

# Schweißformen – Verfahren, Potentiale und Grenzen

Adams, T.-E.<sup>1</sup>; Härtel, S.<sup>3</sup>; Hälsig, A.<sup>2</sup>; Awiszus, B.<sup>3</sup>; Mayr, P.<sup>1</sup>

Technische Universität München

<sup>1</sup> Lehrstuhl Werkstofftechnik der Additiven Fertigung

Technische Universität Chemnitz

<sup>2</sup> Professur Schweißtechnik

<sup>3</sup> Professur Virtuelle Fertigungstechnik

Infolge des Schweißprozesses kommt in der Fügezone zu einem sehr hohen Wärmeeintrag. Dieser führt im Zusammenspiel mit der darauffolgenden Abkühlung zu weitreichenden Veränderungen und Umwandlungen des Gefüges, was eine Reduzierung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der Verbindung bewirken kann. Um dem entgegenzuwirken sind oft zeit- und kostenintensive Nachbehandlungsprozesse notwendig.

In diesem Projekt wird ein neuartiges Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, den ohnehin vorhandenen Wärmeeintrag des Schweißprozesses direkt für einen nachfolgenden Umformprozess zu nutzen. Ziel dieser Prozesskopplung ist die gezielte Beeinflussung der Gefügeausbildung in der Fügezone. Die klassische Zonenausbildung – Schweißgut, Grobkorn, Feinkorn und interkritische Zone – soll somit umgangen und die Entstehung eines homogenen, grundwerkstoffähnlichen Gefüges erreicht werden. Dieser Effekt basiert auf statischen, metadynamischen und dynamischen Rekristallisations- und Erholungsprozessen, die während des Warmumformprozess im Fügebereich stattfinden.

Der funktionelle Nachweis erfolgt anhand von experimentellen Untersuchungen sowie einer detaillierten numerischen Simulation des kombinierten Schweiß- und Umformprozesses. Die Validierung des numerischen Modells erfolgt anhand von Temperaturprofilen, Querschliffen und Mikrostrukturanalysen sowie an Fließkurven, die durch Stauchversuche an einem thermophysikalischen Simulationssystem ermittelt werden. Die Auswertungen zeigen, dass die typische Zonenausbildung durch das Schweißformen umgangen werden kann. Dabei ist eine Annäherung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der Verbindung (Zugfestigkeit und Härte) an die des Grundwerkstoffes zu verzeichnen.

## 1 Einleitung

### 1.1 Stand der Technik

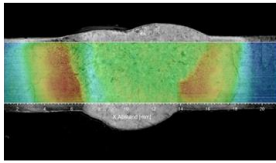
Das Schweißen ist in der Industrie eines der am häufigsten verwendeten Verfahren zum Verbinden von Blechen und anderen Halbzeugen. Schweißen bezeichnet hierbei ein Verfahren, bei dem zwei oder mehr Teile durch eine geeignete Kombination von Wärme und/oder Druck dauerhaft an ihren Kontaktflächen verbunden werden. Häufig wird ein Zusatzwerkstoff benutzt, um die metallische Kontinuität zu erreichen [1]. Je nach Ausgangsgeometrie und Werkstoff können unterschiedliche Schweißverfahren zum Einsatz kommen.

Beim Schmelzschweißen ist ein hoher Energieeintrag ein integraler Bestandteil des Prozesses. Dies führt jedoch zu umfangreichen Transformationen und Veränderungen der Mikrostruktur, was wiederum zu einer Reduktion der mechanisch-technologischen Eigenschaften der Verbindung führen kann. Dies gilt insbesondere für Stahl im Bereich der Schweißnaht [2, 3]. Abb. 1 zeigt eine Übersicht über typische Fehler und Unregelmäßigkeiten, die sich direkt oder indirekt aus dem Energieeintrag und dem Abkühlverhalten ergeben.

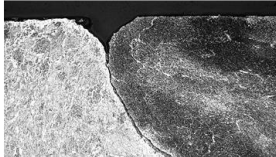
Der Bereich des Grundwerkstoffes, dessen Erscheinung durch den Schweißzyklus verändert wird, wird als Wärmeeinflusszone (WEZ) bezeichnet. Die Ausprägung der WEZ steht dabei in direktem Zusammenhang mit den mechanischen-technologischen Eigenschaften der Verbindung. Je nach Schweißverfahren und Abstand zur Schmelzlinie können mikrostrukturelle Inhomogenitäten in der WEZ auftreten. Diese können wiederum zu einer Verschlechterung der Eigenschaften der gesamten Baugruppe führen, z.B. zu einer geringeren Festigkeit der Verbindung gegenüber dem unbeeinflussten Grundwerkstoff [4].

Das Gefüge welches sich daraufhin, aufgrund der Aufheiz- und Abkühlbedingungen, im Schweißgut einstellt ähnelt am ehesten einem Gussgefüge mit dendritischer Erstarrungsstruktur.

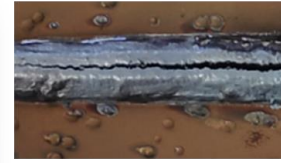
Entfestigung/Aufhärtung



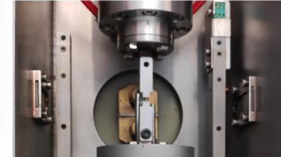
Imperfektionen



Rissbildung



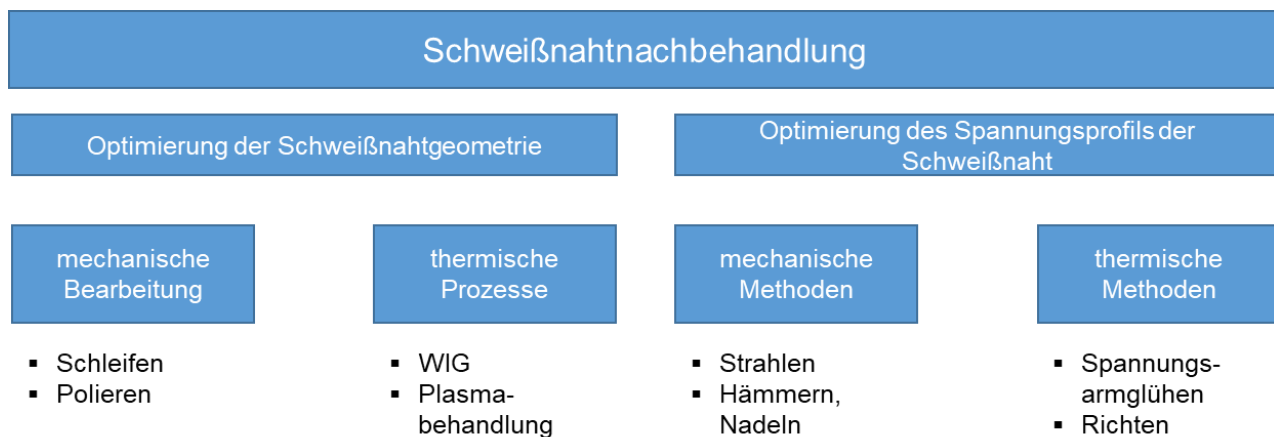
Reduzierte Festigkeitswerte



**Abbildung 1:** Fehler und Unregelmäßigkeiten bei einer geschweißten Verbindung

Experimente an hochfesten niedriglegierten Stählen von Mohandas [5] zeigen den Einfluss mikrostruktureller Veränderungen in der WEZ auf die allgemeinen mechanischen-technologischen Eigenschaften der Baugruppe.

Um die negativen Auswirkungen des Schweißprozesses zu minimieren, stehen eine Vielzahl von Nachbehandlungsverfahren zur Verfügung. Im Allgemeinen lassen sich diese Verfahren in zwei Hauptgruppen einteilen. Die erste Gruppe dient zur Optimierung der Schweißnahtgeometrie, hierbei werden oberflächennahe Fehler oder Imperfektionen in der Form von bspw. Rissen oder Einbrandkerben durch mechanische Bearbeitung oder Schmelzprozesse reduziert. Prozesse der zweiten Gruppe dienen hingegen der Optimierung des Spannungsprofils der Schweißnaht. Dies kann durch Nachwärmen (zum Abbau von Eigenspannungen) oder durch die gezielte Einbringung von Druckeigenspannungen erreicht werden [6]. Beispiele für verschiedene Nachbehandlungsprozesse sind in Abb. 2 dargestellt.



**Abbildung 2:** Einteilung der Schweißnahtnachbehandlungsverfahren nach [7].

In einer Reihe von Untersuchungen [8-12] konnte eine Verbesserung der mechanisch-technologischen Eigenschaften und der Dauerfestigkeit durch die gezeigten Schweißnahtnachbehandlungsverfahren nachgewiesen werden.

## 1.2 Prinzip des Schweißformens

Alle gängigen Nachbehandlungen sind aktuell vom Schweißprozess entkoppelt und erfordern weiterführende Bearbeitungsschritte. Diese zusätzlichen entkoppelten Nachbehandlungsschritte sollen nun durch den Schweißform-Prozess entfallen. Das Schweißformen beruht dabei auf der Kopplung eines Schweiß- und eines nachfolgenden Umformprozesses. Hierbei soll die thermische Energie des Schweißprozesses

direkt genutzt wird, um beim anschließenden Umformprozess, Rekristallisations- und Erholungsprozesse zu initiieren. Ein Schema des Schweißform-Prozesses ist in Abb. 3 dargestellt.

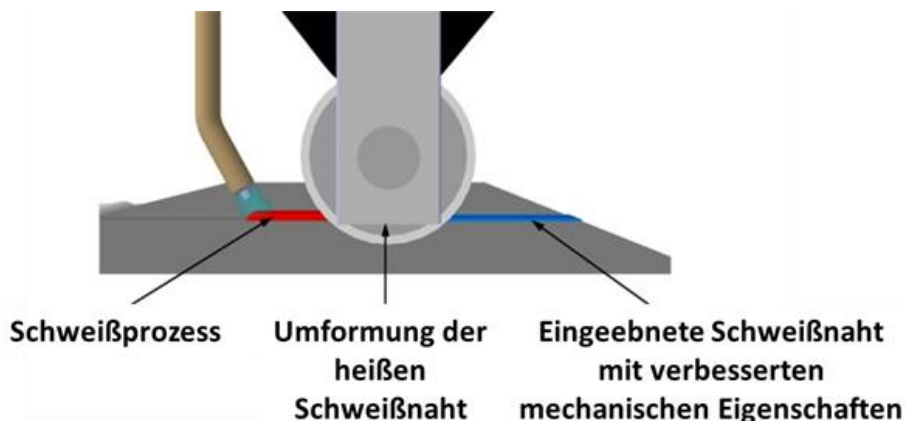


Abbildung 3: Schema des Schweißformprozesses

Die Vorteile gegenüber aktuellen Lösungsansätzen bzw. Verfahren sind, dass die Vorzüge der thermischen und mechanischen Nachbehandlungsverfahren vereint werden. Einerseits erfolgt das Einbringen von Druckeigenspannungen durch die Umformung der Schweißnaht sowie das Reduzieren der Kerbschärfe durch das Einebnen der Naht. Andererseits erfolgt eine thermische Gefügeoptimierung durch die warmumformtechnisch angeregte dynamische, metadynamische und statische Rekristallisation

## 2 Experimentelles

Zur Ermittlung geeigneter Schweißparameter wurden Schweißversuche durchgeführt. Hierbei wurde der Stahl S235JR (1.0037) als Grundmaterial in einer Stärke von 4 mm verwendet und mit Hilfe des Zusatzwerkstoff G4Si1 gefügt. Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Materialien ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe in %

Werkstoff	Fe	C%	Mn%	Si%	P%	S%
S235JR (Grundwerkstoff)	Rest	< 0,2	< 1,4	-	< 0,045	< 0,045
G4Si1(Zusatzwerkstoff)	Rest	0,08	1,5	0,9	< 0.025	< 0,025

Die Stahlbleche wurden im Stumpfstoß mit einer dickenabhängigen Nahtgeometrie nach DIN EN 9692-1 und definierter Schweißnahtüberhöhung bzw. Wurzel verbunden.

Als Schweißgerät wurde eine Fronius TransPuls Synergic 5000 CMT R Schweißstromquelle mit geschlossenem Drahtvorschub VR 700 CMT gewählt. Die geforderte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde durch einen 6-Achs Knickarmroboter gewährleistet, der als Führungsmaschine für den Schweißbrenner diente.

Grundlage für die durchgeführten Parameteruntersuchungen sind die von Fronius gestellten Kennlinien für den Cold Metal Transfer- (CMT), den Impuls- und den Standard-Lichtbogenprozess. Anhand dieser Kennlinien wurden die Parameter in Form von Schweißgeschwindigkeit und Drahtvorschub mittels eines vollfaktoriellen Versuchsplans ermittelt. Zur Sicherstellung einer definierten Schweißnahtgeometrie wurde neben einer festen Lagefixierung eine unterwölbte Badstütze verwendet.

Zur Bestimmung des spezifischen Einflusses der verschiedenen Faktoren (Temperatur, Umformgrad, Umformgeschwindigkeit, Ausgangsmikrostruktur) auf das dynamische, metadynamische und statische Rekristallisationsverhalten, wurden thermo-mechanische Materialsimulationen durchgeführt. Diese werden in Form von Stauch- und Relaxationsversuchen am Umform- und Abschreckdilatometer Bähr DIL805A/D durchgeführt. Stauchversuche dienen dabei der Bestimmung des Anteils an dynamischer Rekristallisation und Relaxationsversuche werden genutzt um den statischen Anteil zu bestimmen. Die generierten Daten

in Form von Kraft-Weg-Kurven werden zur Bestimmung der Rekristallisationskinetik und zur Berechnung der notwendigen Fließkurven für die numerische Simulation verwendet.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Schweißversuche

Die Ergebnisse der Schweißversuche unter Verwendung der drei Schweißkennlinien wurden hinsichtlich Schweißnahtgeometrie, Nahtfehler und Spritzerneigung analysiert. Um einen größeren Umformgrad beim späteren Walzprozess zu realisieren, sollte die Schweißnaht eine Nahtüberhöhung, sowie einen Wurzel-durchhang besitzen, die zusammengenommen nicht mehr als 80% der Blechdicke betragen sollte.

Die Kennlinie des CMT-Prozesses erwies sich dahingehend als ungeeignet. Die Wärmeeinbringung des CMT-Prozesses war zu gering, um eine kontinuierliche Wurzel zu gewährleisten. Mit der Standardkennlinie wurden gute Ergebnisse erzielt. Die Schweißnaht war in Bezug auf Geometrie und Fehlerfreiheit zufriedenstellend. Die besten Schweißergebnisse in Bezug auf die Nahteigenschaften und Spritzertendenz wurden mit der Kennlinie für den gepulsten Prozess erzielt. Die entsprechenden Schweißparameter sind in Tabelle 2 aufgeführt.

**Tabelle 2:** Schweißparameter für den standard- und gepulsten Lichtbogenprozess

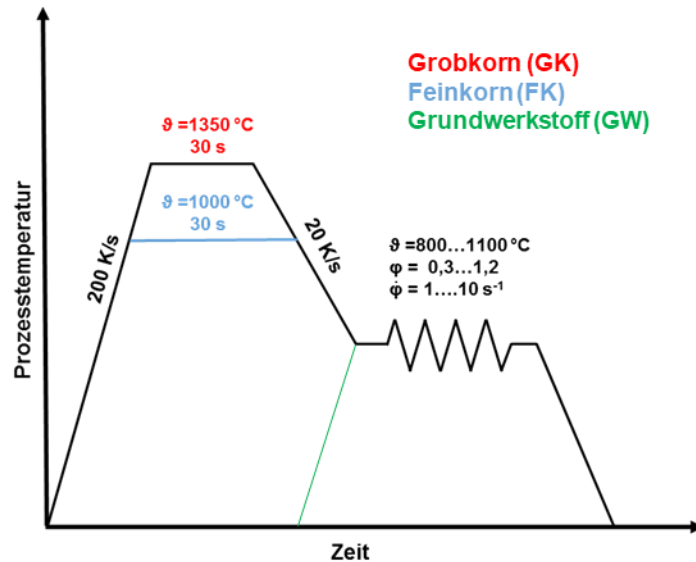
	Standard	Gepulst
<b>Drahtvorschub</b>	10 m/min	9,6 m/min
<b>Schweißgeschwindigkeit</b>	0,7 m/min	0,9 m/min
<b>Lichtbogenkorrektur</b>	3 %	5 %
<b>Schweißspalt</b>	1 mm	1 mm
<b>Spannung</b>	31 V	32 V
<b>Stromstärke</b>	338 A	369 A
<b>Leistung</b>	10589 W	12290 W

Die Schweißnaht erfüllt die gesetzten Anforderungen in Bezug auf Nahtüberhöhung, Fehler- und Spritzerfreiheit. Die Wahl des gepulsten Prozesses führte zu den besten Nahteigenschaften und es war keine Schweißbadstütze erforderlich. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde somit mit dem gepulsten Prozess gearbeitet.

#### 3.2 Thermo-mechanische Simulation

Die thermo-mechanische Simulation folgt einem vollfaktoriellen Versuchsplan, der mit niedriger Umformtemperatur ( $T > 800^{\circ}\text{C}$ ), Umformgeschwindigkeit ( $\dot{\varphi} > 1\text{s}^{-1}$ ) und Umformgrad ( $\varphi = 0,3$ ) beginnt. Diese Randbedingungen wurden aus Vorversuchen unter Berücksichtigung der realistischen Umformbedingungen im späteren Prozess ermittelt.

Zur Eruiierung der Auswirkungen unterschiedlicher Ausgangsgefüge (Grundmaterial, fein- und grobkörnige WEZ, Schweißgut), werden die Proben im Dilatometer unmittelbar vor der Verformung einem spezifischen Temperaturzyklus ausgesetzt. Der verwendete Temperaturzyklus inkl. Umformung ist in Abb.4 dargestellt.

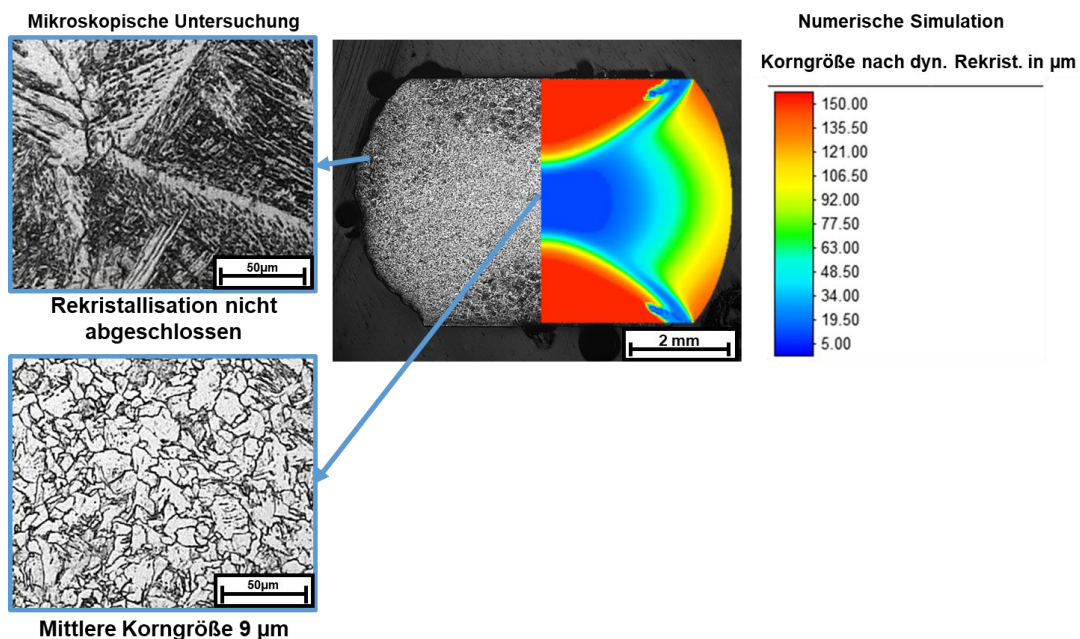


**Abbildung 4:** Temperatur/Zeit-Verlauf der thermo-mechanischen Simulation

Die aufgezeichneten Daten in Form von Kraft/Weg-Kurven dienen zur Berechnung der für die numerische Simulation benötigten Fließkurven und Rekristallisationskinetiken.

Abb. 5 zeigt einen Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und der metallographischen Analyse bezüglich der Korngröße nach dynamischer Rekristallisation.

Als Ausgangsmikrostruktur wurde in diesem Fall eine grobkörnige Mikrostruktur eingestellt. Hierfür wurde die Probe im Temperaturzyklus auf 1350 °C erwärmt, 30 s gehalten und über Konvektion auf Umformtemperatur abgekühlt. Die Umformung fand bei einer Temperatur von 1100 °C mit einem Umformgrad von 0,7 und einer Umformgeschwindigkeit von 5 s<sup>-1</sup> statt.



**Abbildung 5:** Vergleich der numerischen Simulation mit einer lichtmikroskopischen Aufnahme einer Probe die identischen Randbedingungen ausgesetzt waren ( $T = 1100 \text{ °C}$ ,  $\dot{\varphi} = 5 \text{ s}^{-1}$ ,  $\varphi = 0,7$ )

Der Vergleich zeigt, dass die Simulation, mit den neu generierten Materialdaten, bereits eine sehr gute Vorhersagegenauigkeit aufweist, welche auch die Wärmeabfuhr der Deformationsstempel des Dilatometers berücksichtigt. Im Bereich der Umformstempel (Abb. 5 rote Bereiche im oberen/unteren Teil der Probe) reicht die Temperatur respektive der Umformgrad nicht aus um eine Rekristallisation der Mikrostruktur zu imitieren. Diese Bereiche weisen somit noch die Ausgangsmikrostruktur auf. Im mittleren Bereich der Probe, die den höchsten Umformgrad und die höchste Temperatur bei der Umformung aufweist, lässt sich eine feinkörnige rekristallisierte Mikrostruktur feststellen. Die mikroskopische Auswertung der

durchschnittlichen Korngröße, durch das Linienschnittverfahren, belegt eine mittlere Korngröße von 9  $\mu\text{m}$ . Diese Korngröße wird auch durch die numerische Simulation vorhergesagt. Des Weiteren zeigen sich in den Randbereichen der Probe auch Bereiche in denen die Rekristallisation nicht abgeschlossen ist (Abb.5 dunkle Bereiche der lichtmikroskopischen Aufnahme). Auch diese Bereiche werden mit einer guten Genauigkeit prognostiziert.

### 3.3 Umsetzung des Schweißformens

Um den Schweißformprozess experimentell umzusetzen, wurde ein entsprechender Versuchsaufbau im Labormaßstab (siehe Abb. 6) konzipiert. Zu diesem Zweck wurde ein bestehendes Duo-Reversier-Kaltwalzwerk um einen wassergekühlten Schweißbrenner von Fronius erweitert. Die konstruktive Integration des Schweißbrenners in das Walzgerüst erfolgte mittels Aluminiumhohlprofilen. Um eine maximale Flexibilität zu erreichen ist der Schweißbrenner verschiebbar und drehbar gelagert. Somit ist der Abstand zwischen dem Schweißbrenner und dem Walzenmittelpunkt zwischen 100 mm (nur bei einem Brennerwinkel von 70°) und 300 mm einstellbar und der Brenner aus der Neutralstellung um 20 ° neigbar.



Integration der Schweißmaschine in das bestehende Walzgerüst

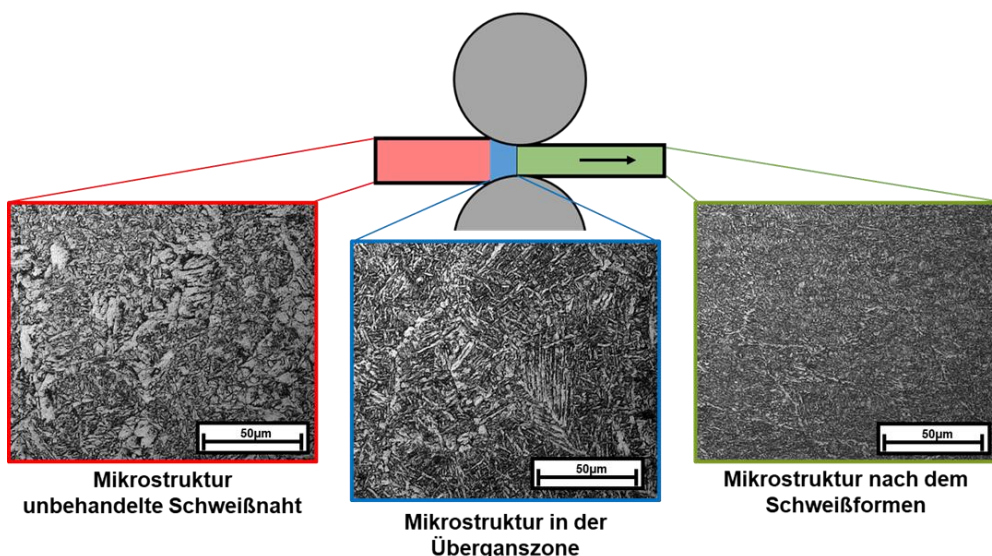


Justierbarer Schweißbrenner (Höhe, Winkelverstellung)

**Abbildung 6:** Versuchsaufbau Schweißformanlage

Des Weiteren wurde der Ein- und Auslaufbereich der Walzstrecke erweitert um auch längere Proben schweißformen zu können. Die Einstellung der Schweißgeschwindigkeit erfolgt durch Anpassung der Umdrehungen pro Minute der angetriebenen Walzen.

Abb.7 zeigt Mikrostrukturaufnahmen der verschiedenen Zonen einer schweißgeformten Probe.



**Abbildung 7:** Mikrostrukturentwicklung über die verschiedenen Bereiche einer schweißgeformten Probe, entnommen aus dem Schweißgut

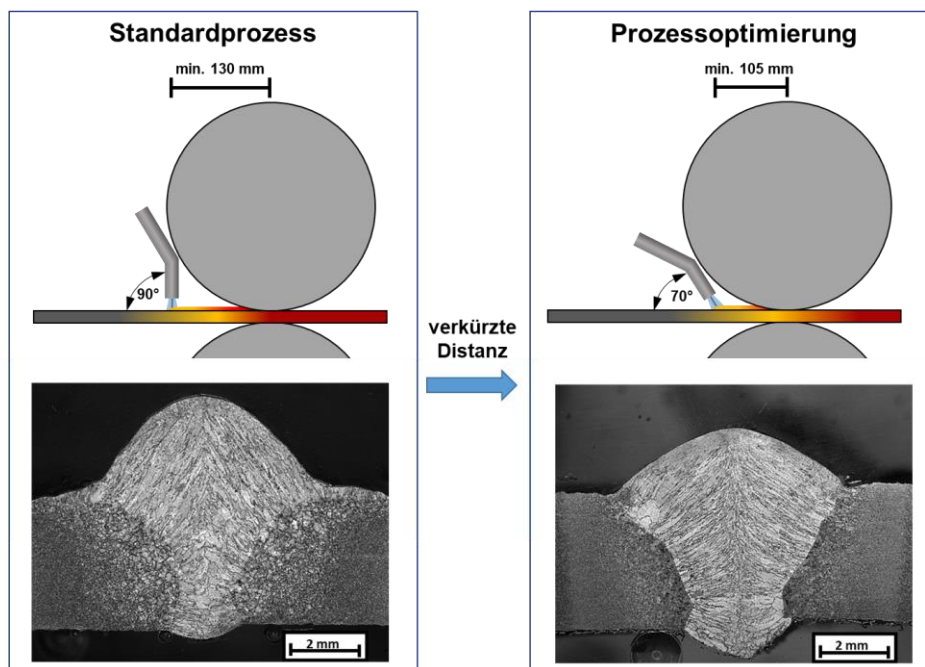
Es ist zu erkennen, dass die typische dendritische Erstarrungsstruktur des Schweißguts, (Abb. 7, links) durch vorwiegend dynamische Rekristallisation, in ein sehr feinkörniges Gefüge (Abb. 7, rechts) umgewandelt werden kann.

Somit ist der allgemeine Funktionsnachweis der neuartigen Methodik des Schweißformens erbracht. Vereinzelt sind jedoch noch elongierte Körner erkennbar, die durch den Walzprozess verursacht werden und auf eine nicht abgeschlossene Rekristallisation hinweisen. Dies wiederum korreliert mit den vorläufigen Ergebnissen der numerischen Untersuchungen [13], in denen ein Gesamtanteil der Rekristallisation von ca. 75 % berechnet wurde. Zur weiteren Steigerung des Rekristallisationsanteils wird die im folgenden Abschnitt vorgestellte Prozessoptimierung verwendet.

### 3.4 Prozessoptimierung

Zur Steigerung des Rekristallisationsanteils im Fügebereich, kann der Abstand zwischen Schweißbrenner und Walze grundsätzlich reduziert werden. Daraus ergeben sich, aufgrund der kürzeren Prozesszeit und der damit verbundenen geringeren Wärmeabfuhr, höhere Umformtemperaturen im Walzspalt. Diese höhere Temperatur führen bei ansonsten gleichen Umformbedingungen dazu, dass ein größerer Teil des Gefüges rekristallisieren sollte.

In der aktuellen Konfiguration beträgt der Mindestabstand zwischen Schweißbrenner und Walzenmitte 130 mm (siehe Abb. 8, links). Eine Reduzierung des Mindestabstandes ca. 100 mm kann durch ein Anstellen des Schweißbrenners um  $20^\circ$  erreicht werden (siehe Abb. 8, rechts).



**Abbildung 8:** Vergleich Standardprozess und Prozessoptimierung mit sich ergebender Nahtgeometrie

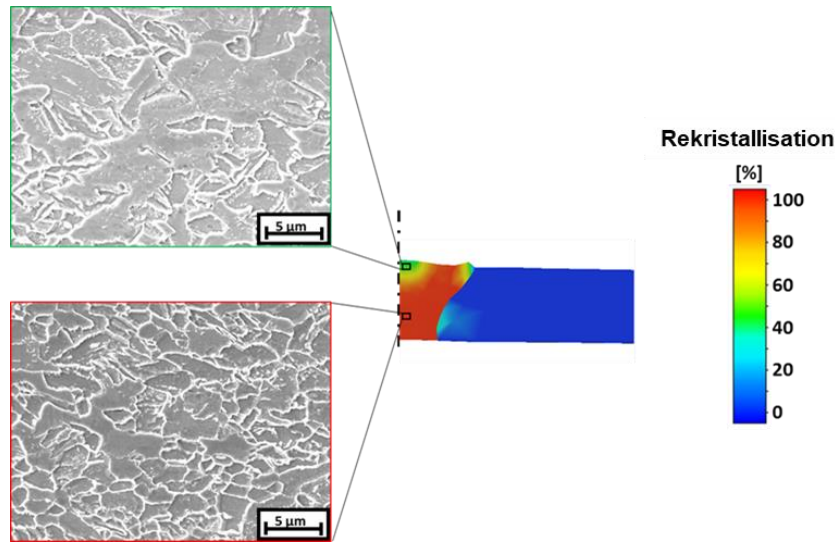
Diese schleppende Einstellung führt zu einem tieferen Einbrand, so dass eine leichte Modifikation der Schweißparameter (reduzierter Drahtvorschub, vgl. [13]) nötig war. Das Ergebnis ist eine deutlich geringere Nahtüberhöhung, was eine reduzierte plastische Verformung während des Walzprozesses zur Folge hat.

Es ergibt sich ein kleiner Bereich im oberen Teil der nur zu 50% rekristallisiert (siehe Abb. 9). Dieser Bereich resultiert zum einen aus dem direkten Kontakt zu der Walze und der damit verbundenen schnellen Abkühlung und zum anderen aus einem geringeren Umformgrad von 0,3 (vgl. Standardprozess 0,8 an vergleichbarere Stelle).

Die numerische Simulation der Prozessoptimierung zeigte, dass trotz der geringeren plastischen Verformung beim Walzen, ein höherer Anteil an rekristallisierten Bereichen erreicht werden kann. Der Grund hierfür ist eine um ca.  $200^\circ\text{C}$  höhere Temperatur im Walzspalt im Vergleich zum Standardprozess.

Aus diesem Grund wurde die Prozessoptimierung experimentell implementiert.

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden Licht- und Rasterelektronenmikroskopie (REM) eingesetzt. Abb. 9 zeigt entsprechende REM-Aufnahmen der korrespondierenden Nahtbereiche.

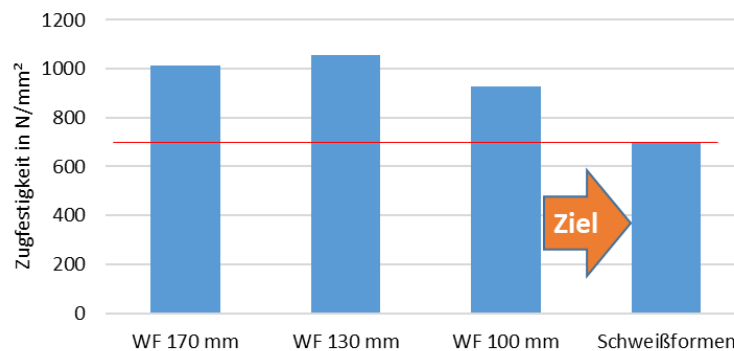


**Abbildung 9:** Simulation des rekristallisierten Anteils beim optimierten Prozess mit korrespondierenden REM-Aufnahmen

Im oberen Teil der Naht ist neben der neu gebildeten Mikrostruktur auch die akiculare Struktur des Erstarrungsprozesses, die aus der hohen Wärmeabfuhr an der Kontaktfläche resultiert, noch vorhanden. Lichtmikroskopisch durchgeführte Untersuchungen bestätigen einen ungefähren Anteil von 50 bis 60 % Rekristallisation in diesem Bereich. Im unteren Teil der Naht lässt sich keine akiculare Struktur feststellen. In diesem Bereich findet sich ein sehr feinkörniges, rekristallisiertes Gefüge.

### 3.5 Zugfestigkeitsuntersuchungen

Um den Einfluss des Rekristallisationsprozesses auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißverbindungen zu bestimmen, wurden unter anderem Zugfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Abb. 10 zeigt einen Vergleich der Zugfestigkeiten bei einer Variation des Brennerabstandes zum Walzenmittelpunkt von 170 mm, 130 mm, 100 mm sowie der Zielgröße, die durch den Schweißformprozess erreicht werden soll.



**Abbildung 10:** Auswertung der Zugfestigkeitsuntersuchungen bei einer Variation des Brennerabstandes

Die Auswertung der Zugfestigkeit schweißgeformter Proben zeigt, dass bei einem Abstand des Brenners zur Walzenmitte von 170 mm und 130 mm ein starker Anstieg der Zugfestigkeit auf über 1000 N/mm<sup>2</sup> zu verzeichnen ist. Darüber hinaus nimmt die Dehnung um ca. 50% im Vergleich zur Zielgröße ab. Dieses Verhalten lässt auf eine Kaltverfestigung durch den Walzvorgang schließen. Die Temperatur während des Walzens reicht in diesem Fall nicht aus, um den Rekristallisationsprozess vollständig ablaufen zu lassen. Die Ergebnisse bei einem Brennerabstand von 100 mm zeigen bereits eine Tendenz zur Annäherung an die Zielgröße, sowohl die Zugfestigkeit als auch die Dehnung betreffend. Durch die Verkürzung des Abstandes zwischen Brenner und Walze, verkürzt sich ebenfalls die Zeit in der die Probe Wärme an die Umgebung abgeben kann. Somit ergibt sich eine höhere Temperatur während der Umformung, was einen gesteigerten Anteil an Rekristallisation zur Folge hat und somit Verfestigungen abgebaut werden können.



## 4 Potenziale und Grenzen

Das Schweißformen ermöglicht die Verbesserung der mechanisch-technologischen Eigenschaften von geschweißten Bauteilen durch eine Inline-Prozesskombination. Daher ist es besonders geeignet um Ressourcen in Form von Zeit und Energie zu sparen und somit die Wertschöpfung des Produktionsprozesses zu steigern. Potenziale für das Schweißformen ergeben sich vor allem in der blechverarbeitenden Industrie. Aufwendige Nachbehandlungsschritte wie Schleifen, Hämmern oder die thermische Nachbehandlung können entfallen.

Denkbar wäre ein Einsatz des Schweißformens bei der Herstellung von sogenannten tailored welded blanks. Dabei handelt es sich um Bleche verschiedener Werkstoffgüten und Dicken, die mittels eines Schweißprozesses zu maßgeschneiderten Halbzeugen verbunden werden. Diese Halbzeuge mit ihrem angepassten Eigenschaftsprofil ermöglichen eine belastungsgerechte Auslegung der Konstruktion und resultieren so in Gewichts- und Kosteneinsparungen. Die Einführung des Schweißformprozesses in diese Prozesskette ermöglicht die direkte Nacharbeit der Schweißnaht. Hierbei können Form- und Werkstoffkerben durch eine Umformung und die Einbringung von Druckeigenspannungen reduziert werden und somit eine Verbesserung der mechanisch-technologischen Eigenschaften erreicht werden.

Grenzen beim Schweißformen ergeben sich, wie häufig bei Schweißprozessen, aus der Zugänglichkeit zur Fügestelle. Dadurch, dass beim Schweißformen zwingend eine Gegenkraft erforderlich ist, ist der Einsatz bei komplizierten Fügegeometrien noch eingeschränkt

## 5 Zusammenfassung

Es wurde eine neuartige Methode zur Mikrostrukturoptimierung einer Schweißverbindung vorgestellt. Mittels der Kopplung eines Schweiß- und eines Umformprozesses konnte eine Gefügeänderung durch dynamische, metadynamische und statische Rekristallisations- und Erholungsprozesse erreicht werden. Zur Ermittlung der Fließkurven und der Rekristallisationskinetiken wurden Stauch- und Relaxationsversuche am Dilatometer durchgeführt, um somit das Materialverhalten in der Fügezone zu beschreiben. Anhand dieser Daten wurde der Schweißformprozess numerisch abgebildet. Das Simulationsmodell basiert dabei auf verifizierten Daten der einzelnen Prozesse unter Berücksichtigung der Transformationen (Rekristallisationseffekte) im Fügebereich. Darauf aufbauend wurde der Einfluss des Abstands zwischen Schweißbrenner und Walzenmitte auf den Umformgrad, die Umformtemperatur und die Umformgeschwindigkeit analysiert und die Rekristallisationseffekte bewertet. Es konnte nachgewiesen werden, dass es durch den gekoppelten Prozessaufbau möglich ist, das Erstarrungsgefüge des Schweißgutes in ein feinkörniges rekristallisiertes Gefüge umzuwandeln. Zur weiteren Steigerung des rekristallisierten Anteils wurde ein Optimierungsansatz vorgestellt bei dem der Brenner um  $20^\circ$  angestellt wurde um die Distanz zur Walzenmitte weiter zu reduzieren. Dies ermöglichte eine höhere Temperatur während der Umformung. Zugfestigkeitsuntersuchungen zeigten eine stark erhöhte Zugfestigkeit bei einem Brennerabstand zur Walzenmitte von über 130 mm. Damit einhergehend konnte ebenfalls eine geringere Bruchdehnung im Vergleich zur Referenzprobe nachgewiesen werden, woraus auf eine gesteigerte Kaltverfestigung geschlossen werden konnte. Bei einem auf 100 mm reduzierten Brennerabstand konnte eine Annäherung der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung an die Referenzprobe festgestellt werden, was auf einen Abbau der Verfestigungen schließen lässt. In weiteren Arbeiten sollen nun Methoden untersucht werden, die die Abkühlrate während des Umformprozesses reduzieren, um so das Kornwachstum zu stimulieren und ein homogenes Gefüge über den gesamten Fügebereich zu erreichen.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] DIN 8593-6 Manufacturing processes joining - Part 6: Joining by welding; Classification, subdivision, terms and definitions. 2003
- [2] Ashby, M.F.;Easterling, K.E.: A first report on diagrams for grain growth in welds. Acta Metallurgica 1982
- [3] Ion, J.C.; Easterling, K.E ; Ashby, M.F.: A second report on diagrams of microstructure and hardness for heat-affected zones in welds. Acta Metallurgica 1984
- [4] Diltthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2 – Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. Springer Verlag 2005
- [5] Mohandasa, T.; Madhusudhan Reddy, G.; Satish Kumar, B.: Heat-affected zone softening in high-strength low-alloy steels. Journal of Materials Processing Technology 1999
- [6] Bignonnet, A.: Improving the fatigue strength of welded steel structures. Steel in Marine Structures 1987
- [7] Kirkhope, K.J.; Bell, R.;Caron, L.; Basu, R.I.; Ma, K-T.: Weld detail fatigue life improvement techniques Part 1: review. Marine structures
- [8] Haibach, E.: Schwingfestigkeit hochfester Feinkornbaustähle im geschweißten Zustand. Schweißen und Schneiden 1975
- [9] Haagensen, P.: IIW's round robin and design recommendations for improvement methods. International Institute of Welding, WRC Proceedings IIW 1997
- [10] Booth, G: The fatigue life of ground and peened fillet welded joints – the effect of mean stress. Metal construction 1981
- [11] Bignonnet, A.: Improving the fatigue strength of welded steel structures. Steel in Marine Structures 1987
- [12] Kado, S.; Ishiguro, T.; Hanzawa, M.; Yokota, H.: Influence of the condition in TIG-dressing on fatigue strength in welded high strength steels. International Institute of Welding 1975
- [13] Härtel, S.; Adams, T.-E.: WeldForming – a new inline process combination for the improvement of weld seam properties. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019

### Danksagung

Wir bedanken uns für die Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projekts "Eigenschaftsverbesserung von Schweißnähten durch Inline-Warmumformung" mit der Projektnummer 326220175.