

## Teilprojekt A7 2018

### Titel

Nutzung der partiellen metallurgischen Injektion zur Steuerung der Erstarrungskräfte bei Schmelzschweißprozessen

### Projektleitung/-bearbeitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen,  
Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF)

### Aufgabenstellung

Im ersten Jahr lag der Fokus der Arbeiten primär auf der „Befähigung“, insbesondere der Aufbau der Messtechnik und Prüfstände im Vordergrund der Arbeiten. Im zweiten Jahr wurden diese genutzt um durch Prozessbeobachtung der Entstehung von Eigenspannungen sowie der Analyse der Erstarrung- und Umwandlungsvorgänge sowie Temperaturen der metallurgischen Deposition einen Erkenntnisgewinn auf diesen Bereichen zu erzielen. Im dritten Jahr stand der Nachweis des LTT-Effektes, also der lokalen martensitisch Umwandlung und die daraus resultierende Druckspannungseinleitung im Zentrum der Forschung. Im vierten Jahr wurden diese durch in-Situ versuche erweitert. Diese fokussieren einerseits auf die Erstarrungsvorgänge sowie Temperaturen metallurgischen Injektion, bestehend aus Low-Transformation-Temperature Materialien (LTT), als auch Einfluss des Temperaturgradienten und der Phasenzusammensetzung auf den plastischen Bauteilverzug.

### Vorgehensweise

- 1) *Prozessbeobachtung der Entstehung von thermischem und umwandlungsinduziertem Verzug durch hochauflösende Messtechnik – Digitale Bildkorrelation*

Die in-situ Detektion der Entstehung von thermischem und umwandlungsinduziertem Verzug und der Formation von Eigenspannungen im Prozess erfolgte mittels digitaler Bildkorrelation während des Laserstrahlschweißprozesses, da die Eigenspannungen zu denen beim EB vergleichbar sind. Dabei wird vor dem Prozess ein kontrastreiches, zufälliges Farb-Punktemuster auf der Bauteiloberfläche aufgetragen, Abbildung 1 rechts. Dessen Verschiebung und Dehnung wird während der Abkühlung aus der Schmelzwärme mittels eines digitalen Stereokamerasystems ermittelt. Dies erlaubt die Aufnahme von Verschiebungen sowie Dehnungen im dreidimensionalen Raum. Diese Technik ermög-

licht Rückschlüsse auf den vorherrschenden Eigenspannungszustand, aufgelöst nach Ort und Größenordnung. Letzteres erfolgt durch Umrechnung basierend auf Werkstoffkonstanten wie Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl.

Die oberflächlichen Verschiebungen können in Form von Vektoren visuell dargestellt werden, Abbildung 2 links. Dabei repräsentieren der Betrag der Vektoren als auch die Färbung das Maß der Verschiebung der aktuellen Bildaufnahme zum Referenzbild. Neben der Volumenkontraktion in der Schweißnaht infolge der Abkühlung aus der Schmelze sind die Folgen der für die Anwendung des LTT-Effekts relevante Druckspannungsinduzierung während der Phasenumwandlung beobachtbar. Diese äußern sich in einem Rückgang der Verschiebung zur Schweißnaht bis hin zum Aufbau von Bereichen ohne Verschiebung (Übergangsbereich in Abbildung 1 links) Somit sind die Formierung und Verschiebung von Zug- und Druckbereichen optisch identifizierbar. Im direkten Vergleich zwischen konventionellem Schweißdraht und LTT-Zusatzdraht zeigen sich die Unterschiede durch die bei geringerer Temperatur einsetzende Martensitbildung und durch die gesamte bleibende Dehnung (durchschnittliche Ausdehnung der Vektorenlängen).

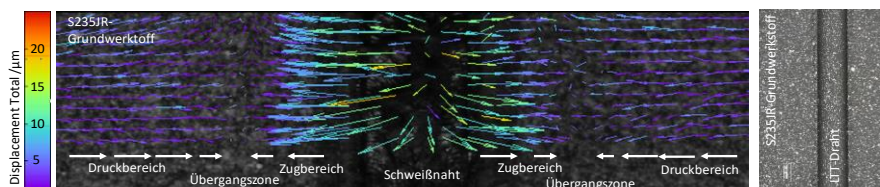


Abbildung 1: Entwicklung von Eigenspannungen während der Erstarung einer Laserstrahlschweißnaht mit LTT-Zusatz-Werkstoff-Wirkung von Druckspannungsentstehung aus Phasenumwandlung. Momentaufnahme während der Abkühlung, bezogen zum Referenzbild im warmen Zustand (links)- Betrag und Farbe der Vektoren beschreiben die Verschiebung/Dehnung, Farb-Punktemuster als Vorbereitung der digitalen Bildkorrelation (rechts)

## 2) Adaption der Drahtförderung im Elektronenstrahlschweißprozess

Die Adaption einer Kaltdrahtfördereinrichtung für LTT-Zusatzmaterial in Drahtform ermöglicht die Deposition des Zusatzwerkstoffes in den Schweißprozess. Der Elektronenstrahl wird durch hochfrequente Wechselfelder in der Ablenkspule aufgeteilt in eine Punktfigur hoher Intensität und einer breit gependelten Linienfigur, Abbildung 2. Die Punktfigur sorgt durch Anwendung des

Tiefschweißeffektes zur Anbindung großer Blechdicken, während die Linienfigur nachlaufend das Zusatzmaterial aufschmilzt. Als Nahtvorbereitung wurde eine rechteckige Nahtfuge in Größendimension des Zusatzdrahtes gewählt. Durch Wahl der chemischen Zusammensetzung des Zusatzdrahtes, der Drahtfördergeschwindigkeit sowie der Leistungsverteilung zwischen Punkt- und Linienfigur kann das Schweißergebnis und die Gefügezusammensetzung in der Schweißnaht beeinflusst werden und folglich auch die Temperatur der martensitischen Phasenumwandlung. Bei der Ausführung von Verbindungsschweißungen ergibt sich somit die Möglichkeit, direkten Einfluss auf den Verzug zu nehmen und diesen z.B. anhand des Winkelverzuges in Querschliffen zu vermessen.

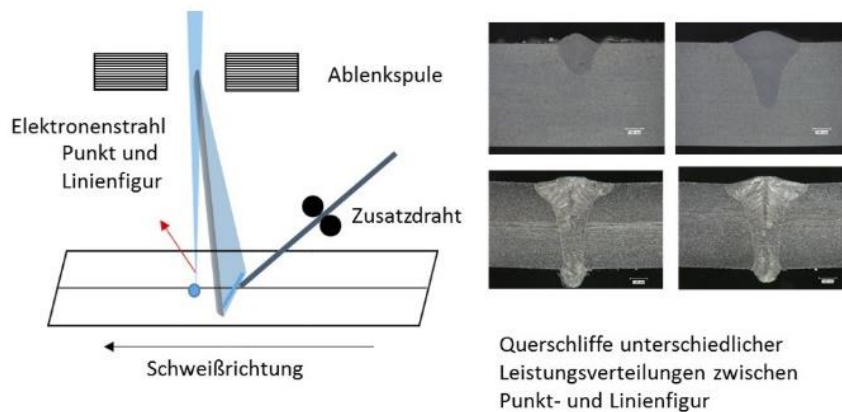


Abbildung 2: Prinzip der Prozessanordnung Partielle metallurgische Injektion (PMI) im Elektronenstrahlschweißprozess (links) und Querschliffe von Schweißnähten mit PMI unterschiedlicher Leistung und Legierungszusammensetzung (rechts)

### Ergebnisse

Bezogen auf die übergeordnete Zielsetzung des SFB in Phase 1 (Messen) kann festgestellt werden, dass mit Digitaler Bildkorrelation sowie hochauflösender Infrarot-Thermografie zwei in-situ Messmethoden für das Strahlschweißen entwickelt wurden, die das Phasenumwandlungsverhalten von Schweißungen aufzeigen.

Je nach Legierungszusammensetzung können Winkelverzüge bereits ohne präzise Optimierung der Umwandlungstemperatur um 30% reduziert werden, wie ein Vergleich zwischen Verbindungsschweißungen an austenitischem Edelstahl (1.4301) mit artgleichem sowie niedriglegiertem Schweißzusatz zeigen, Abbildung 3. Während ein unlegierter Schweißzusatz (oben) ein LTT-Gefüge in der Schweißnaht erzeugt, wird ein artgleicher Schweißzusatzwerkstoff als Benchmark herangezogen. Je

nach Parameterwahl ist eine Winkelverzugsminderung um 30% möglich. Mit steigendem Energieeintrag nimmt der Winkelverzug in Folge einer sinkenden Martensitstarttemperatur ab. Diese ist durch eine zunehmende Volumenexpansion durch Zuglegieren von Chrom und Nickel aus dem hochlegiertem Grundwerkstoff begründet. Somit nimmt die Wirkung des LTT-Effekts zu.

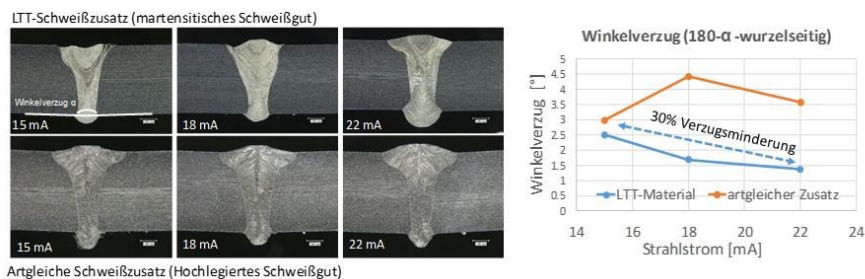


Abbildung 3: Vergleich zwischen LTT-Schweißzusatz (oben) und artgleichem hochlegiertem Schweißzusatz (unten) bei variierendem Energieeintrag (links), Vergleich der Winkelverzug auf der Nahtunterseite (rechts)

### Zusammenfassung und Ausblick

In-Situ Messmethoden, wie digitale Bildkorrelation erlauben eine Detektion von Phasenumwandlungen aufgelöst nach Temperatur, Ort und Größenordnung sowie deren Auswirkung auf den Bauteilverzug. Damit stellen sie das Handwerkszeug bereit durch Einsatz von martensitisch umwandelnden LTT-Legierungen plastischen Bauteilverzug zu minimieren.

Der Einsatz von LTT-Werkstoffen als metallurgische Injektion im Strahlschweißprozess ermöglicht bereits ohne Optimierung eine Verzugsreduktion von 30% im Vergleich zum Einsatz von artgleichen Schweißzusätzen. Die entwickelten Messmethoden zur Bestimmung des tatsächlichen Energieeintrages erlauben zukünftig in Kombination mit einer numerischen Prozesssimulation sowie der Abbildung der Eigenspannungsentstehung durch Struktursimulation eine weitere Optimierung der Verzugsminderung.

Eine Variation der Martensit-Start-Temperatur ( $M_s$ ), welche Auswirkung auf die Eigenspannungsentstehung und folglich auf den plastischen Bauteilverzug nimmt, erfolgt dabei durch eine Modifikation der verwendeten Legierungssysteme. Diese wird durch Einsatz partiell metallurgischer Injektion von LTT-Werkstoff in Drahtform im Strahlschweißprozess erreicht.

Die Verifikation der Simulationsergebnisse soll durch die Messung von Oberflächenverschiebungen/-dehnungen (digitale Bildkorrelation) sowie Thermografiemessungen und daraus abgeleitet der Rückschluss auf oberflächennahe Spannungen beim Strahlschweißen erfolgen. Eine Überprüfung der ermittelten Spannungen soll ex-situ durch die Bohrlochmethode mit optischer Auswertung durch Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), Röntgenbeugungsmessungen (A12) bzw. Elektronenbeugung im Transmissionselektronenmikroskop (A6) erfolgen.

### Veröffentlichungen

a) Referierte Veröffentlichungen:

1) Gach, Stefan; Olschok, Simon; Arntz, Dennis; Reisgen, Uwe: Residual stress reduction of laser beam welds by use of low-transformation-temperature (LTT) filler materials in carbon manganese steels - In situ diagnostic: Image correlation - Journal of Laser Applications 30, 2018, 3, 032416-1 - 032416-7 (plus Erratum: erschienen in J. Laser App., 32, 2020, pp. 019901) (pdf siehe 2018\_36)

2) Reisgen, Uwe; Olschok, Simon; Krichel, Thomas; Gach, Stefan: Determination of the influence of welding parameters on the efficiency of electron beam welding by measurement of backscattered electrons- Vacuum, 159, 2019, pp. 182 - 185

b) Andere Veröffentlichungen - Konferenz Beiträge/ Veröffentlichung in Tagungsbänden:

Fatma Akyel, Uwe Reisgen: Simulation des thermischen Einflusses auf Verzug und Eigenspannungen in unlegierten Stählen im EB-Prozess - 39. Assistentenseminar - 13.9.2018 Eupen, Belgien