17, 18] eingesetzt. Dabei werden Reflexionen der Ultraschallwellen an Oberflächen und Grenzflächen analysiert, die sich im A-Bild als Amplitudenspitzen zeigen [13].

Die Impuls-Echo-Methode wurde bereits zur Untersuchung der Fügezoneneigenschaften von Werkstücken aus dem LACE-Verfahren (Lateral Angular Co-Extrusion) eingesetzt. Aufgrund der geringen Fügezonentiefe wurden Ultraschallprüfrequenzen von 10 und 15 MHz verwendet [19, 20]. In einer ersten Studie konnte die Anbindung von EN AW-6082/100Cr6-Hybrid-Gleitlagerschalen erfolgreich mittels Ultraschallprüfungen und Scherversuchen bewertet werden [19]. In einer zweiten Untersuchung wurde die gleiche Methodik auf EN AW-6082/Ti6Al4V-Halbzeuge angewendet, wobei zahlreiche Mikro-Zugproben zur statistischen Absicherung der Ergebnisse herangezogen wurden. Diese Studie zeigte die Grenzen der Anwendbarkeit der Methode für diese Art von Proben auf: ein Teil der unzureichend gefügten Bereiche konnte per Ultraschall abhängig von Größe und Verteilung der Mikrospalten zwischen den Werkstoffen nicht detektiert werden [20].

Anders als beim Verbundstrangpressen ändern sich beim RRS die Verbundeneigenschaften stark über den Probenradius. Vor allem zur Mitte der Probe hin, wo die Relativgeschwindigkeit der Halbzeuge zueinander ihr Minimum erreicht, können Defekte erwartet werden [21]. Aus diesem Grund sollte in der vorliegenden Studie der zuvor an LACE-Proben eingesetzte Ansatz der Impuls-Echo-Ultraschallprüfung auf RRS-Verbindungen aus 20MnCr5 und EN AW-6082 übertragen und angewendet werden.

3 Material und Methoden

3.1 Versuchswerkstoffe

Für das RRS wurden Stangenabschnitte mit einem Durchmesser von 40 mm und einer Länge von 100 mm aus der aushärtbaren Aluminiumknetlegierung ENW-6082 im Wärmebehandlungszustand T6 (gemessene Härte circa 97 HV) und dem Einsatzstahl 20MnCr5 im weichgeglühten Zustand (gemessene Härte circa 180 HV) verwendet. Die chemische Zusammensetzung wurde durch Funkenspektrometrie ermittelt (**Tabelle 1**). Durch das gezielte Fügen beider Werkstoffe lassen sich hybride Bauteile realisieren, die gewichtssparend und zugleich mechanisch hoch belastbar sind [1, 2].

Tabelle 2. Eingangsbedingungen der Halbzeuge für das RRS.

Kurzbezeichnung	Beschreibung
$r_e = 0,4 \text{ mm}$	Drehbearbeitung WSP mit Eckenradius von 0,4 mm der Stahlseite
$r_e = 0,8 \text{ mm}$	Drehbearbeitung WSP mit Eckenradius von 0,8 mm der Stahlseite
$r_e = 1,2 \text{ mm}$	Drehbearbeitung WSP mit Eckenradius von 1,2 mm der Stahlseite
Glasperlen	Drehbearbeitung WSP mit Eckenradius von 0,8 mm Oberflächenbehandlung des Stahls mit Glasperlen (90 – 150 µm)
Schleifpapier	Drehbearbeitung WSP mit Eckenradius von 1,2 mm + Schleifpapier der Körnung 40, 120, 600, 1200, 2.500 (Drehzahl $n = 460 \text{ min}^{-1}$)
$D_{\text{Stahl}} = 39 \text{ mm}$	Verringelter Durchmesser des Stahls von 39 mm
$D_{\text{Aluminium}} = 39 \text{ mm}$	Verringelter Durchmesser der Aluminiumlegierung von 39 mm
$T = 0^\circ \text{C}$	Kühlen beider Halbzeuge auf 0°C mithilfe einer Kühleinheit
$T = 100^\circ \text{C}$	Aufwärmen beider Halbzeuge auf 100°C mithilfe eines Ofens
Geringere Härte (40 HV)	Lösungsglühen des Halbzeuges aus der Aluminiumlegierung im Ofen ($t = 30 \text{ min}, T = 400^\circ \text{C}$)

3.2 Einstellung unterschiedlicher Eingangsbedingungen

Zur Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Halbzeugeigenschaften auf die Prozessstabilität des RRS wurden gezielt Parameter wie die Oberflächenrauheit der Stahlseite, die Härte der Aluminiumlegierung, die Temperatur sowie der Durchmesser der Halbzeuge variiert. Dabei wird nur die Oberfläche des Stahls betrachtet, da dieser im Vergleich zur Aluminiumlegierung aufgrund höherer Fließspannung nicht plastifiziert. Die jeweiligen Ausführungen sind in **Tabelle 2** dargestellt.

Wenn nicht anders angegeben, kam eine Wendeschneidplatte (WSP) mit einem Eckenradius von $r_e = 0,8 \text{ mm}$ zum Einsatz. Alle Drehbearbeitungen wurden mit einer Drehzahl von 1255 min^{-1} und einem Vorschub in X-Richtung von $0,138 \text{ mm/U}$ durchgeführt. Die eingestellten Oberflächen wurden mithilfe eines 3D-Profilometers VR-3200 der Firma Keyence makroskopisch erfasst. Die mikroskopischen Oberflächengüten wurden optisch durch ein Konfokalmikroskop Smartproof 5 der Firma Zeiss charakterisiert.

3.3 Rotationsreibschweißen

Der RRS-Prozess (**Bild 1**) wurde auf einer Reibschiweißanlage "Kuka Genius Plus" mit kontinuierlichem Antrieb durchgeführt.

Zu Prozessbeginn rotierte das Stahlbauteil im Spindelspannfutter mit einer Drehzahl von etwa 700 min^{-1} . Parallel dazu erfolgte die axiale Zustellung des Halbzeuges aus der Aluminiumlegierung in Richtung des rotierenden Stahls. Der Bauteilkontakt wurde unter einer Anpresskraft von $31,5 \text{ kN}$ hergestellt. Nach dem Kontakt sank die Drehzahl infolge der auftretenden Reibkräfte und wurde durch die Maschinenregelung stabilisiert, bis sie wieder innerhalb des vorgesehenen Toleranzbereichs lag.

Anschließend wurde die Reibkraft auf $125,6 \text{ kN}$ erhöht, bis ein Reibweg von 4 mm erreicht wurde. Aufgrund der geringen Fließspannung der Aluminiumlegierung wurde dieser Abschnitt in vergleichsweise kurzer Zeit durchlaufen; entsprechend fiel die Reibphase im Vergleich zu höherfesten Werkstoffen kurz aus [22]. Es folgte die Stauchphase mit einer Dauer von 6 s bei einer axialen Kraft von 283 kN . Die Nachpressphase erfolgte im Anschluss bei einer reduzierten Kraft von 250 kN , um Rückfede-

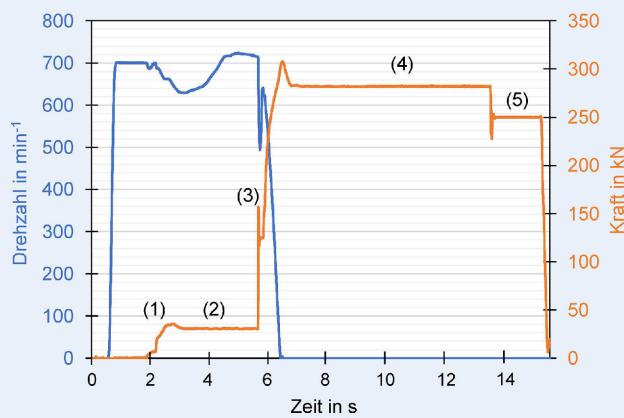


Bild 1 Beispielhafter Verlauf einer Reibschiweißung: (1) Bauteilkontakt, (2) Anreiben, (3) Reiben, (4) Stauchen, (5) Nachpressen. Grafik: IFUM

rungseffekte und die Ausbildung unerwünschter Eigenspannungen im Fügebereich möglichst zu vermeiden.

3.4 Ultraschallprüfung

Nach dem RRS wurden die Proben mittels Ultraschall-Puls-Echo-Verfahren untersucht. Zur Erhöhung der Eindringtiefe wurde eine niedrigere Frequenz als in früheren Studien verwendet, jedoch mit Verringerung der Fehlerauflösung [13]. Zum Einsatz kamen eine „Krautkrämer MB4S-Sonde“ (10 mm, 4 MHz) und ein „USLT 2000“-Gerät (jeweils hergestellt von GE Sensing & Inspection Technologies GmbH). Als Kopplungsmedium diente Wasser. Die Messungen erfolgten auf der Seite der Aluminiumlegierung, wobei die Sonde mittig auf der plangedrehten Stirnfläche positioniert wurde (**Bild 2**). Die resultierenden A-Bilder weisen ein charakteristisches Muster auf: Der erste Ausschlag nahe dem Ursprung entspricht dem Anregungsimpuls der Ultraschallsonde, der zweite Ausschlag dem Echo der Fügezone (FZE) und der letzte Ausschlag der Reflexion der Probenrückseite (RSE).

Zur Bewertung des Verbundes wurde die Intensität des FZE herangezogen. Dabei gilt: Je mehr Schallenergie von Hohlräumen

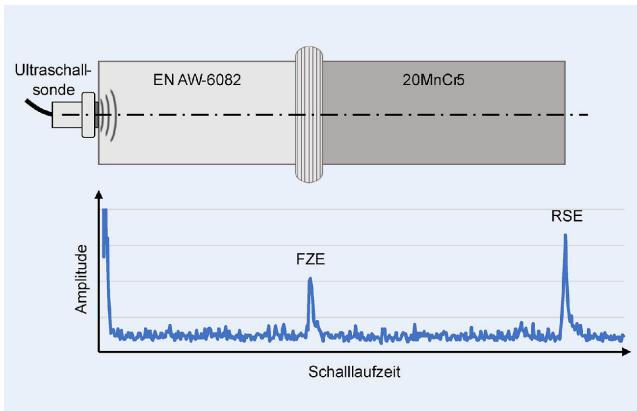


Bild 2 Ultraschallprüfung: Sensorplatzierung und Signalschema mit Fügezonenecho (FZE) und Rückseitenecho (RSE) *Grafik: IW*

zwischen den beiden Materialien reflektiert wird, desto stärker fällt die resultierende Amplitudenantwort aus [13]. Da absolute Amplitudenwerte stark von den Kopplungsbedingungen wie der Oberflächenrauheit und dem Anpressdruck abhängen, wurde die Intensität des RSE (\hat{A}_{RSE}) zur Normalisierung der FZE-Amplitude (\hat{A}_{FZE}) herangezogen. Die Berechnung des Amplitudenverhältnisses (**Gleichung 1**) erfolgte gemäß dem Ansatz, der bereits im Rahmen des Forschungsprojekts angewendet wurde [19, 20].

$$\text{Amplitudenverhältnis} = \frac{\hat{A}_{RSE}}{\hat{A}_{FZE}}$$

Um mögliche Schwankungen zu berücksichtigen, wurden an jeder Probe mindestens drei Messungen durchgeführt. Die erfassten Werte wurden gemittelt, um einen einzelnen repräsentativen Wert pro Probe zu erhalten. Innerhalb der Messwerte je Probe und je Parametervariation traten stellenweise Ausreißer auf, die auf der Grundlage des Interquartilsabstands erfasst und ausgeschlossen wurden.

3.5 Zerstörende Prüfung

Nach der zerstörungsfreien Prüfung wurden die reibgeschweißten Proben für die nachfolgende Zugprüfung spanend durch Drehen auf einen Durchmesser von 30 mm reduziert. Die Probengeometrie entspricht einer Rundzugprobe in Anlehnung an die DIN EN ISO 6892-1 (**Bild 3**).

Daraufhin wurden die Proben einem uniaxialen Zugversuch zur Bestimmung der Verbundfestigkeit unterzogen. Die mechanischen Prüfungen erfolgten auf einer Universalprüfmaschine des Typs „AllroundLine Z250“ der Firma ZwickRoell. Die spanende Bearbeitung kann oberflächennahe thermische sowie mechanische Eigenspannungen erzeugen [23, 24]. Weiterhin werden Randbereiche, in denen die höchsten Rotationsgeschwindigkeiten beim RRS vorliegen und im Vergleich zum Bauteilzentrum potenziell bessere Anbindungen aufweisen, entfernt [5]. Die Reduzierung des Durchmessers ist erforderlich, um einen Bruch bei dieser Prüfanlagentechnik mit maximal 250 kN Prüfkraft zu gewährleisten. Weiterhin ist die Vergleichbarkeit zwischen den Probenreihen durch die gleichbleibende Bearbeitung nicht eingeschränkt. Aufgrund der begrenzten Spannlänge wurden an den Enden der Proben Gewinde eingebracht, um eine kraftschlüssige Verbindung mit Adapters für die Prüfmaschine zu erzeugen.

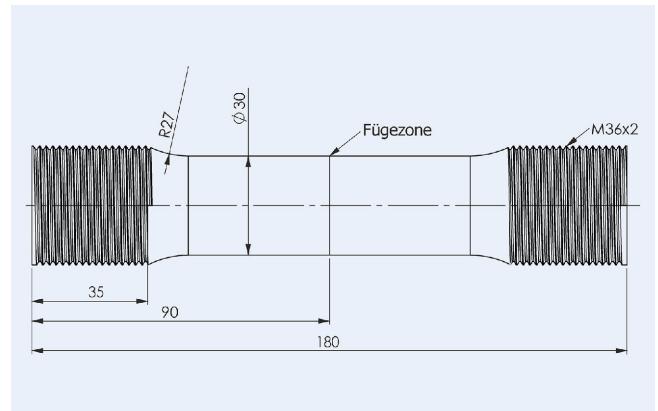


Bild 3 Probengeometrie für die Zugprüfung. *Grafik: IFUM*

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Oberflächenzustand

Die mikroskopische Analyse der bearbeiteten Stahloberflächen offenbart deutliche Unterschiede bei der Rauheitsverteilung und der Strukturhomogenität (**Bild 4**).

Flächen, die mit definierter Schneide spanend bearbeitet wurden, weisen regelmäßig ausgeprägte, radial ausgerichtete Riefen auf, deren Tiefe mit steigendem Eckenradius der Wendeschneidplatten abnimmt. Die resultierende Mikrostruktur ist geometrisch definiert und funktional ausgerichtet, wodurch eine gezielte Steuerung von Materialfluss und Wärmeeintrag im Reibkontakt ermöglicht wird.

Die mit Schleifpapier behandelten Flächen weisen eine überwiegend isotrope Oberflächentextur mit geringer mittlerer Rauheit auf. Gleichzeitig sind stellenweise noch Riefen des vorangegangenen Drehprozesses erkennbar. Die mit Glasperlen gestrahlte Oberfläche weist eine isotrope, richtungslose Mikrorauigkeit auf. Diese ist für den RRS-Prozess ungünstig, da eine funktionale Struktur zur gezielten Steuerung des Materialflusses und der Reibwärmeerzeugung fehlt. Zudem kann die unregelmäßige, rauere Oberflächenstruktur lokale Einschlüsse von Luft oder Oxidresten begünstigen, wodurch die durchgängige Ausbildung einer homogenen metallurgischen Verbindung beeinträchtigt wird [5]. Ergänzend dazu verdeutlichen die makroskopischen Aufnahmen klare Unterschiede in Formgenauigkeit und Struktur (**Bild 5**).

Zerspanend bearbeitete Flächen weisen eine rotationssymmetrische Geometrie mit hoher Planparallelität auf, die sich in der mikroskopisch erkennbaren, gerichteten Riefenstruktur fortsetzt. Aufgrund der abnehmenden Relativgeschwindigkeit zur Rotationsachse wird die Oberflächengüte bei drehenden Bearbeitungsverfahren zum Rotationszentrum hin geringer ausgebildet. Die abnehmende Schnittgeschwindigkeit im inneren Bereich führt zu weniger effektiver Spanbildung und damit zu einer größeren, weniger definierten Struktur.

Die mit Schleifpapier bearbeitete Oberfläche weist im makroskopischen Maßstab eine ausgeprägte Welligkeit auf. Vor allem in tangentialer Richtung treten großflächige Höhenunterschiede auf, die zu einer ungleichmäßigen Auflage und variierenden Fügespalten führen können. Diese Makrounregelmäßigkeiten beeinträchtigen die planparallele Kontaktbildung im Reibschiessprozess und können lokale Druck- und Temperaturverteilungen negativ beeinflussen. Trotz der lokal geringen Rauheit fehlt eine übergeordnete

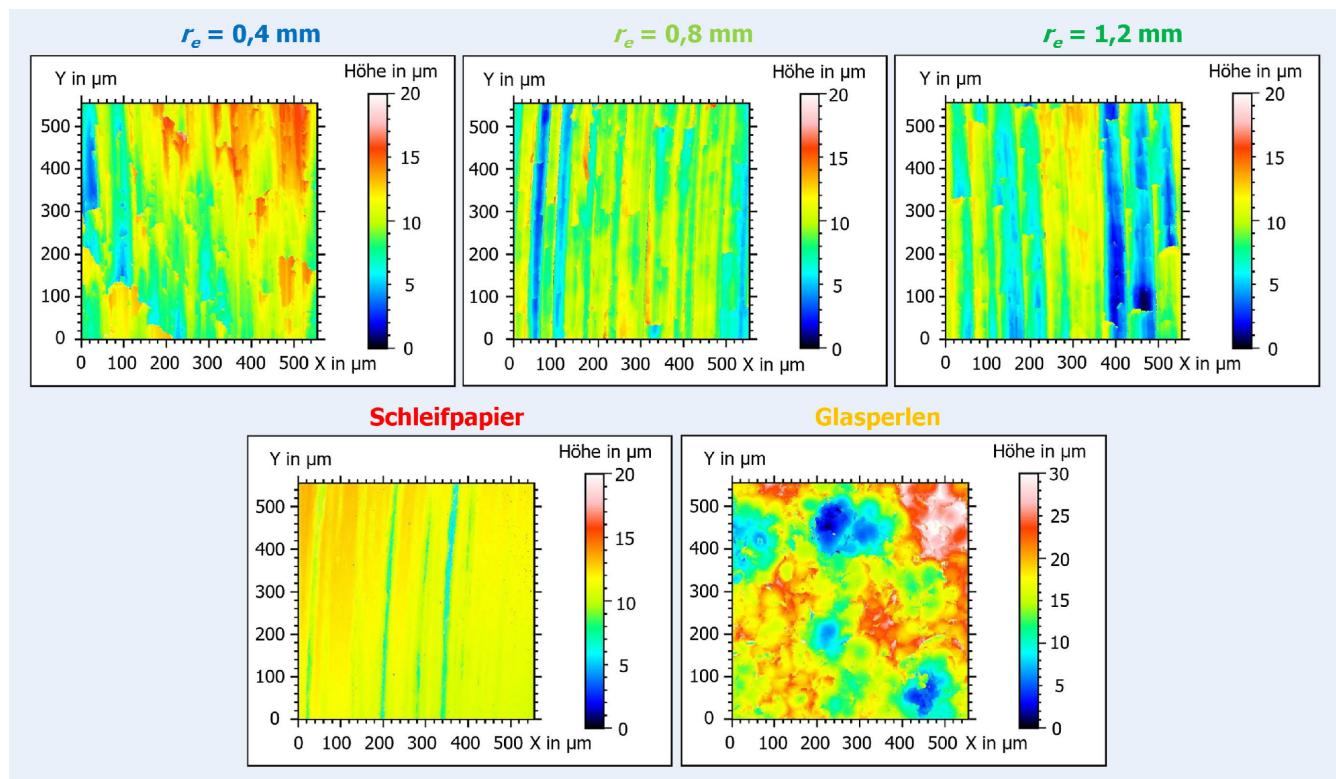


Bild 4 Topografische Karte der Oberflächen in Abhängigkeit der verwendeten Behandlung; 10 mm vom Rand. *Grafik: IFUM*

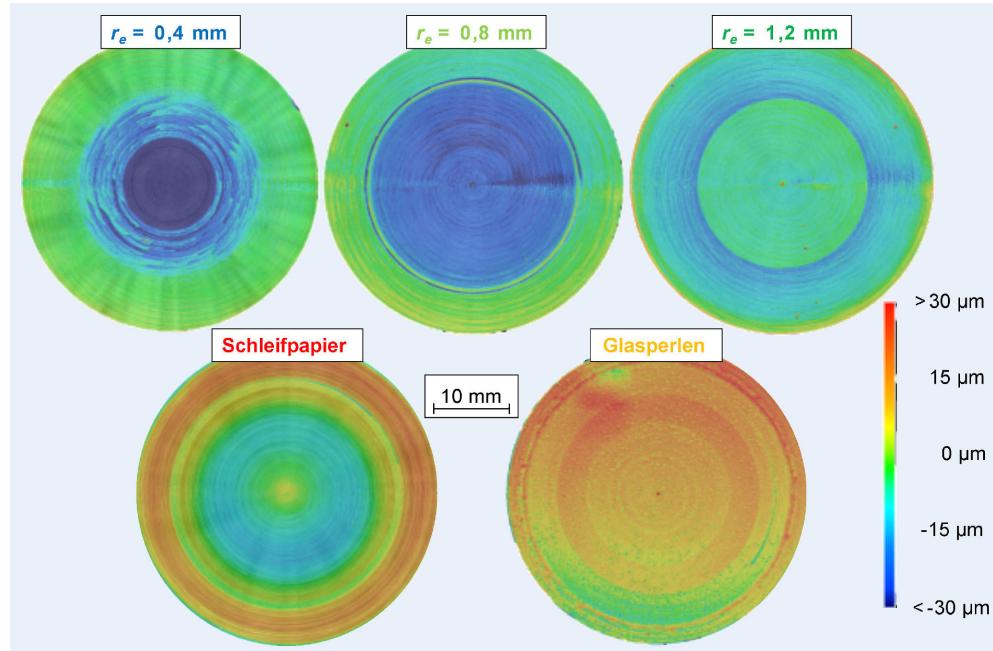


Bild 5 Makroskopische Höhenkarte der Schweißfläche in Abhängigkeit der verwendeten Vorbehandlung. *Grafik: IFUM*

Struktur. Die mit Glasperlen gestrahlte Fläche erscheint makroskopisch homogen, weist aber mikroskopisch eine grobe, isotrope Rauheit auf, wodurch weder Orientierung noch gezielter Materialfluss im Fügeprozess unterstützt werden.

4.2 Ausbildung des Schweißwulstes

Die Ausbildung des Schweißwulstes beim RRS von Stahl und Aluminiumlegierungen wird stark durch Prozessparameter und

Materialeigenschaften beeinflusst. Da die verwendete Aluminiumlegierung deutlich weniger fest ist als der Stahl, bildet sich beim Fügen ein sichtbarer Wulst aus. Die Form des Wulstes variiert in Abhängigkeit der jeweiligen Bedingungen (Bild 6).

Gedrehte Oberflächen mit definierter Schneide begünstigen beim Rotationsreibschweißen einen gleichmäßigen Materialfluss und führen zu einem sauberen, definierten Wulst. Eine mit Glasperlen gestrahlte Oberfläche weist eine erhöhte Rauheit auf und beeinflusst dadurch die Reibung beim Kontakt. Der Materialfluss

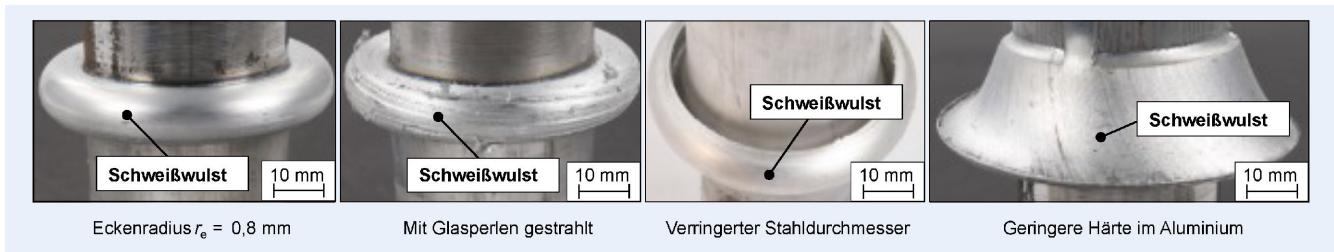


Bild 6 Unterschiedliche Ausbildung des Schweißwulstes aufgrund veränderter Eingangsbedingungen. Foto: IFUM

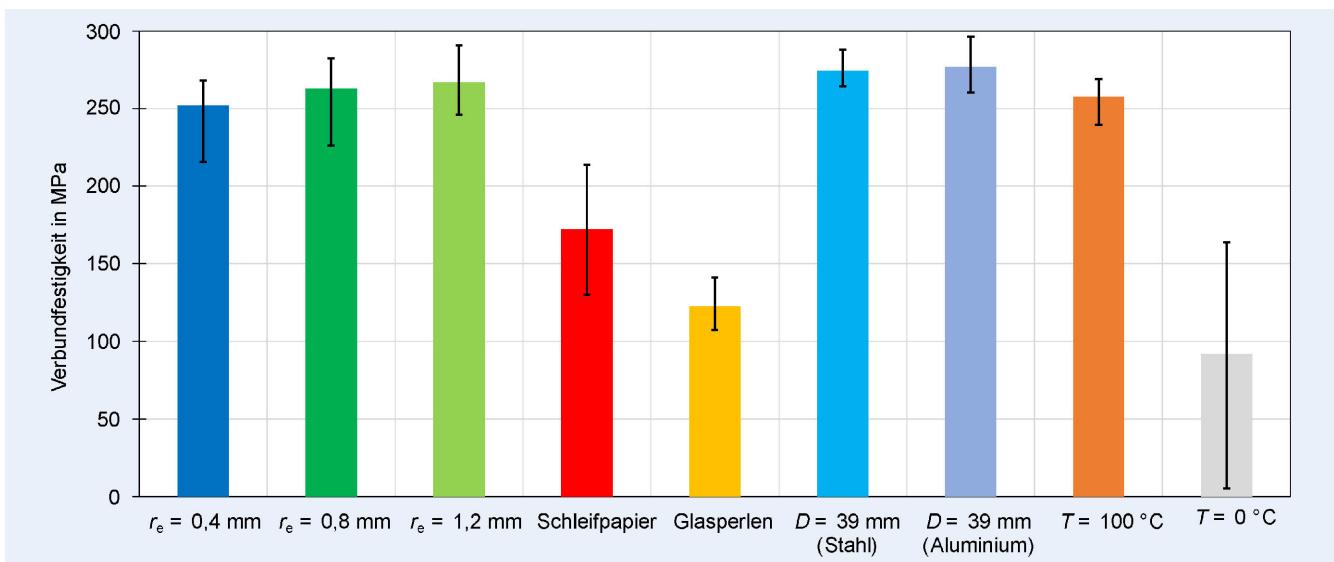


Bild 7 Verbundfestigkeiten in Abhängigkeit der veränderten Eingangsbedingungen mit je drei Wiederholungen. Grafik: IFUM

an der Oberfläche wird ungleichmäßiger, der Wulst besitzt eine leicht ausgefranste Struktur. Ein verringelter Stahldurchmesser verändert das Fügevolumenverhältnis; die Aluminiumlegierung wird stärker verdrängt, der Wulst fällt steiler und voluminöser aus. Bei niedrigerer Härte der Aluminiumlegierung verformt sich das Material leichter, der Wulst wirkt breiter und weniger klar abgegrenzt. Aufgrund der hohen Verkürzung und Unterschreitung der erforderlichen Mindestlänge für die Zugprüfung wurden Proben mit geringerer Härte auf der Seite der Aluminiumlegierung als ungeeignet eingestuft und nicht weiter betrachtet.

4.3 Verbundfestigkeiten

Abhängig von den veränderten Eingangsbedingungen resultieren unterschiedliche Verbundfestigkeiten aus dem uniaxialen Zugversuch (Bild 7).

Ein leichter, aber konsistenter Anstieg der Verbundfestigkeit ist bei zunehmendem Eckenradius der eingesetzten WSP zu beobachten. Der Mittelwert steigt von etwa 252 MPa bei $r_e = 0,4 \text{ mm}$ auf 263 MPa bei $r_e = 0,8 \text{ mm}$ bis hin zu 267 MPa bei $r_e = 1,2 \text{ mm}$. Fein strukturierte und planparallele Oberflächen fördern die Ausbildung stoffschlüssiger Verbindungen, da sie einen kontrollierten Wärmeübergang, eine definierte Kontaktfläche und minimierte lokale Spannungsspitzen ermöglichen. Je gleichmäßiger die Oberfläche im Mikro- und Makrobereich, desto gleichmäßiger erfolgt die Plastifizierung der Aluminiumlegierung. Dies wiederum wirkt sich positiv auf die lokalen Verbundeigenschaften aus [6].

Die Schleifpapierbearbeitung erzielt mit etwa 172 MPa eine deutlich geringere Verbundfestigkeit, da die mechanische Integrität der Verbindung durch makroskopische Formabweichungen beeinträchtigt wird. Die Welligkeit der Schweißfläche führt zu inhomogener Auflage und ungleichmäßiger Erwärmung während der Reibphase. Die Konsequenz ist eine unvollständige Plastifizierung und somit die Ausprägung schwacher Verbindungszenonen.

Die mit Glasperlen gestrahlte Oberfläche weist ebenfalls eine vergleichsweise geringe Verbundfestigkeit von circa 130 MPa auf, da sie eine isotrope, ungerichtete Rauheit mit hoher Porosität aufweist. Diese Struktur begünstigt Mikroinschlüsse von eventuellen Verunreinigungen, Luft oder Oxiden und führt zu einem ungleichmäßigen Kontaktverhalten während der Reibphase. Infolge der unkontrollierten Oberflächentopografie entstehen lokal ungebundene Zonen, welche die Ausbildung einer homogenen, stoffschlüssigen Verbindung behindern.

Die Reduktion des Fügedurchmessers auf 39 mm bei konstanten Reibparametern führt zu einem Anstieg der Verbundfestigkeit. Durch die kleinere Fügefläche entstehen lokal höhere spezifische Reib- und Stauchdrücke. Besonders der Stauchdruck wirkt sich positiv auf die Verbindung aus, da er die plastische Verformung sowie eine Materialvermischung intensiviert und so den Stoffschluss zwischen der Aluminiumlegierung und dem Stahl begünstigt [11].

Während bei einer Vorwärmung der Halbzeuge auf 100°C im Vergleich zur Raumtemperatur ähnliche Festigkeiten mit geringer Streuung erzielt werden, sinkt die Festigkeit bei 0°C drastisch ab. Eine niedrige Anfangstemperatur verlängert die Reibdauer, bis

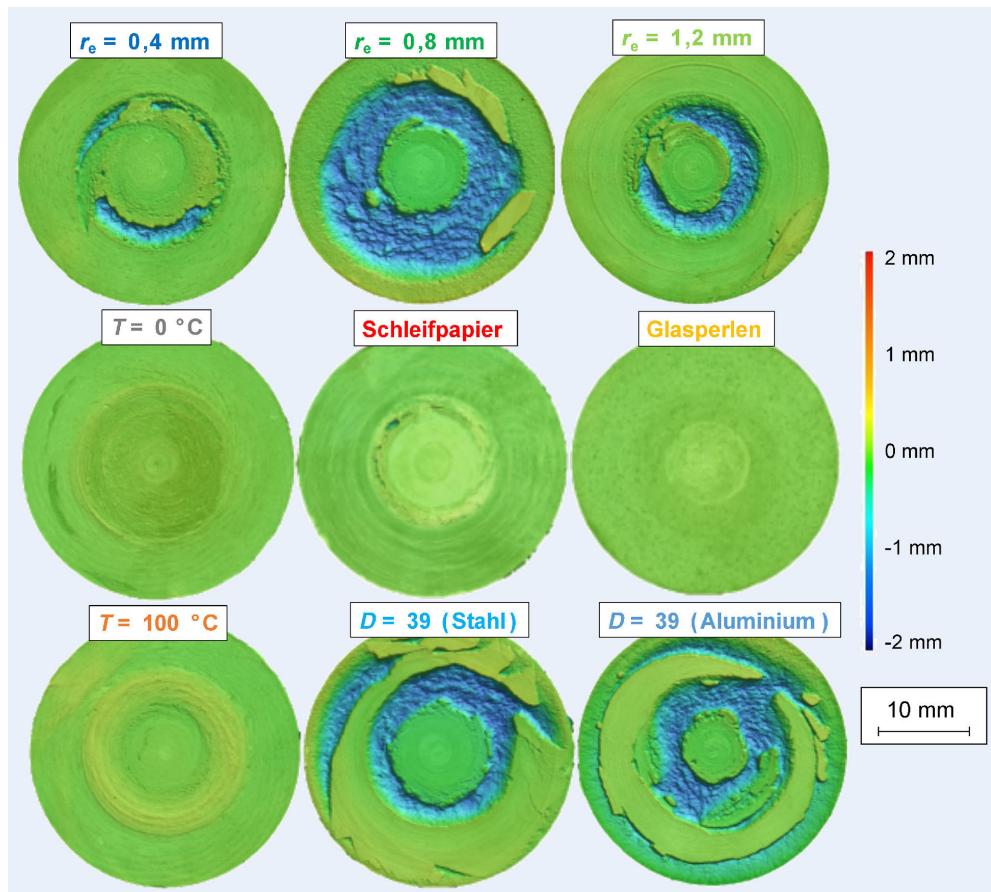


Bild 8 Bruchflächen der Aluminiumlegierung nach dem Zugversuch in Abhängigkeit der varierten Eingangsbedingungen.

Grafik: IFUM

ausreichend Wärme für die notwendige Plastifizierung generiert wird. In dieser Phase entstehen lokale Unregelmäßigkeiten, unvollständige Oxidauflösungen und reduzierte Verbindungsflächen. Außerdem wird das Wachstum intermetallischer Phasen gezielt begrenzt, da deren inhomogene Ausbildung zu Defekten entlang des Verbundes führen kann [8, 25]. Eine dünne, kontinuierliche Zwischenschicht aus intermetallischen Verbindungen gilt aber als erforderlich für die Ausbildung eines tragfähigen stoffschlüssigen Verbunds zwischen Aluminiumlegierungen und Stahl [26].

Die ergänzende Analyse der aluminiumlegierungsseitigen Bruchflächen (**Bild 8**) bestätigt die Ergebnisse der erzielten Verbundfestigkeiten und gibt Aufschluss über die Art des Versagens.

In den Höhenkarten markieren blaue Bereiche Zonen, in denen die Aluminiumlegierung beim Bruch am Stahl haften blieb – ein Hinweis auf ein Versagen außerhalb der Fügezone. Diese Ausbrüche gelten als Indikator für eine besonders starke Verbindung. Solche Ausbrüche treten vor allem bei den Proben mit spanend erzeugter Oberfläche ($r_e = 0,4$ bis $1,2$ mm) sowie mit erhöhter Stauchkraft bei reduziertem Durchmesser auf und unterstreichen die hohe Festigkeit der Verbindung in diesen Fällen.

Bei den vorgewärmten Proben (100°C) konnten trotz hoher Verbundfestigkeit keine aluminiumlegierungsseitigen Ausbrüche beobachtet werden. Dieses Verhalten lässt auf ein geändertes Versagensmuster schließen. Höhere Temperaturen bewirken eine verbesserte Wärmeverteilung während der Reibphase [6]. Die erhöhte Halbzeugtemperatur begünstigt die Bildung einer dünnen, kontinuierlichen intermetallischen Fe-Al-Phasenschicht. Diese ermöglicht eine flächige metallurgische Anbindung, kann jedoch bei zu starkem Anwachsen zu sprödem Bruchverhalten

führen [21, 27]. Übersteigt die Festigkeit der Aluminiumlegierung jene der spröden intermetallischen Phase, verlagert sich die Bruchfläche in die Fügezone und Ausbrüche in der Aluminiumlegierung bleiben weitestgehend aus. Ein ähnliches Verhalten wurde auch von Ma *et al.* bei feinpolierten Stahloberflächen beschrieben, bei denen trotz hoher Festigkeit ein Versagen ohne ersichtlichen Materialübertrag auftrat [5].

4.4 Ultraschallprüfung

Die Amplitudenverhältnisse der Ultraschallprüfung (**Bild 9**) der mit unterschiedlichen Wendeschneidplatten bearbeiteten Proben stehen im direkten Zusammenhang mit den Verbundfestigkeiten. Werte über 1 weisen auf ein im Vergleich zum RSE kleineres FZE hin und deuten auf eine gute Schallleitung ohne größere, reflexionsverursachende Defekte [19, 20].

Obwohl das Amplitudenverhältnis der geschliffenen Proben vergleichsweise hoch ist, erreichen diese deutlich niedrigere mechanische Kennwerte (Bild 7). Zudem verdeutlicht diese Abweichung die Unzulänglichkeit einer ausschließlich auf das zentrale Segment der Fügezone fokussierten Ultraschallprüfung. Wie in Bild 8 erkennbar, können relevante Anbindungen auch weiter außen im Querschnitt auftreten.

Bei den mit Glasperlen gestrahlten Proben korrelieren die Ultraschallergebnisse mit den verminderten Verbundfestigkeiten, weisen aber trotz Bereinigung der Ausreißer eine hohe Standardabweichung auf. Beides lässt sich durch die vermuteten Einschlüsse zwischen den Verbundpartnern erklären. Diese reflektieren zwar gut den Schall, streuen jedoch vermutlich einen Teil davon

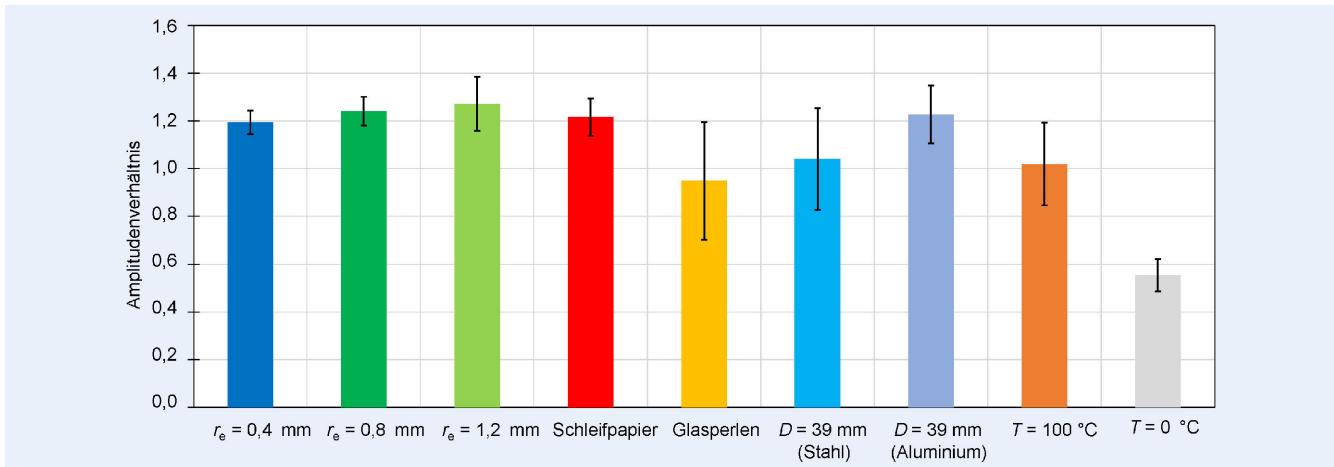


Bild 9 Ergebnisse der Ultraschallprüfung in Abhängigkeit der varierten Eingangsbedingungen. Grafik: IW

zur Seite ab, wenn von der grob-porösen Bruchfläche auf die Größe und Ausrichtung dieser Einschlüsse geschlossen wird.

Die Proben mit verringertem Querschnitt der Halbzeuge lassen sich nicht direkt mit den Referenzproben vergleichen, da sich durch die angepasste Geometrie die Ausbildung des Schallfeldes innerhalb der Probe verändert. Die verschobenen Kantenreflexionen an den Mantelflächen variieren die Anteile der von der Sonde erfassten FZE und RSE und verzerrten somit das resultierende Amplitudenverhältnis im Vergleich zur Standardprobengeometrie.

Die Fügezonen der vorgewärmten Proben weisen eine schlechtere Schallleitung als die Referenz auf, was auf eine kleine fehlerfrei angebundene Fläche hindeutet, erreichen jedoch ähnlich hohe Verbundfestigkeiten, wofür womöglich das Wachstum der intermetallischen Phasen verantwortlich ist. Bei vorgekühlten Proben lassen sich die zuvor beschriebenen Bindefehler in der Verbundzone besonders deutlich erkennen. Diese spiegeln sich klar in den niedrigen Amplitudenverhältnissen der Ultraschalluntersuchung wider.

Die durchgeführte Ultraschallprüfung lieferte unter eng kontrollierten Bedingungen, etwa bei spanend bearbeiteten Proben mit definierter Schneide, quantitativ vergleichbare Ergebnisse. Abweichungen in Probengeometrie oder Oberflächenbehandlung reduzierten die Vergleichbarkeit zur Referenz deutlich. Eine ausreichende Sensitivität für einen qualitativen Vergleich konnte für vermutete Einschlüsse in der Fügezone gezeigt werden, wie bei den mit Glasperlen gestrahlten und vorgekühlten Proben. Die Methode stößt vermutlich an ihre Grenzen, sobald der Einfluss des Wachstums der intermetallischen Phasen auf die Verbundfestigkeit den der fehlerfrei angebundenen Fläche überwiegt.

Die alleinige Beschallung einer Kreisfläche von circa 10 mm Durchmesser des Fügezonenzentrums erwies sich insgesamt als unzureichend, da die weiter außen liegenden Bereiche mit höherer Verbundfestigkeit unberücksichtigt bleiben (Bild 8) [11]. Abhilfe könnte eine Verschiebung des Prüfkopfes entlang des Probenradius schaffen, die jedoch eine Vergleichbarkeit der radialen Positionen einschränkt und eine separate Betrachtung erfordert. Alternativ ließe sich ein Prüfkopf mit größerem Schwingerdurchmesser einsetzen, wobei mit zunehmender Größe die erreichbare Prüffrequenz und damit die Fehlerauflösung sinkt [13].

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Einfluss variierender Eingangsparameter auf die Verbundfestigkeit von rotationsreibgeschweißten Verbindungen aus Stahl und einer Aluminiumlegierung untersucht. Im Fokus standen die Auswirkungen von Oberflächenrauheit, Bauteiltemperatur und -durchmesser auf die Ausbildung des Schweißverbunds. Zur Bewertung wurden sowohl ein zerstörendes (Zugversuch) als auch ein zerstörungsfreies Prüfverfahren (Ultraschallprüfung) eingesetzt. Die erzielten Ergebnisse belegen eine Erhöhung der Verbundfestigkeit bei fein strukturierten, planparallelen Oberflächen sowie bei erhöhten Stauchdrücken. Die Ultraschallprüfung erwies sich als geeignet zur qualitativen Bewertung der Verbindungszone, wies jedoch Grenzen bei der Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen unterschiedlichen Eingangsbedingungen auf.

Für zukünftige Anwendungen wird angestrebt, das Verfahren anzupassen und gezielt zur Inline-Prüfung einzusetzen, um die gesamte Grenzfläche nichttragfähiger Bauteile frühzeitig zu charakterisieren und vor nachgelagerten Umformprozessen auszusortieren. Bei entsprechend prozesssicher erzeugten, planparallelen Fügezonen kann die Ultraschallprüfung eine wirksame Methode zur Qualitätssicherung und Ausschussvermeidung sein.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – SFB 1153 TP A01 und B03. Projektnummer 252662854.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem TP A02 für die Durchführung der Funkenspektrometrie zur Ermittlung der chemischen Zusammensetzung der eingesetzten Versuchswerkstoffe.

LITERATUR

- [1] Behrens, B.-A.; Uhe, J.; Ross, I. et al.: Tailored Forming of hybrid bulk metal components. International Journal of Material Forming 15 (2022), #42, pp. 1–19, doi.org/10.1007/s12289-022-01681-9
- [2] Uhe, J.; H. Wester H.; B. -A. Behrens: Numerical Process Design for the Production of a Load-Adapted Hybrid Bearing Bushing. Key Engineering Materials 957 (2023), pp. 143–150, doi.org/10.4028/p-6wqNCb
- [3] Nicholas, D.: Friction Welding: a worldwide literature survey. Abington/UK: TWI Ltd 1990
- [4] Ambroziak, A.; Korzeniowski, M.; Winnicki et al. (2014). Friction welding of aluminium and aluminium alloys with steel. Advances in Materials Science and Engineering (2014), pp. 1–15, doi.org/10.1155/2014/981653
- [5] Ma, H.; Qin, G.; Dang, Z; et al.: Interfacial microstructure and property of 6061 aluminium alloy/stainless steel hybrid inertia friction welded joint with different steel surface roughness. Materials Characterization, 179 (2021), #111347, doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111347
- [6] Behrens, B.-A.; Chugreev, A.; Selinski, M. et al.: Joining zone shape optimisation for hybrid components made of aluminium-steel by geometrically adapted joining surfaces in the friction welding process. AIP Conference Proceedings 2113 (2019), #40027, doi.org/10.1063/1.5112561
- [7] Rajak, D. K.; Pagar, D. D.; Menezes, P. L. et al.: Friction-based welding processes: friction welding and friction stir welding. Journal of Adhesion Science and Technology 34 (2020) 24, pp. 2613–2637, doi.org/10.1080/01694243.2020.1780716
- [8] Herbst, S.; Maier, H. J.; Nürnberg, F.: Strategies for the Heat Treatment of Steel-Aluminium Hybrid Components. HTM Journal of Heat Treatment and Materials 73 (2018) 5, pp. 268–282, doi.org/10.3139/105.110368
- [9] Irawan, Y. S.; Imawan, B.; Soenoko, R.; et al.: Effect of surface roughness and chamfer angle on tensile strength of round aluminum A6061 produced by continuous drive friction welding. Journal of Engineering and Applied Sciences 11 (2016), pp. 1178–1185
- [10] Kimura, M.; Saitoh, Y.; Kusaka, M. et al.: Effect of Friction Welding Condition and Weld Faying Surface Properties on Tensile Strength of Friction Welded Joint between Pure Titanium and Pure Copper. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering 5 (2011) 12, pp. 849–865, doi.org/10.1299/jmmp.5.849
- [11] Dewidar, A.; Verschinin, A.; Mohnfeld, N. et al.: Experimental investigation of rotational friction welding for EN AW-6082 – 20MnCr5 joints. Materials Research Proceedings 54 (2025), pp. 1479–1488, doi.org/10.21741/9781644903599-160
- [12] Schiebold, K.: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung – Ultraschallprüfung. Heidelberg: Springer-Verlag 2015
- [13] Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: Ultrasonic Testing of Materials. Heidelberg: Springer-Verlag 1990
- [14] Zhang, J.; Cho, Y.; Kim, J. et al.: Non-Destructive Evaluation of Coating Thickness Using Water Immersion Ultrasonic Testing. Coatings 11 (2021) 11, #1421, doi.org/10.3390/coatings1111421
- [15] Bastianini, F.; Di Tommaso, A.; Pascale, G.: Ultrasonic Nondestructive Assessment of Bonding Defects in Composite Structural Strengthenings. Composite Structures 53 (2001) 4, pp. 463–467, doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00058-7
- [16] Yilmaz, B.; Jasiuniene, E.: Advanced Ultrasonic NDT for Weak Bond Detection in Composite-Adhesive Bonded Structures. International Journal of Adhesion and Adhesives 102 (2020), #102675, doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102675
- [17] Fortunato, J.; Anand, C.; Braga, D. F. O.; et al.: Friction Stir Weld-Bonding Defect Inspection using Phased Array Ultrasonic Testing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 93 (2017), pp. 3125–3134, doi.org/10.1007/s00170-017-0770-7
- [18] Liu, F.; Liu, S.; Li, L.: Ultrasonic Evaluation of Friction Stir Welding. 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai/China, 2008. Special issue of e-Journal of Nondestructive Testing 13 (2008) 11, www.ndt.net/?id=6516
- [19] Fricke, L. V.; Thürer, S. E.; Kahra, C.; et al.: Non-destructive Evaluation of Workpiece Properties along the Hybrid Bearing Bushing Process Chain. Journal of Materials Engineering and Performance 32 (2023) 15, pp. 7004–7015, doi.org/10.1007/s11665-022-07598-3
- [20] Mohnfeld, N.; Dewidar, A.; Qarbi, K.; et al.: Non-Destructive and Mechanical Characterization of the Bond Quality of Co-Extruded Titanium-Aluminum Profiles. Advanced Engineering Materials 27 (2024) 16, #2401716, doi.org/10.1002/adem.202401716
- [21] Wang, H.; Qin, G.; Geng, P. et al.: Interfacial microstructures and mechanical properties of friction welded Al/steel dissimilar joints. Journal of Manufacturing Processes 49 (2020), pp. 18–25, doi.org/10.1016/j.jma pro.2019.11.009
- [22] Schuler, V.; Twrdk, J.: Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. Wiesbaden: Springer Vieweg 2024, doi.org/10.1007/978-3-658-41548-8
- [23] Liao, Z.; la Monaca, A.; Murray, J. et al.: Surface integrity in metal machining – Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms. International Journal of Machine Tools and Manufacture 162 (2021), #103687, doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103687
- [24] la Monaca, A.; Murray, J. W.; Liao, Z. et al.: Surface integrity in metal machining – Part II: Functional performance. International Journal of Machine Tools and Manufacture 164 (2021), #103718, doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103718
- [25] Yamamoto, N.; Takahashi, M.; Aritoshi, M. et al.: Formation of Intermetallic Compounds in Friction Bonding of Al Alloys to Steel. Materials Science Forum 539–543 (2007), pp. #3865–3871, doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.539–543.3865
- [26] Jessop, T. J.; Nicholas, E. D.; Dinsdale, W. O.: Friction welding of dissimilar metals. Advances in Welding Processes. Proceedings 4th International Conference, Harrogate/England, The Welding Institute 1978, pp. 23–36
- [27] Fukumoto, S.; Inuki, T.; Tsubakino, H. et al: Evaluation of friction weld interface of aluminium to austenitic stainless steel joint. Materials Science and Technology 13 (1997), 8, pp. 679–686, doi.org/10.1179/mst.1997.13.8.679

Armin Piwek, M. Sc. 

piwek@ifum.uni-hannover.de

Julian Bosse, M. Sc. 

Julius Peddinghaus, M. Sc. 

Dr.-Ing. Johanna Uhe 

Dr.-Ing. Kai Brunotte 

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen IFUM
PZH der Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, 30823 Garbsen
www.ifum.uni-hannover.de

Alexej Verschinin, M. Sc. 
verschinin@iw.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Sebastian Barton 

Institut für Werkstoffkunde (IW)
PZH der Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, 30823 Garbsen
www.iw.uni-hannover.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)