

Abschlussbericht zu Nr. 8.2 NKBF 98 (BMWk TWBlock)

ZE: Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF)	Förderkennzeichen: 03LB2034C
Vorhabensbeschreibung: Mit der digitalen Prozesskette das Leichtbaupotenzial der Zukunft erschließen: Tailor Welded Blanks (TWBs) aus höchstfesten Stählen (TWBlock)	
Teilprojekt: Fügetechnische Untersuchungen zur Fertigung von TWB Probeplatten, Verbindungsprüfung, Material- und Bauteilanalysen	
Projektleiter: Dr. Matthias Höfemann	Tel.: +49 (0) 5341 21 5732 E-Mail: m.hoefemann@sz.szmf.de
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2021 – 31.07.2024	
Berichtszeitraum: 01.08.2021 – 31.07.2024	

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen **03LB2034C** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Verbundpartner:

- Fraunhofer IPK (IPK)
- Neue Materialien Fürth GmbH (NMF)
- Salzgitter-Mannesmann Forschung GmbH (SZMF)
- Salzgitter Europlatten GmbH (SZEP)
- d-fine GmbH (d-fine)
- Volkswagen AG (VW)

Inhalt

1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere:	4
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2 Eingehende Darstellung.....	6
2.1 Der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	6
AP 1: Vorbereitende Arbeiten	6
AP 2.3: Schweißtechnische Werkstoffcharakterisierung und Metallurgie.....	7
AP 3.3: Durchführung der Validierungsexperimente	19
Darüber hinaus sind in diesem Arbeitspaket Umformversuche an geschweißten Nakajima Proben durchgeführt worden. Diese sind beispielhaft vergleichend anhand von Proben aus dem nachfolgenden AP 4.2 „Optimierte Schweißversuche“ dargestellt.....	22
AP 4.2: Optimierte Schweißversuche	23
AP 5.1: Bewertung des Lebenszyklus	35
AP 6: Demonstrator => Unterstützung durch SZMF.....	35
2.2 Der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	37
2.3 Der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	38
2.4 Des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	38
2.5 Des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	38
2.6 Der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.	39

Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

In Zusammenarbeit mit den weiteren Projektverbundpartnern bestand die Aufgabe darin, Synergieeffekte aus schweiß- und umformspezifischen Wissenschaftsdisziplinen durch den Einsatz einer digitalen Prozesskette nutzbar zu machen, um hierdurch das Leichtbaupotenzial von Tailor Welded Blanks durch Verwendung höchstfester Stahlgüten zu erhöhen. Zielstellung war, dies am Beispiel höchstfester Tailor Welded Blanks (TWB) für den Automobilbau sowie die gesamte Transportbranche umzusetzen. Aktuelle Baugruppen mit TWB waren bislang auf Festigkeiten von maximal 800 MPa beschränkt, da die Umformbarkeit der Laserstrahlschweißnaht in der Platine bei höchstfesten Stählen abnimmt und die Schweißnaht mit zugehöriger Wärmeeinflusszone unter Crashbeanspruchung somit typischerweise eine Schwachstelle darstellt. Im Bereich der monolithischen kaltumformbaren Stähle hingegen sind mittlerweile Festigkeiten bis zu 1.200 MPa Stand der Technik. Dieses erhöhte Festigkeitspotential war für TWB bislang ungenutzt, da keine fundierte sowie verknüpfte Wissensbasis zur Auslegung der komplexen Wechselwirkungen zwischen der Metallurgie der Fügepartner, dem Schweiß- und dem Umformprozess vorlagen.

Für die Salzgitter AG, vertreten durch die **Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF)** und die **Salzgitter Europlatine GmbH (SZEP)**, steht die Qualifizierung ihrer höchstfesten Stähle, deren Verarbeitung und deren Anwendung im Produkt „Fahrzeug“ im Mittelpunkt. Für die Salzgitter Mannesmann Forschung ist es entscheidend, neue Stahlanwendungen für Ihre höchstfesten Dual- und Complexphasenstähle im relevanten Absatzmarkt PKW zu identifizieren und technisch in ihrer Verarbeitung zu validieren. Dabei bieten höchstfeste TWBs ein bislang nicht genutztes Leichtbau- und damit CO₂-Einsparungspotenzial.

Für die Salzgitter Europlatine steht hingegen die sichere Verarbeitung derartiger Stähle in einem industriellen Tailor Welded Blanking Prozess im Vordergrund, der bislang noch nicht für derartige höchstfeste Güten etabliert ist.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Damit auch zukünftige Stahlkonstruktionen einen Beitrag zur Gewichts- und Beanspruchungsoptimierung leisten können, gilt es, den Anforderungen im Automobilbau durch den Einsatz hoch- und höchstfester Werkstoffe gerecht zu werden. Im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens wurden die vorhandenen Kompetenzen im Konsortium entlang der gesamten Wertschöpfungskette genutzt. Dieses ermöglichte eine interdisziplinäre Zusammenarbeit und die Bereitstellung intelligenter Prozesse, Maschinen und Anlagen im Sinne der Entwicklung und Herstellung individualisierter komplexer Produkte durch Tailor Welded Blanking aus höchstfesten Stahlwerkstoffen. Die Kompetenzen von SZMF umfassen die Herstellung und Verarbeitung von Stahl-Produkten in der Anwendung im Rahmen von Versuchstechnik oder auch Simulation.

Dies beinhaltet gerade aus der Sicht der werkstofftechnischen Charakterisierung auch die Beschreibung von Werkstoffsystemen, die z.Zt. noch nicht Bestandteil des Werkstoffportfolios der Salzgitter AG sind, hier: höchstfeste Stähle für die Tailor Welded Blank Fertigung, damit die Kunden die Produkte aus dem Salzgitter Konzern optimiert im Hinblick auf technische Performance und auch Kosten in ihre Komponenten integrieren können.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In Summe konnten die Arbeitspakete und darin formulierten Ziele von SZMF gemäß Zeitplan erfolgreich zu 100% abgeschlossen werden. In Tabelle 1 ist der Projektablaufplan des Konsortiums dargestellt.

Projektplan

Projektlaufplan			1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP0	Projektmanagement	IPK												
AP1	Vorbereitende Arbeiten	alle												
AP2	Charakterisierung höchstfeste Materialien													
2.1	Charakterisierung Schweißnaht	IPK												
2.2	Charakterisierung Umformeigenschaften	NMF												
2.3	Schweißtechnische Werkstoffcharakterisierung und Metallurgie	SZMF												
2.4	Erhebung der Datenquellen	d-fine												
2.5	Beratung TWB und Datenhandling	VW / SZEP												
AP3	Aufbau Blockchain und Simulation													
3.1	Modellaufbau + Validierung Schweiß- und Umformsimulation	IPK												
		NMF												
3.3	Durchführung der Validierungsexperimente	SZMF												
3.4	Etablierung des Datenmanagements	d-fine												
AP4	Optimierung mit bidirektionalem digitalem Zwilling													
4.1	Virtuelle Parameterstudie, Optimierung mit digitalem Zwilling	IPK												
		NMF												
4.2	Optimierte Schweißversuche	SZMF												
4.3	Individualisierte Interfaces, Zugriffs- und Rechtemanagement	d-fine												
AP5	Lebenszyklusanalyse (LCA)													
5.1	Bewertung des Lebenszyklus	SZMF												
5.2	Parametrisierte Implementierung in digitale Prozesskette	d-fine												
5.3	Ermittlung CO ₂ Footprint Nutzungsphase	VW												
AP6	Demonstration des vollintegrierten Konstruktionskonzepts													
6.1	Optimierung mittels digitalen Zwillings	IPK												
		NMF												
6.2	Herstellung der Prototyp TWB	SZEP												
6.3	Datenhandling-Test am Prototypen	d-fine												
6.4	Herstellung und Bewertung Prototypenbauteil	VW												
AP7	Dokumentation und Technologietransfer													
7.1	Dokumentation und Transfer	alle												
	Konsortialtreffen (Web oder Präsenz)		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
	Meilensteine					◆				◆				◆

Tabelle 1: Projektlaufplan

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere:

Stand der Technik zu Projektbeginn

Leichtbau-Bestrebungen zielen insbesondere auf die Senkung des Gesamtfahrzeuggewichts, die Erhöhung der Fahrdynamik, Materialeinsparung und auf Fahrzeugsicherheit ab [1, 2, 3, 4]. Bei E-Fahrzeugen ist im Vergleich zu klassischen Verbrennern ein effektiverer Abbau der Crashenergie infolge des verkürzten Vorbaus sowie ein möglichst geringer Energieeintrag in den batterieaufnehmenden Hauptboden-Bereich elementar wichtig. Dies offenbart neue Herausforderungen an Materialien und Konstruktionsprinzipien für einen effizienten Leichtbau. Eine effektive Leichtbaulösung stellen Tailor Welded Blanks dar, bei denen lastspezifisch Bleche verschiedener

Festigkeiten und/oder Blechdicken mittels Laserstrahlschweißen verbunden und dann zum jeweiligen Bauteil umgeformt werden. Heute finden TWB im Automobilbau zum Beispiel für Längsträger und Hauptboden Verwendung, sind aber auch branchenübergreifend in der Schienentechnik [5] und dem Schiffbau [6] in Benutzung. Um den gestiegenen Anforderungen beim Leichtbau in den Transportindustrien gerecht zu werden, sollen die Festigkeitsklassen der in TWB verwendeten Stähle hochskaliert werden. Bisherige Anwendungen mit höchstfesten Stählen über 800 MPa scheitern aber derzeit an den erforderlichen Schweißnahteigenschaften für den sich anschließenden Umformprozess und die spätere Anwendung bei Crashbeanspruchung. Als wesentliche Herausforderungen gelten hierbei der Härteabfall in der Wärmeeinflusszone (WEZ) der Laserstrahlschweißnaht, die Aufhärtung der Schweißnaht gegenüber dem Grundwerkstoff und die Rückfederung bei der Umformung. Zur Auslegung der Tailor Welded Blanks wird die Finite Elemente Analyse eingesetzt. Eine wesentliche Herausforderung der numerischen Lösungsmethode stellt die Berechnung der komplexen Wechselwirkungen zwischen der Metallurgie der Fügepartner und den Schweißparametern dar, wodurch eine realitätsnahe Vorhersage des Umformverhaltens nur bedingt möglich ist. Vor diesem Hintergrund sind verschiedene Modellierungsstrategien untersucht worden, um insbesondere die prozesskritischen Schweißnahteigenschaften präzise abzubilden [7]. Das Phänomen der mangelnden Umformbarkeit der Naht sowie der eingeschränkten Designfreiheitsgrade bezüglich der Nahtlage wurde unter anderem im Rahmen des FOSTA geförderten Forschungsprojektes P890 verstärkt beobachtet, welches sich primär mit laserstrahlgeschweißten Tailor Welded Blanks aus hochfesten Mehrphasenstählen bis 800 MPa Festigkeit beschäftigte [8]. Seo et al. [9] konnten diese Korrelation anhand numerischer und experimenteller Versuchsdurchführungen bestätigen, jedoch proklamierten sie zugleich, dass eine realitätsnahe simulative Abbildung nur durch eine exakte Definition und Kopplung der Halbzeug- und Schweißnahteigenschaften möglich ist. Die Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH ist die zentrale Forschungsgesellschaft des Salzgitter Konzerns und besitzt umfangreiches und langjähriges Know-How und Ausstattung auf der gesamten Stahlherstellungs- und Verarbeitungsrouten inkl. der Anwendung von Stahl und der Lebenszyklusanalyse. So wurden im Rahmen großer Verbundprojekte, wie z.B. ScaLight großserientaugliche Leichtbaulösungen in einem Konzeptfahrzeug mittels Patchwork-Platine, Profilen aus Tailor Rolled und Tailor Welded Blanks sowie Innenhochdruckumformen erarbeitet und einem breiten Fachpublikum vorgestellt [10]. Weitere Ergebnisse der wissenschaftlichen Arbeit werden zudem regelmäßig auch in übergeordneten Fachbüchern, wie z.B. Leichtbau in der Fahrzeugtechnik publiziert. Bezogen auf das hiesige Projekt ist dabei das Kapitel 7. Werkstoff- und Halbzeugtechnologien für Leichtbau-Anwendungen zu nennen, das sich auch mit Tailor Welded Blank Technologien beschäftigt [11].

Verwendete Fachliteratur:

- [1] A. Redenius, S. Kroop, "New LCA data for steel products," *5th international conference on steels in cars and trucks*, 2017.
- [2] M. Schwarz-Kocher, S. Stieler, A. Schnabel, R. Tözün, *Strukturstudie BWe mobil, Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung*. Stuttgart: e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, 2019.
- [3] *Diese Elektroautos gibt es auf dem Markt*. [Online] Available: www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/e-mobilitaet/kaufen/elektroautos-uebersicht. Accessed on: Oct. 15 2019.
- [4] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., *Unfallforschung der Versicherer: Symposium 2011*. Berlin: Sicherheit von Hochvolt-Kraftfahrzeugen, 2011.
- [5] Burkhardt Liesenberg, Mario Friedrich, Birgit Becker, Heiko Ritschel, "Schienenfahrzeugrohbau und verfahren zu dessen herstellung," EP2704938A1.
- [6] Schuler Held Lasertechnik GmbH & Co kg, "Schweißen im XXL-Format," *MaschinenMarkt das Industrie Magazin*, no. 7, 2003.

- [7] M. Merklein, M. Johannes, M. Lechner, A. Kuppert, "A review on tailored blanks—Production, applications and evaluation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 2, pp. 151–164, 2014.
- [8] J. Frei, M. Biegler, M. Rethmeier, C. Böhne, G. Meschut, "Investigation of liquid metal embrittlement of dual phase steel joints by electro-thermomechanical spot-welding simulation," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 90, pp. 1–10, 2019.
- [9] M. Tolazzi, M. Merklein, "Precise Material Properties as a Prerequisite for FE-Analysis of the Hydroforming of Tailored Welded Blanks," *steel research international*, vol. 76, no. 12, pp. 915–919, 2005.
- [10] A. Kröff, W. Flügge, "ScaLight - Neue Fertigungstechniken in Stahl," *EFB Kolloquium Blechverarbeitung*, 2008.
- [11] H. E. Friedrich, Ed., *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des Projektes hat SZMF mit allen Verbund-Projektpartnern zusammengearbeitet. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse aus TWBlock in internen Projektstatusgesprächen bei SZMF präsentiert.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

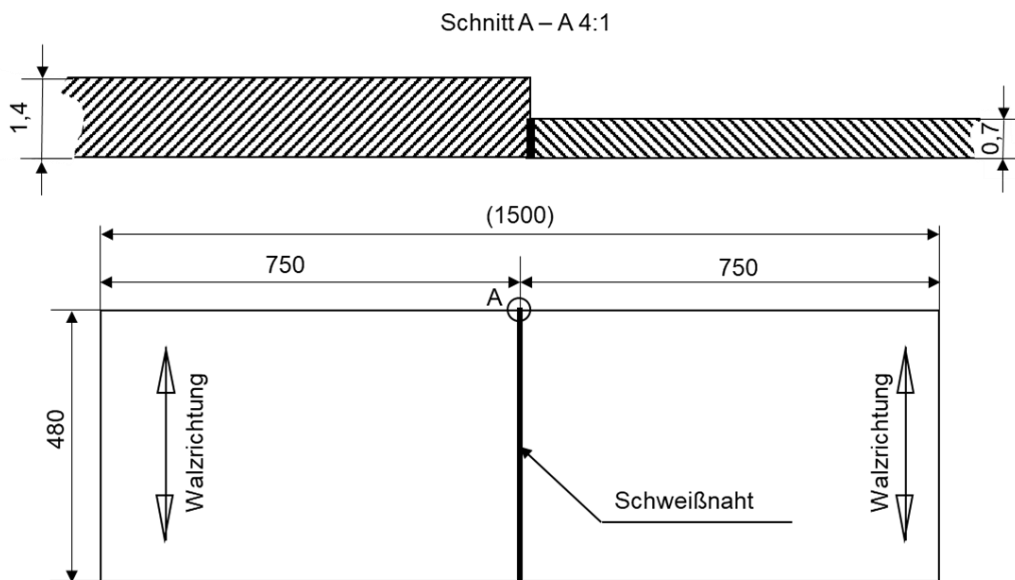
AP 1: Vorbereitende Arbeiten

Im ersten Arbeitspaket wurden relevante Vorabentscheidungen für die Projektlaufzeit getroffen. Dazu zählten seitens SZMF die Materialauswahl zusammen mit den Partnern VW, SZEP, IPK und NMF. Eine Materialauswahl wurde getroffen und die Materialbereitstellung an die Partner SZEP, IPK und NMF ist erfolgt.

In Tabelle 1 sind die ausgewählten Werkstoffe und die Mengen für die Partner sowie für die Versuche im Prototypenwerkzeug aufgeführt. In Abbildung 1 ist schematisch die Abmessung für das Prototypenwerkzeug sowie die dafür vorgesehenen Verbindungen dargestellt.

Tabelle 1: Werkstoffe und Mengen der Versuchsmaterialien

Werkstoff	Dicke	für Technologieproben			für Prototypen
		IPK	NMF	SZMF/SZEP	SZEP / VW
		m ²	m ²	m ²	m ²
CR440Y780T-DP-GI	0,70 mm	5	20	20	30
	1,35 mm	5	20	20	15
CR780Y980T-CH-GI	1,20 mm	5	20	30	15
CR780Y980T-CH-GI	1,50 mm	5	20	20	-
HC660XD	1,50 mm	5	20	20	-
HC660XD	1,20 mm	5	20	20	-



CR440Y780T-DP-GI	0,70 mm	an	CR440Y780T-DP-GI	1,35 mm
CR440Y780T-DP-GI	0,70 mm	an	CR780Y980T-CH-GI	1,2 mm

Abbildung 1: Platinen Abmessung und vorgesehene Verbindungen Prototypenwerkzeug

AP 2.3: Schweißtechnische Werkstoffcharakterisierung und Metallurgie

In diesem Arbeitspaket erfolgt die schweißtechnische Charakterisierung der Werkstoffe und Werkstoffkombinationen. Die vorgesehenen Verbindungen sind beim Projektpartner Salzgitter Europlatinen GmbH (SZEP) hergestellt worden und entsprechend an relevante Partner versendet worden. Gemäß Absprache mit dem Konsortium werden 4 Verbindungen näher betrachtet.

Bei SZMF wurden metallographische Analysen, Härteprüfungen und quasistatische Zugversuche an geschweißten Verbindungen durchgeführt.

Alle betrachteten Werkstoffe sind mit einer automobiltypischen Feuerverzinkung (GI) versehen.

Tabelle 2: Versuchsmatrix

Fügepartner 1	Fügepartner 2
CR780Y980T-CH t = 1,5 mm	CR780Y980T-CH t = 1,5 mm
HC660XD t = 1,5 mm	HC660XD t = 1,5 mm
CR780Y980T-CH t = 1,2 mm	CR440Y780T-DP t = 0,7 mm
CR440Y780T-DP t = 1,35 mm	CR440Y780T-DP t = 1,5 mm

Die Schweißparameter für die oben genannten Verbindungen sind in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt.

Es konnten für alle Verbindungen erfolgreich Schweißnähte an der ebenen Platine erzeugt werden.

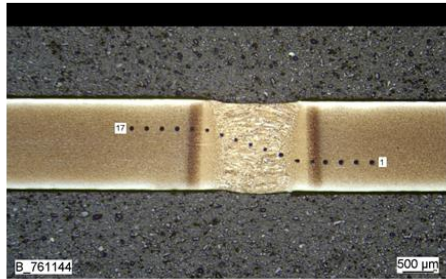
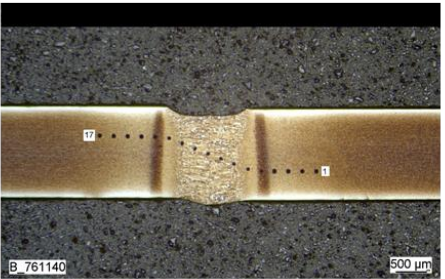
Werkstoff	Werkstoff
CR780Y980T-CH	HC660XD
Blechdicke	Blechdicke
1,5 mm	1,5 mm
Fügeprozess	Fügeprozess
Laserstrahlschweißen I-Naht am Stumpfstoß	Laserstrahlschweißen I-Naht am Stumpfstoß
Laserleistung $P_L = 4,9 \text{ kW}$	Laserleistung $P_L = 5,1 \text{ kW}$
Vorschub $v_s = 7,0 \text{ m/min}$	Vorschub $v_s = 7,0 \text{ m/min}$
Fokus \varnothing $d = 0,6 \text{ mm}$	Fokus \varnothing $d = 0,6 \text{ mm}$
Fokuslage $z = -2,9 \text{ mm}$ von Blechunterkante	Fokuslage $z = -2,9 \text{ mm}$ von Blechunterkante
Y-Position $Y = 0,01 \text{ mm}$	Y-Position $Y = 0,01 \text{ mm}$
	

Abbildung 2: Schweißparameter für artgleiche Verbindungen

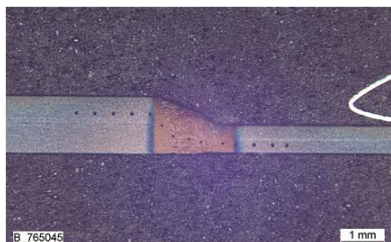
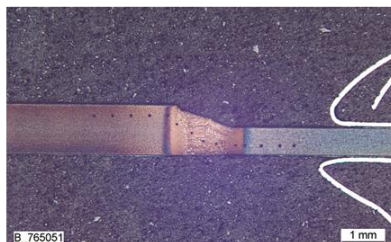
Werkstoff	Werkstoff
CR440Y780T-DP t = 1,35 mm CR440Y780T-DP t = 0,7 mm	CR780Y980T-CH t = 1,2 mm CR440Y780T-DP t = 0,7 mm
Blechdicke	Blechdicke
S. O.	S. O.
Fügeprozess	Fügeprozess
Laserstrahlschweißen I-Naht am Stumpfstoß	Laserstrahlschweißen I-Naht am Stumpfstoß
Laserleistung $P_L = 3,6 \text{ kW}$	Laserleistung $P_L = 4,1 \text{ kW}$
Vorschub $v_s = 7,0 \text{ m/min}$	Vorschub $v_s = 7,0 \text{ m/min}$
Fokus \varnothing $d = 0,6 \text{ mm}$	Fokus \varnothing $d = 0,6 \text{ mm}$
Fokusslage $z = -2,9 \text{ mm}$ von Blechunterkante	Fokusslage $z = -2,9 \text{ mm}$ von Blechunterkante
Y-Position $Y = 0,01 \text{ mm}$	Y-Position $Y = 0,01 \text{ mm}$
	
B 765045 1 mm	B 765051 1 mm

Abbildung 3: Schweißparameter für die Verbindungen mit Dicken sprung

In Abbildung 4 sind die Querschliffe mit Nahtvermessung für die oben genannten Verbindungen dargestellt. Die beiden artgleichen Verbindungen zeigen einen homogenen Nahtverlauf mit geringem Nahteinfall auf. Die beiden Verbindungen mit Dicken sprung auf der Nahtoberseite sind durch einen stetigen Nahtverlauf ohne innere und äußere Nahtfehler vom dicken zum dünnen Fügepartner hin gekennzeichnet.

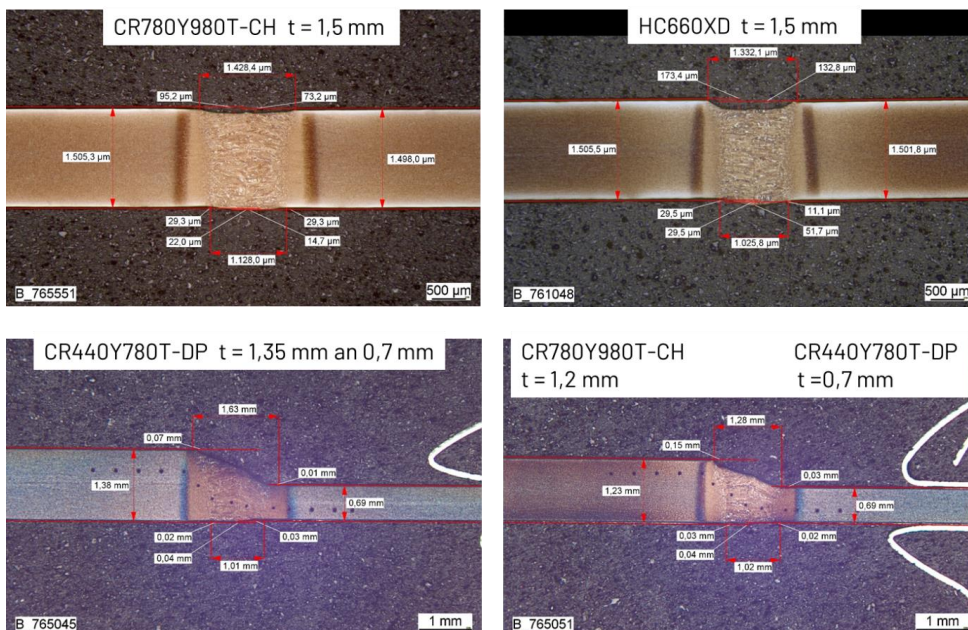


Abbildung 4: Querschliffe mit Nahtvermessung, gleichartige Verbindungen oben, Verbindungen mit Dicken sprung unten

In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind Querschliffe und zugehörige Härteverläufe von Laserstrahlschweißverbindungen am Stumpfstoß aus oben genannten Verbindungen aufgezeigt.

Innerhalb der Gussstruktur des Schweißgutes werden bei beiden Werkstoffen (Bild 3) im Härteverlauf gegenüber dem Grundwerkstoff höhere Härtewerte von 450 HV 0,5 gegenüber der Grundwerkstoffhärte von ca. 340 HV 0,5 beim CR780Y980T-CH und von ca. 360 HV 0,5 beim HC660XD gemessen. Ausgehend von der Grundwerkstoffhärte sinkt die Härte bei beiden Werkstoffen in den Wärmeeinflusszonen ein wenig ab bis auf Werte von ca. 300 HV 0,5. An den Schmelzlinien werden dann Härtespitzen mit Härtewerten von knapp 450 HV 0,5 gemessen.

Ein auftretender Härteabfall in den Wärmeeinflusszonen ist beim Schweißen von Stählen in der Festigkeitsklasse 1000 MPa bei Dual- und Komplexphasenstählen durch Anlasseffekte typisch und daher häufig vorhanden und kann bei der späteren Umformung als Tailor Welded Blank zu einer Schwachstelle im Bauteil führen.

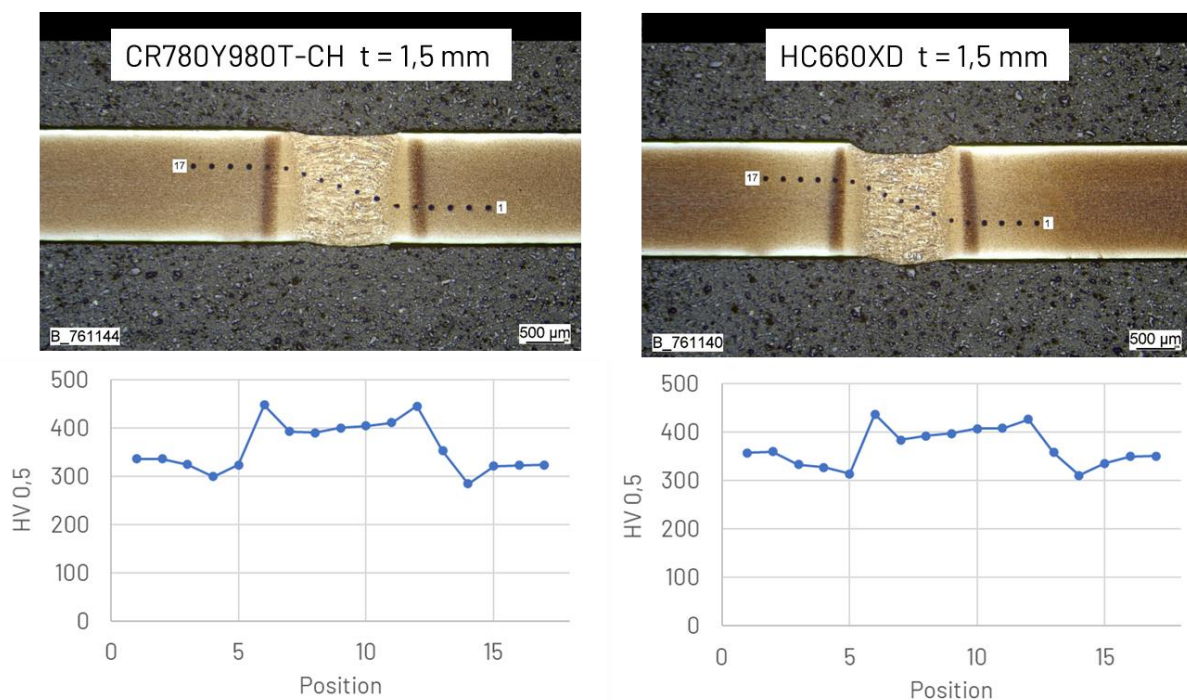


Abbildung 5: Querschliffe und zugehörige Härteverläufe, artgleiche Verbindungen

Innerhalb der Gussstruktur des Schweißgutes bei der Verbindung aus CR440Y780T-DP t = 1,34 mm an 0,7 mm (Abbildung 6) werden im Härteverlauf gegenüber dem Grundwerkstoff (250 HV 0,5) typisch höhere Härtewerte von mehr als 410 HV 0,5 gemessen. An den Schmelzlinien hin zu beiden Blechdicken werden dann Härtespitzen mit Härtewerten von knapp 450 HV 0,5 gemessen.

Bei der Verbindung CR780Y980T-CH t = 1,2 mm an CR440Y780T-DP t = 0,7 mm werden innerhalb der Gussstruktur im Härteverlauf gegenüber dem Grundwerkstoff höhere Härtewerte ca. 400 HV 0,5 gegenüber der Grundwerkstoffhärte von ca. 340 HV 0,5 beim CR780Y980T-CH und von ca. 250 HV 0,5 beim CR440Y780T-DP gemessen. Ausgehend von der Grundwerkstoffhärte sinkt die Härte beim CR780Y980T-CH hin zur Wärmeeinflusszone ein wenig ab bis auf Werte von ca. 320 HV 0,5. An den Schmelzlinien werden dann Härtespitzen mit Härtewerten von bis zu 450 HV 0,5 gemessen.

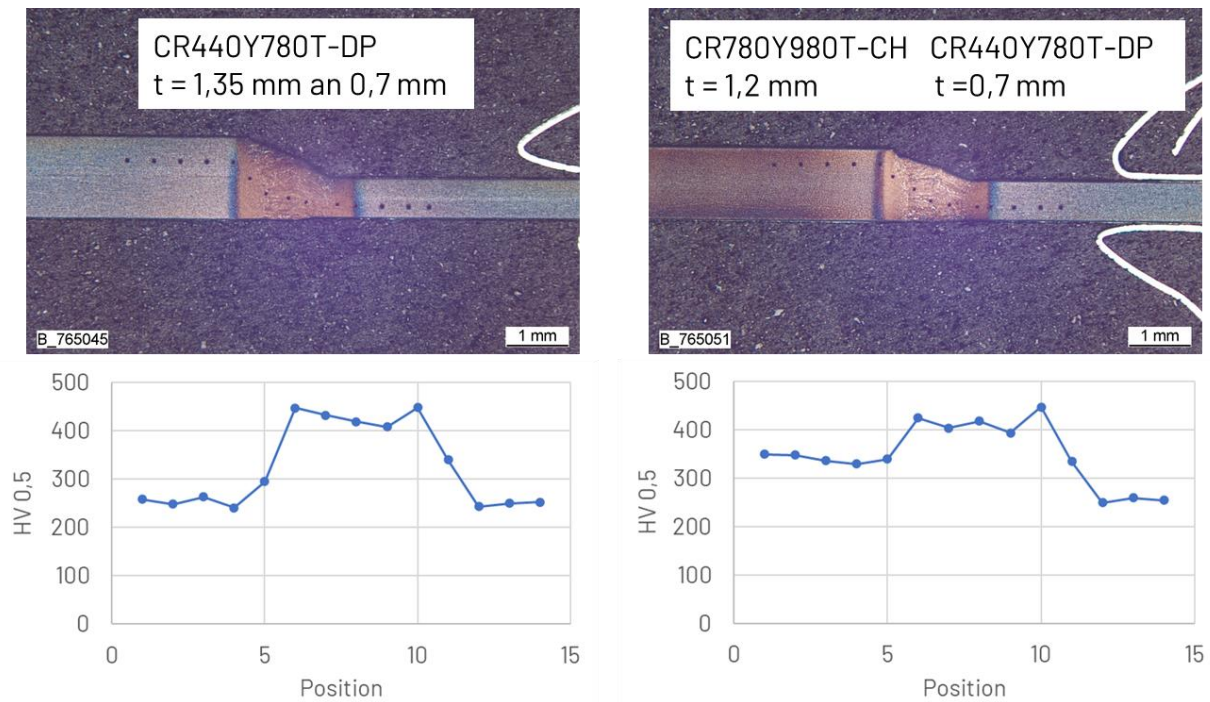


Abbildung 6: Querschliffe und zugehörige Härteverläufe, Verbindungen mit Dicksprung

In den folgenden Bildern sind die zugehörigen Gefügebilder der Verbindungen dargestellt. Die darin enthaltenen Abkürzungen sind wie folgt zu verstehen:

GW: Grundwerkstoff, **WEZ:** Wärmeeinflusszone, **SL:** Schmelzlinie, **SG:** Schweißgut

In Abbildung 7 sind die Gefügebilder der artgleichen Verbindung des CR780Y980T-CH t = 1,5 mm dargestellt.



Abbildung 7: Mikrostruktur Verbindung CR780Y980T-CH t = 1,5 mm

In der Fügezone werden für das Laserstrahlschweißen des oben genannten Werkstoffes in der Festigkeitsklasse 1000 MPa typische Gefügestrukturen detektiert. Ausgehend vom Grundwerkstoff, bestehend aus einer bainitisch-ferritischen Matrix mit Martensit, schließt sich in der Wärmeeinflusszone eine bainitisch-martensitische Struktur mit etwas Ferrit an und geht in Richtung Schweißgut über in eine martensitisch-bainitische Gefügestruktur. Die Gussstruktur des Schweißgutes weist eine rein martensitische Mikrostruktur auf.

In Abbildung 8 sind die Gefügebilder der artgleichen Verbindung des HC660XD $t = 1,5$ mm dargestellt.

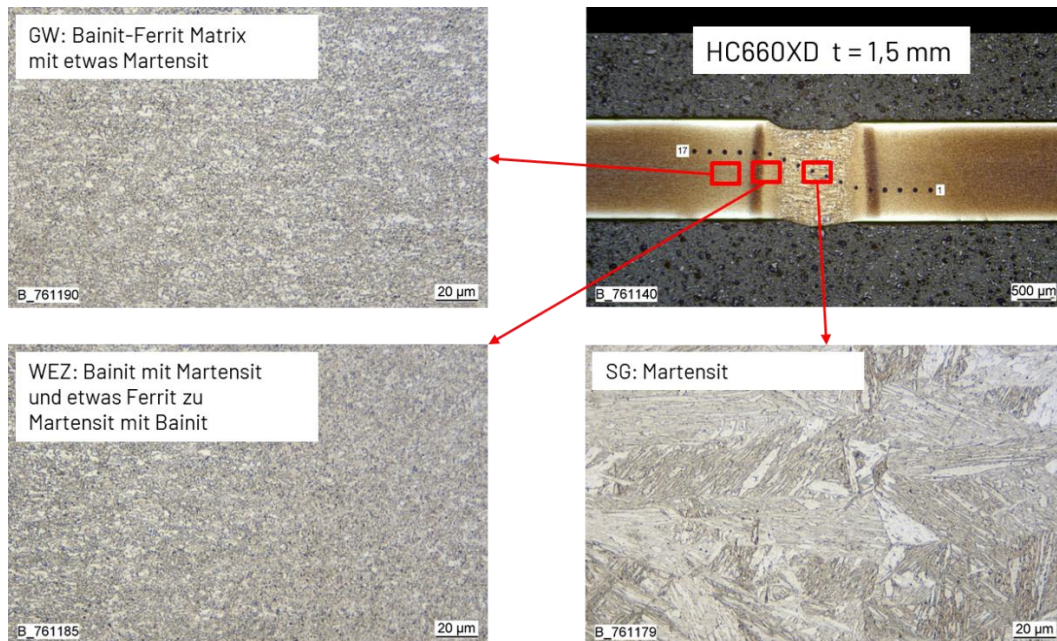


Abbildung 8: Mikrostruktur Verbindung HC660XD $t = 1,5$ mm

Bei der Verbindung am HC660XT $t = 1,5$ mm werden für den Grundwerkstoff und die Fügezone ähnliche Gefügestrukturen wie bei der artgleichen Verbindung des CR780Y980T-CH $t = 1,5$ mm gefunden (vgl. Abbildung 8).

In Abbildung 9 ist die Mikrostruktur der Verbindung CR440Y780T-DP $t = 1,35$ mm an 0,7 mm dargestellt.

Ausgehend vom Grundwerkstoff (dicker Fügepartner links), bestehend aus einer ferritisch-martensitischen Matrix mit etwas Bainit, schließt sich in Richtung der Wärmeeinflusszone mit zunehmend steigendem Martensitanteil eine martensitische Struktur in der Wärmeeinflusszone an. Die Gussstruktur des Schweißgutes weist dann eine rein martensitische Mikrostruktur auf. Hin zum dünnen Fügepartner des gleichen Materials (rechts) ist die Wärmeeinflusszone ebenfalls wieder martensitisch und geht über in die Grundwerkstoffstruktur mit einer ferritisch-martensitischen Matrix mit etwas Bainit.

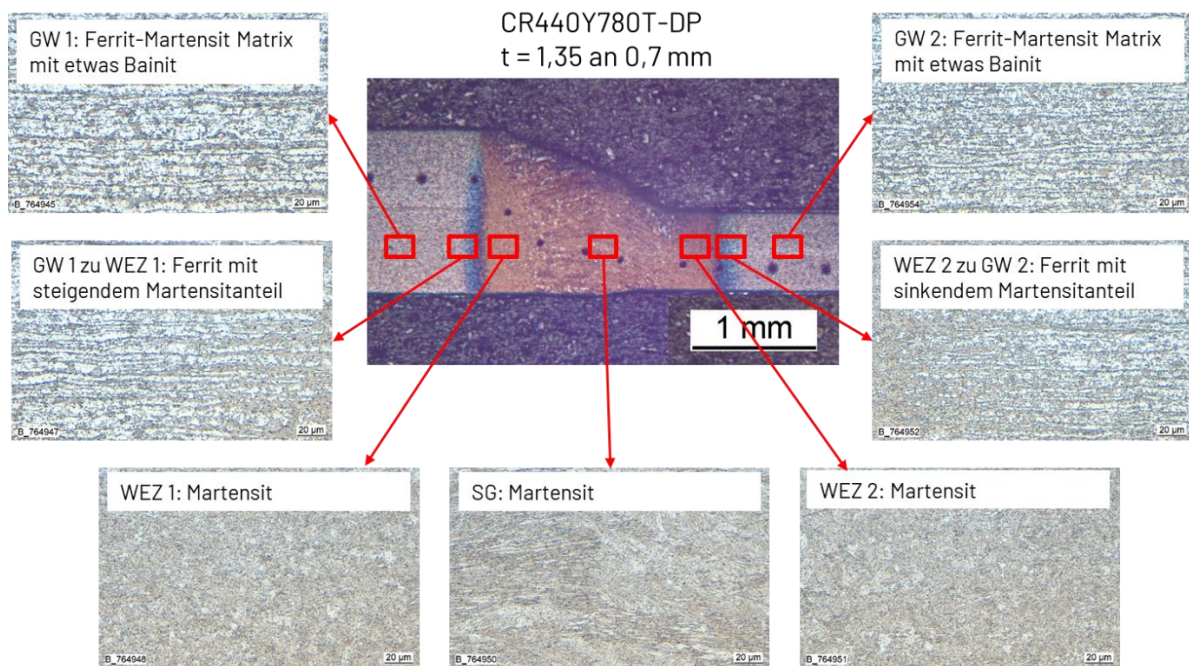


Abbildung 9: Mikrostruktur Verbindung CR440Y780T-DP t = 1,35 mm an 0,7 mm

In Abbildung 10 ist die Mikrostruktur der Verbindung CR780Y980T-CH t = 1,2 mm an CR440Y780T-DP t = 0,7 mm dargestellt. Ausgehend vom Grundwerkstoff (dicker Fügepartner CR780Y980T-CH links), bestehend aus einer bainitisch-ferritischen Matrix mit Martensit, schließt sich in der Wärmeinflusszone eine bainitisch-martensitische Struktur mit etwas Ferrit an und geht in Richtung Schweißgut über in eine martensitisch-bainitische Gefügestruktur. Die Gussstruktur des Schweißgutes weist eine rein martensitische Mikrostruktur auf. Hin zum dünnen Fügepartner (CR440Y780T-DP rechts) ist die Wärmeinflusszone martensitisch und geht über in die Grundwerkstoffstruktur mit einer ferritisch-martensitischen Matrix mit etwas Bainit.

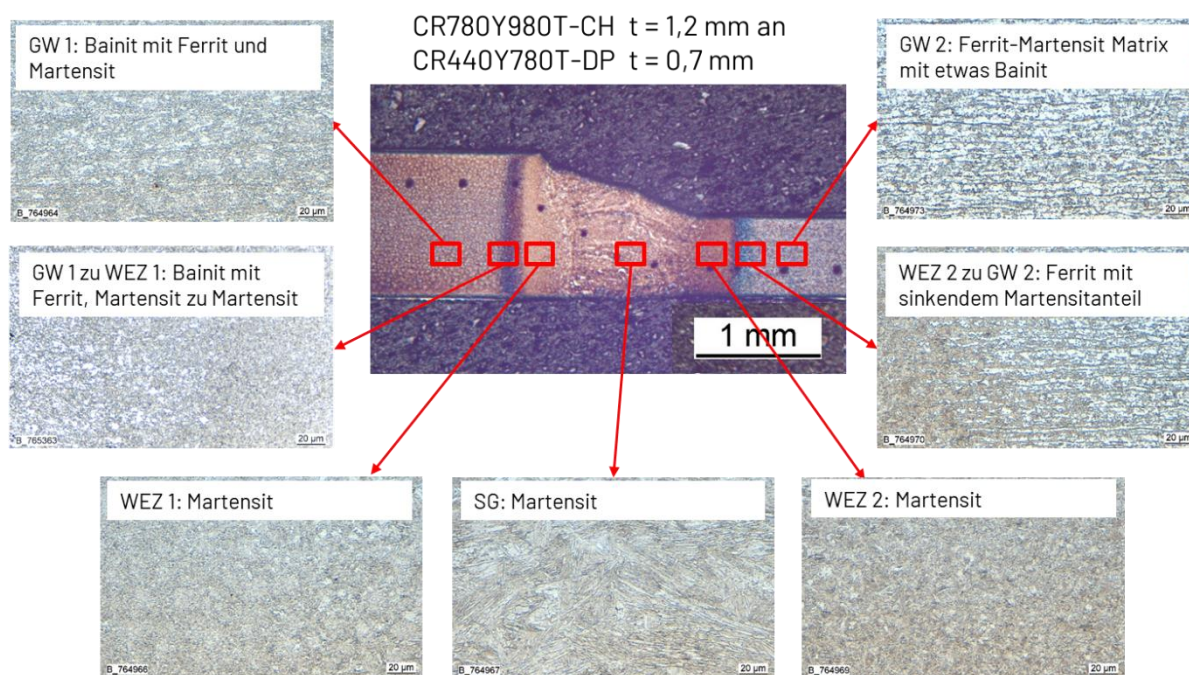


Abbildung 10: Mikrostruktur Verbindung CR780Y980T-CH t = 1,2 mm an CR440Y780T-DP t = 0,7 mm

In Abbildung 11 sind die Zugfestigkeiten aus dem quasistatischen Zugversuch für die Grundwerkstoffe CR780Y980T-CH mit einer Dicke von $t = 1,5$ mm und HC660XD mit einer Dicke von $t = 1,5$ mm sowie deren artgleichen geschweißten Verbindungen aufgetragen. Für die geschweißten Verbindungen werden dabei jeweils ähnliche Zugfestigkeiten mit geringsten Streuungen im Vergleich zum jeweiligen Grundwerkstoff ermittelt.

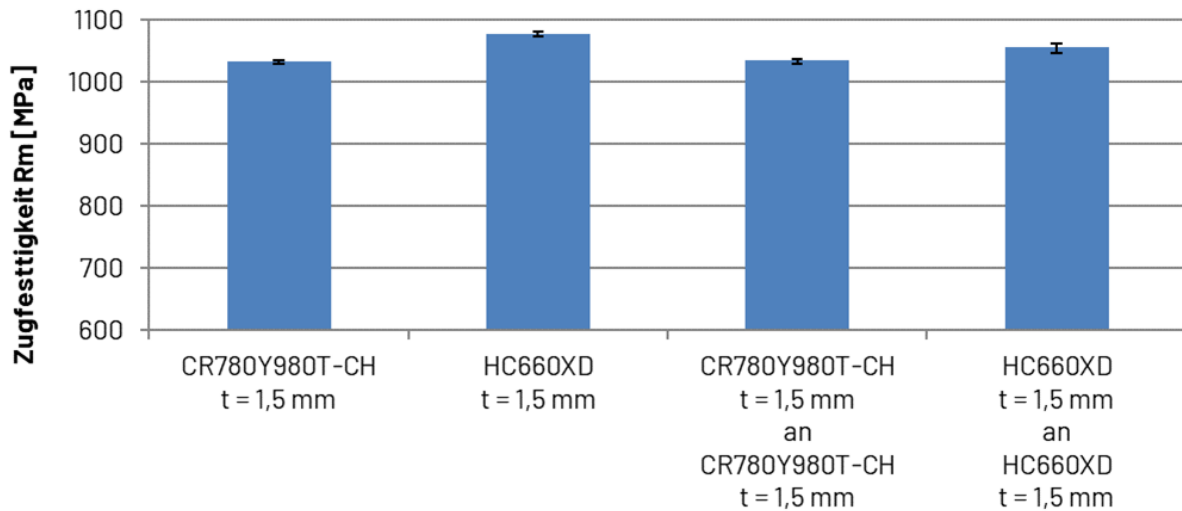


Abbildung 11: Zugfestigkeiten Grundwerkstoff: 1. und 2. Säule von links, geschweißte Verbindung: 3. und 4. Säule von links

Die artgleichen Verbindungen des CR780Y980T-CH mit einer Dicke von $t = 1,5$ mm sowie des HC660XD mit einer Dicke von $t = 1,5$ mm versagen für alle 5 Einzelproben außerhalb der Naht im unbeeinflussten Grundwerkstoff (siehe Abbildung 12).

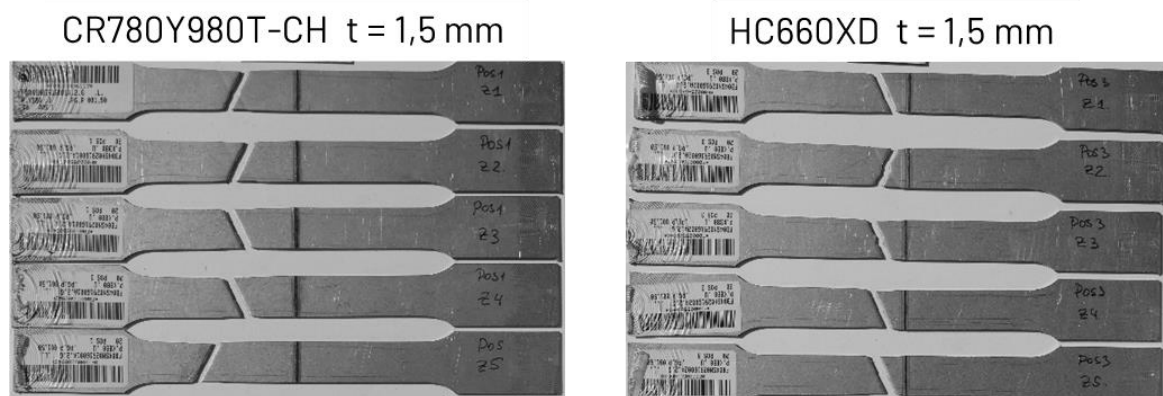


Abbildung 12: Bruchbilder der geschweißten Verbindungen, artgleich ohne Dicken sprung

5 cm

In Abbildung 13 sind die Zugfestigkeiten aus dem quasistatischen Zugversuch für die Grundwerkstoffe CR780Y980T-CH $t = 1,2$ mm, CR440Y780T-DP $t = 1,35$ mm und CR440Y780T-DP $t = 0,7$ mm sowie den Verbindungen aus CR440Y780T-DP $t = 1,35$ an $0,7$ mm und CR780Y980T-CH $t = 1,2$ mm an CR440Y780T-DP $t = 0,7$ mm dargestellt.

Für die geschweißten Verbindungen werden bei geringer Streuung jeweils Zugfestigkeiten äquivalent zur Grundwerkstoffzugfestigkeit des CR440Y780T-DP mit einer Dicke von $t = 0,7$ mm erreicht.

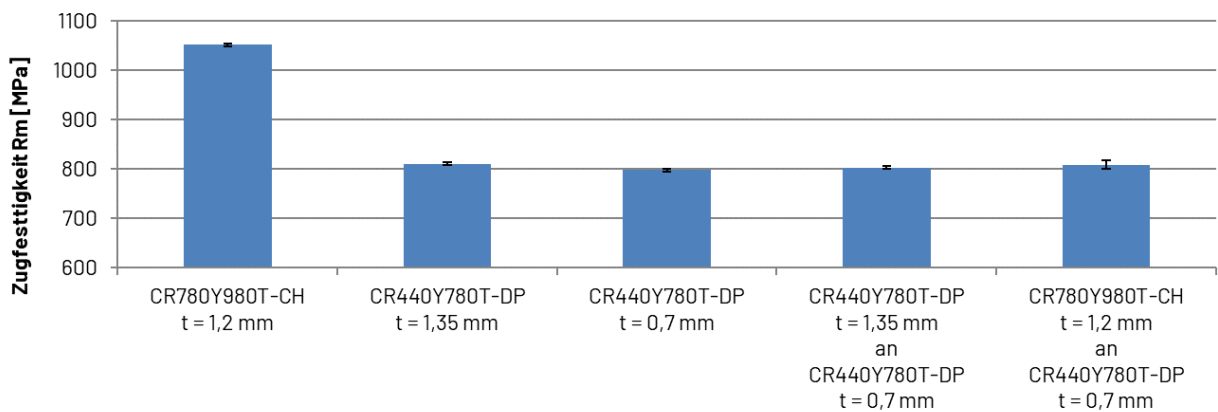


Abbildung 13: Zugfestigkeiten Grundwerkstoffe: 1. und 2. und 3. Säule von links, und geschweißte Verbindungen: 3. und 4. Säule von links

Alle Proben mit Dickensprung versagen außerhalb der Naht im unbeeinflussten Grundwerkstoff des CR440Y780T-DP mit einer Dicke von $t = 0,7$ mm (siehe Abbildung 14).

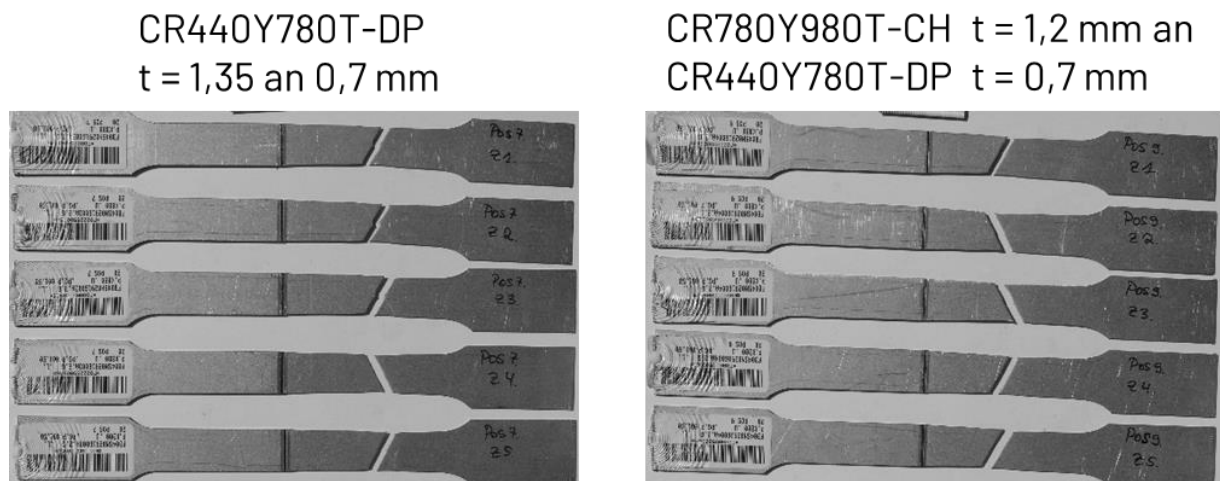


Abbildung 14: Bruchbilder der geschweißten Verbindungen mit Dickensprung 5 cm

Des Weiteren wurden Zugversuche bei verschiedenen Temperaturen (Warmzugversuche) an Grundwerkstoffproben durchgeführt. Die untersuchten Werkstoffe sind in Tabelle 4 mit dem jeweiligen Bezeichnungsschlüssel zusammengefasst. Die Versuchswerkstoffe waren mit einer automobiltypischen Feuerverzinkung GI 50/50 versehen. Für die Warmzugversuche werden die Proben mittels einer Lösung aus Salzsäure (HCl) und dem Inhibitor Hexamethylentetramin ($C_6H_{12}N_4$) entzinkt. Die Salzsäure wird mit voll entsalztem oder destilliertem Wasser im Verhältnis von einem Teil HCl auf einen Teil Wasser (50 %-Lösung) verdünnt. Dieser Lösung wird unter Rühren 3,5 g Hexamethylentetramin je Liter zugegeben. So wird ein Aufschmelzen oder gar Verdampfen der Zinkschicht während der Versuche vermieden.

Tabelle 4: Versuchswerkstoffe für Warmzugversuche

Schlüssel	Material	Blechdicke
W1	CR780Y980T-CH GI	1,5 mm
W2	CR780Y980T-CH GI	1,2 mm
W3	HC660XD	1,5 mm
W4	CR440Y780T-DP GI	1,35 mm
W5	CR440Y780T-DP GI	0,7 mm

In Abbildung 15 sind für die Versuchsreihen aus dem quasistatischen Zugversuch die ermittelten Zugfestigkeiten und in Abbildung 16 die Bruchdehnungen, jeweils bei Raumtemperatur und bei Prüftemperaturen von 300°C (hier je 2 Versuchsreihen), 600°C und 900°C, (hier je 3 Versuchsreihen) dargestellt.

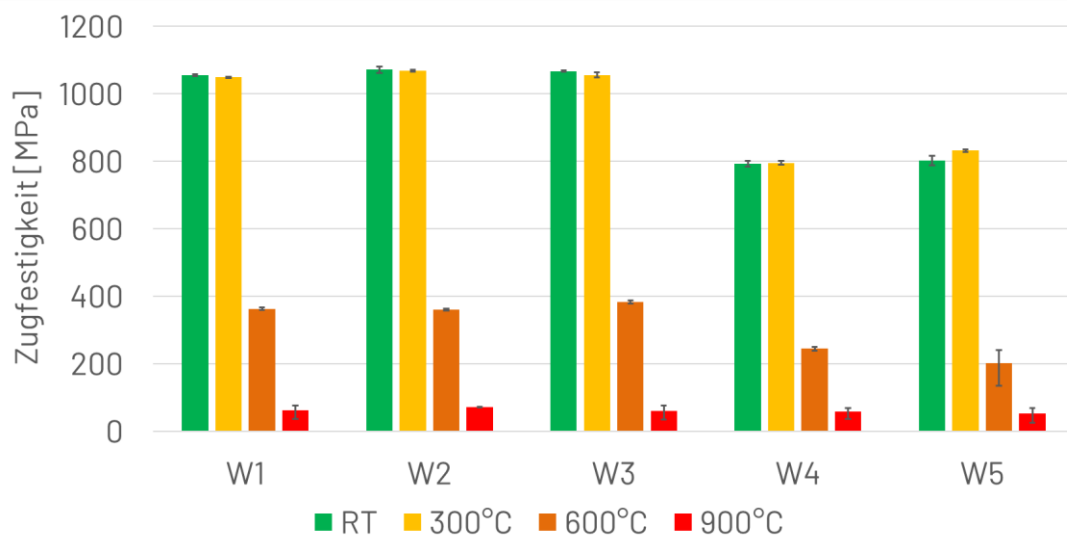


Abbildung 15: Warmzugversuche: Zugfestigkeiten

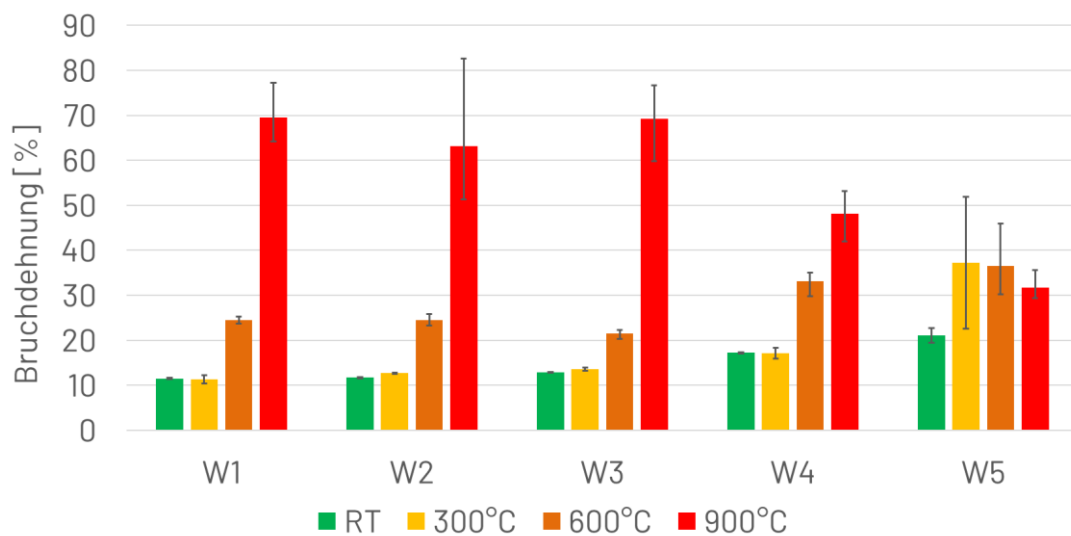


Abbildung 16: Warmzugversuche: Bruchdehnungen

Es kann festgehalten werden, dass bei höheren Prüftemperaturen ab 600 °C die Zugfestigkeiten im Vergleich zur Prüfung bei Raumtemperatur signifikant abfallen. Dies geht einher mit in der Regel ansteigenden Bruchdehnungen. Die Abnahme der Zugfestigkeit mit der Temperatur sowie die Zunahme der Bruchdehnung spiegeln die zu erwartende Korrelation von mechanischen Kennwerten und steigender Prüftemperatur wider. Bei höheren Temperaturen nimmt die Streuung der Versuchsergebnisse erwartbar zu. Dabei tritt bei Proben mit geringer Blechdicke (hier $t = 0,7 \text{ mm}$) bereits bei Prüftemperaturen ab 300°C erhöhte Streuung auf.

Darüber hinaus wurden Dilatometer-Tests bei verschiedenen Temperaturen zur Charakterisierung der eingestellten Gefügestrukturen durchgeführt. In den folgenden Bildern sind die Ergebnisse aus den Dilatometer-Tests bei verschiedenen Temperaturen zur Charakterisierung der eingestellten Gefügestrukturen dargestellt. Die dabei untersuchten Werkstoffe mit dem jeweilig zugehörigen Bezeichnungsschlüssel sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Für die Dilatometer Tests wurden die Proben entzinkt (vgl. Abschnitt Warmzugversuche).

Tabelle 5: Versuchswerkstoffe für Dilatometer Tests

Schlüssel	Material	Blechdicke
W1	CR780Y980T-CH GI	1,5 mm
W3	HC660XD	1,5 mm
W4	CR440Y780T-DP GI	1,35 mm

Beispielhaft sind hier die Ergebnisse für den Werkstoff CR780Y980T-CH in $t = 1,5 \text{ mm}$ dargestellt. Hier kann festgehalten werden, dass bei höheren Prüftemperaturen ab 600 °C der Martensitgehalt im sich einstellenden Gefüge im Vergleich zur Prüfung bei Raumtemperatur signifikant ansteigt. Dies geht einher mit in der Regel ansteigender Härte in den entsprechenden Gefügen.

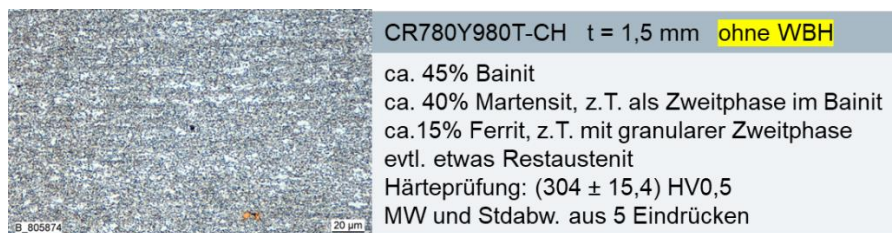


Abbildung 17: Dilatometer Test; Grundwerkstoffprobe ohne Wärmebehandlung (WBH)

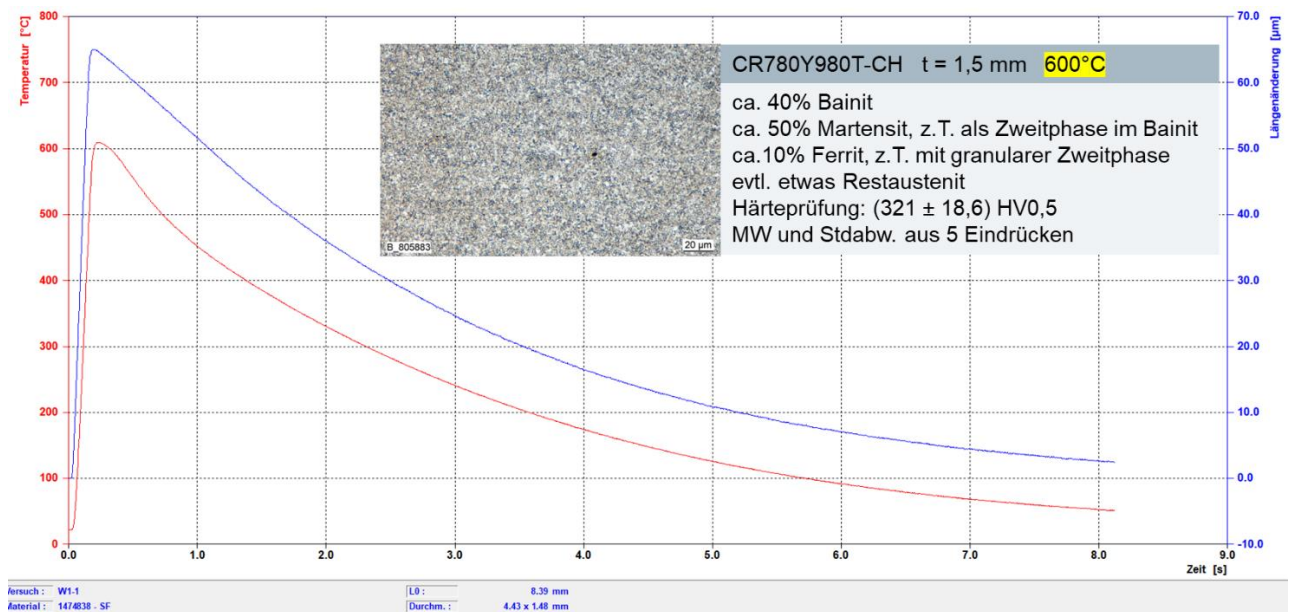


Abbildung 18: Ergebnisse Dilatometer Test für einen Temperaturzyklus bis 600°C

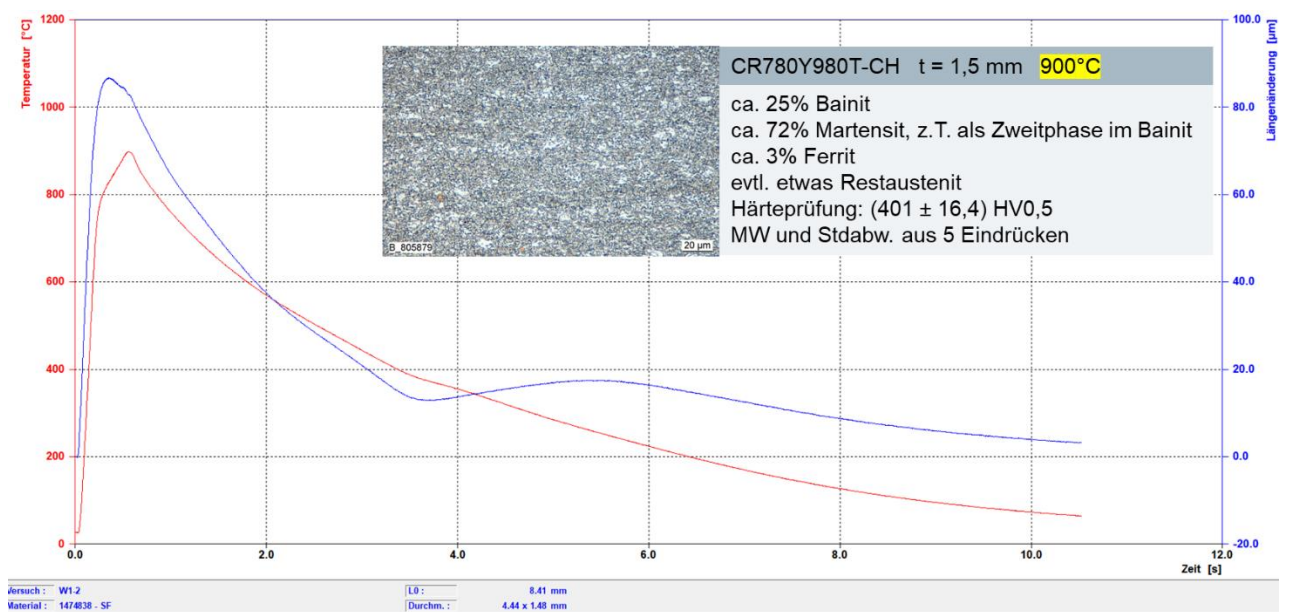


Abbildung 19: Ergebnisse Dilatometer Test für einen Temperaturzyklus bis 900°C

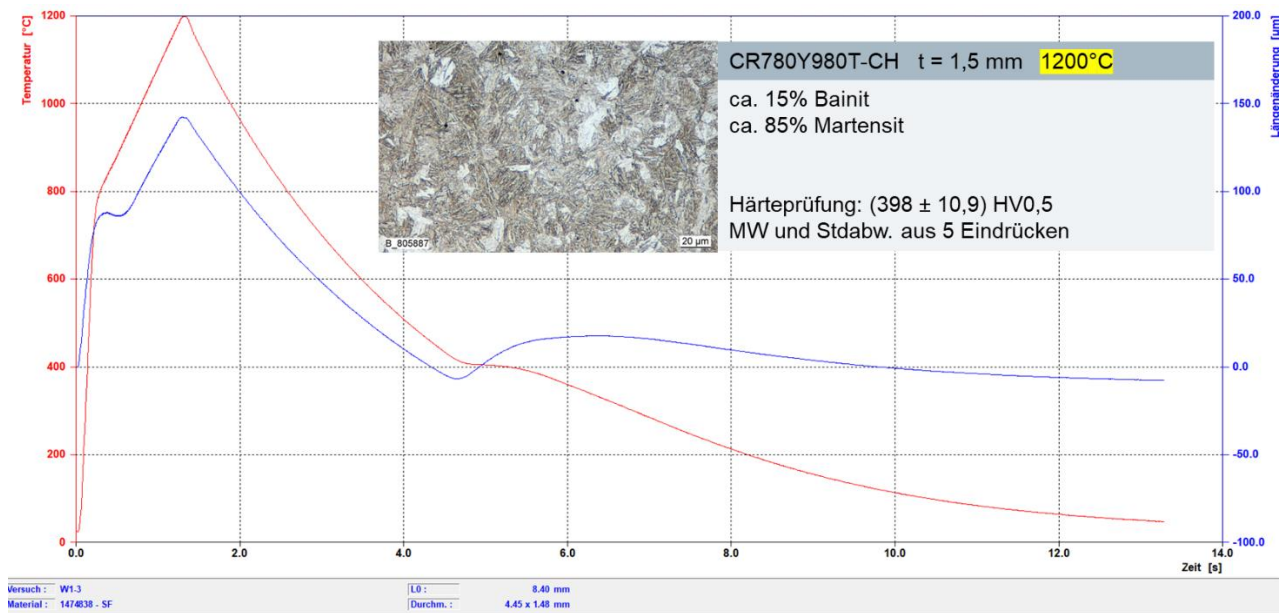


Abbildung 20: Ergebnisse Dilatometer Test für einen Temperaturzyklus bis 1200°C

AP 3.3: Durchführung der Validierungsexperimente

In diesem Arbeitspaket wurden bei SZMF Schweißversuche mit Temperaturmessung durchgeführt. Diese dienen der Vorbereitung und Optimierung des Simulationsmodelles beim IPK. Dafür werden im Modell Temperatur-Zeit-Verläufe an definierten Partikeln exportiert, um Abkühlzeiten abzuleiten.

In Abbildung 21 ist der Versuchsaufbau für die Schweißversuche mit Temperaturmessung dargestellt. Zu einer Seite des Fügestoßes sind 4 Ni-CrNi Thermoelemente nahe des Fügestoßes angeschweißt worden. Zusätzlich wurde ein Pyrometer (SZMF) verwendet, dessen Messfleck mittig auf den positionierten Stoß gerichtet wurde.

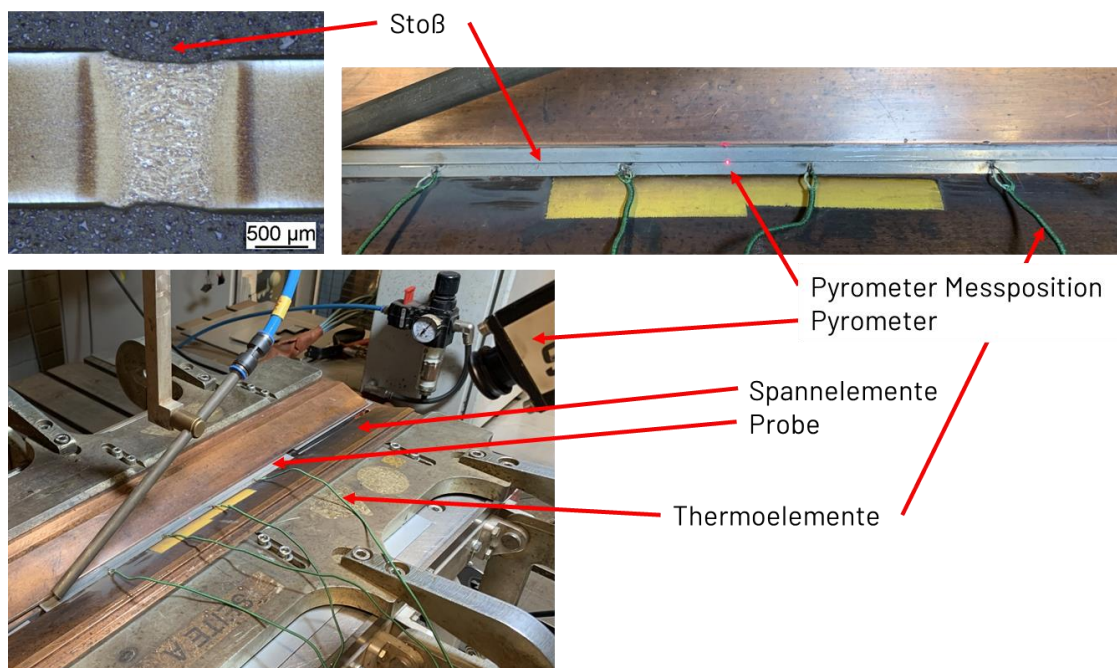


Abbildung 21: Versuchsaufbau Temperaturmessung

In Abbildung 22 sind beispielhaft für die artgleiche Verbindung HC660XD $t = 1,5$ mm die Temperatur-Zeit-Verläufe aufgetragen. Mit den Thermoelementen neben der Naht werden ausgehend von der Raumtemperatur relativ geringe Temperaturen von bis zu 400 °C gemessen. Das Pyrometer zeichnet in seinem Messbereich von 300 – 1300 °C bei Durchfahren des Laserschweißprozesses einen Temperaturpeak auf, der mit einer max. erfassbaren Temperatur von 1300 °C einhergeht und hinsichtlich der Abkühlbedingungen eine schnellere Abkühlung aus höheren Temperaturen im Vergleich zu den Thermoelementmessungen aufzeigt.

Diese und weitere Ergebnisse fanden Einzug in die Modellbildung des Laserstrahlschweißprozesses bei den Partnern IPK, NMF und d-fine.

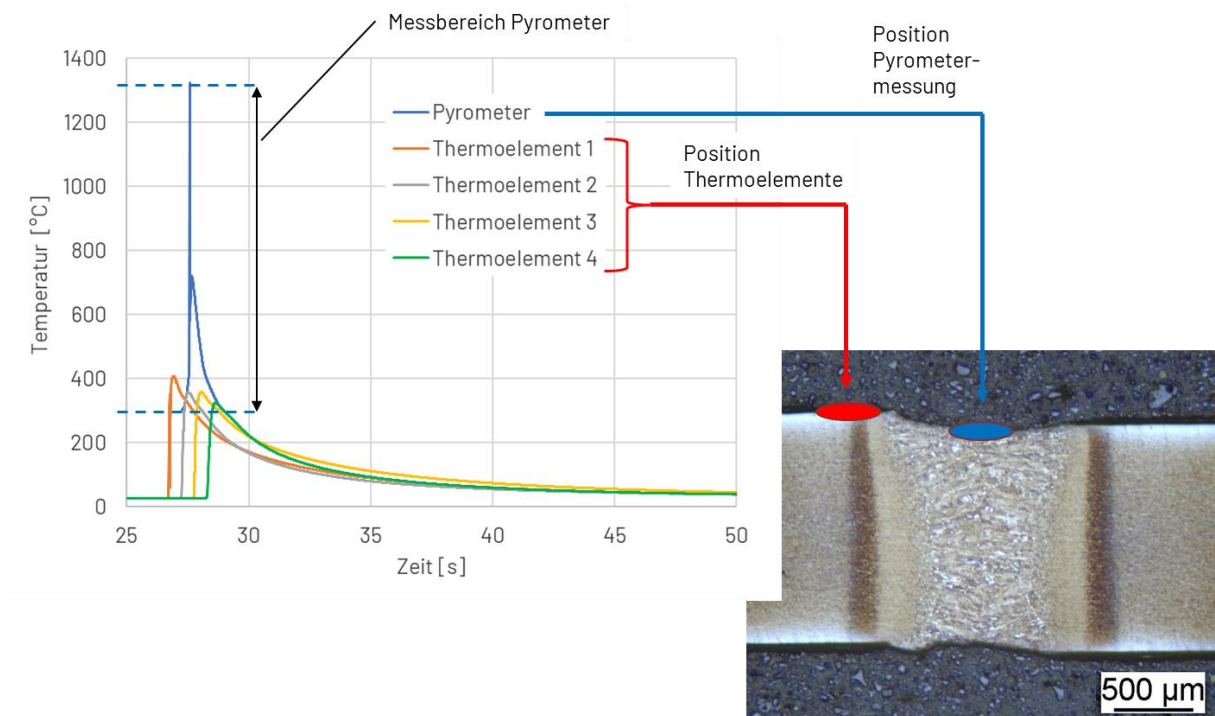


Abbildung 22: Temperatur-Zeit-Verläufe

Des Weiteren wurden mit einem optischen 3D-Messsystem an geschweißten Proben **Verzugsmessungen** durchgeführt. Da die Substrate vor dem Schweißen gerichtet vorlagen, wurden die Messungen mit einer virtuellen, ebenen Fläche korreliert. Die Messungen wurden an den in Abbildung 23 schematisch dargestellten geschweißten Technologieproben durchgeführt.

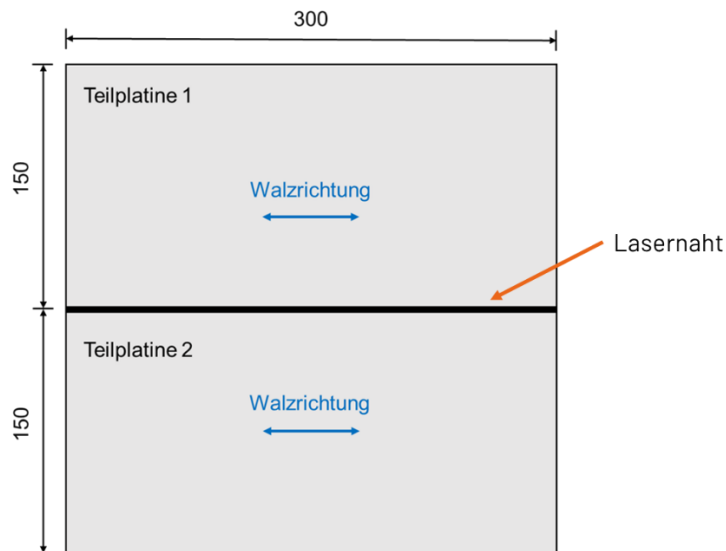


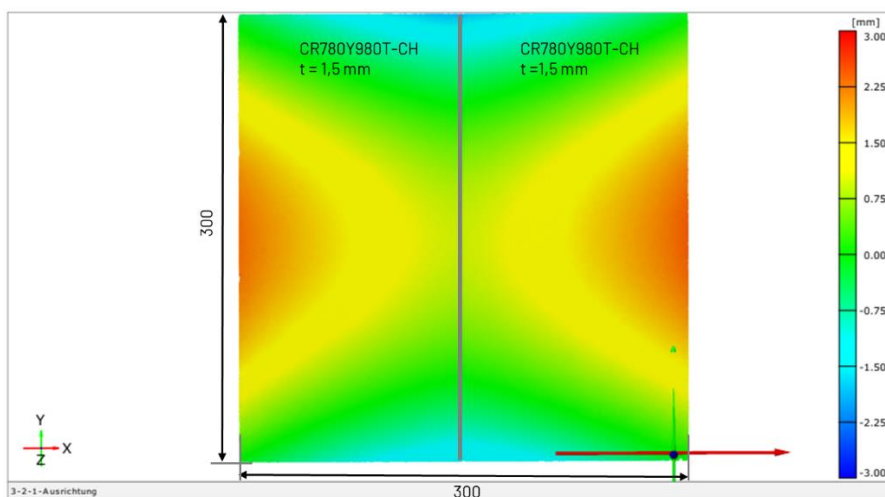
Abbildung 23: Darstellung der Technologieprobe

Die betrachteten geschweißten Verbindungen sind nachfolgend in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Verbindungen für Verzugsmessungen

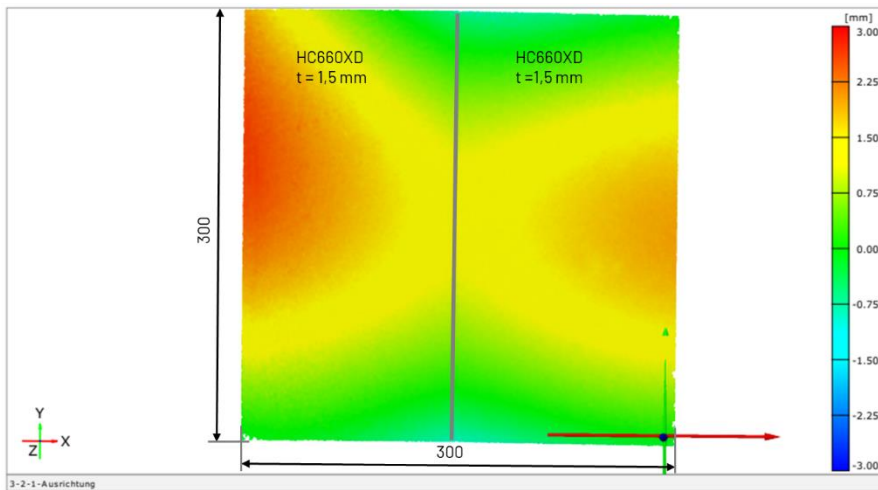
Schlüssel	Material	Blechedicke		Material	Blechedicke
W1	CR780Y980T-CH GI	1,5 mm	artgleich		
W3	HC660XD	1,5 mm	artgleich		
W9	CR780Y980T-CH GI	1,2 mm	an	CR440Y780T-DP GI	0,7 mm

Die Ergebnisse der Verzugsmessung der geschweißten Proben mit den jeweiligen Schweißparametern sind nachfolgend in den Abbildungen 24, 25 und 26 gezeigt.



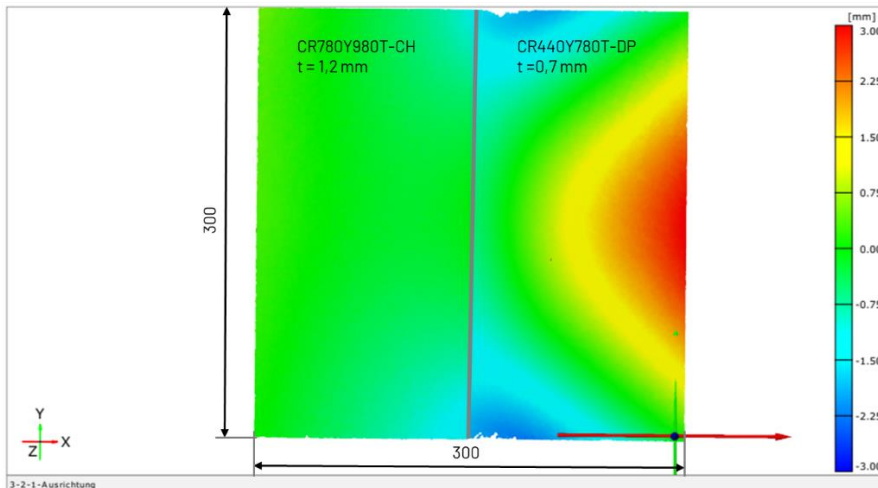
Werkstoff	CR780Y980T-CH
Blechedicke	1,5 mm
Fügeprozess	Laserstrahlschweißen I-Naht am Stumpfstoß
Laserleistung	$P_L = 4,9 \text{ kW}$
Vorschub	$v_s = 7,0 \text{ m/min}$
Fokus \varnothing	$d = 0,6 \text{ mm}$
Fokuslage	$z = -2,9 \text{ mm}$ von Blechunterkante
Y-Position	$Y = 0,01 \text{ mm}$
Versuchsbezeichnung	Verzugsmessung

Abbildung 24: Verzugsmessung Technologieprobe CR780Y980T-CH GI t = 1,5 mm artgleich



Werkstoff	HC660XD
Blechedicke	1,5 mm
Fügeprozess	Laserstrahlschweißen I-Naht am Stumpfstoß
Laserleistung	$P_L = 5,1 \text{ kW}$
Vorschub	$v_s = 7,0 \text{ m/min}$
Fokus \varnothing	$d = 0,6 \text{ mm}$
Fokuslage	$z = -2,9 \text{ mm}$ von Blechunterkante
Y-Position	$Y = 0,01 \text{ mm}$
Versuchsbezeichnung	Verzugsmessung

Abbildung 25: Verzugsmessung Technologieprobe HC660XD t = 1,5 mm artgleich



Werkstoff	CR780Y980T-CH t = 1,2 mm CR440Y780T-DP t = 0,7 mm
Blechedicke	1,2 mm an 0,7 mm
Fügeprozess	Laserstrahlschweißen I-Naht am Stumpfstoß
Laserleistung	$P_L = 4,1 \text{ kW}$
Vorschub	$v_s = 7,0 \text{ m/min}$
Fokus \varnothing	$d = 0,6 \text{ mm}$
Fokuslage	$z = -2,9 \text{ mm}$ von Blechunterkante
Y-Position	$Y = 0,01 \text{ mm}$
Versuchsbezeichnung	Verzugsmessung

Abbildung 26: Verzugsmessung CR780Y980T-CH GI t = 1,2 mm an CR440Y780T-DP GI t = 0,7 mm

Hierzu kann festgehalten werden, dass der Verzug der geschweißten Proben aus der inhomogenen Wärmeverteilung während des Schweißprozesses resultiert. In der Zone mit erhöhter Temperatur dehnt sich das Material stärker aus, durch das kältere umliegende Material wird die Ausdehnung aber gehemmt (Abbildung 24 und Abbildung 25). Dünnere Proben bzw. Fügepartner haben beim Schweißen einen höheren Verzug als dickwandige. Dies resultiert aus der geringeren Steifigkeit im Fügeverbund beim dünneren Fügepartner (Abbildung 26).

Darüber hinaus sind in diesem Arbeitspaket Umformversuche an geschweißten Nakajima Proben durchgeführt worden. Diese sind beispielhaft vergleichend anhand von Proben aus dem nachfolgenden AP 4.2 „Optimierte Schweißversuche“ dargestellt.

AP 4.2: Optimierte Schweißversuche

In diesem Arbeitspaket erfolgten experimentelle Versuche mit Bezug auf die Optimierung des Laserschweißprozesses hinsichtlich eines verbesserten Verformungsverhaltens durch:

- thermische Nahtvorbehandlung
- angepasster Schweißzusatz (höherfester Zusatz Union NiMoCr)
- modifizierte Strahlform (Strahlpendeln)

Thermische Nahtvorbehandlung

In Abbildung 27 sind die Querschliffe mit Nahtvermessung für die artgleiche Verbindung CR780Y980T-CH GI als Referenzschweißung ohne Vorwärmung und für das Schweißen mit 600°C Vorwärmung an ausgewählten Proben vergleichend dargestellt.

Für die dargestellten Querschliffe zeigt die Referenzschweißung ohne Vorwärmung einen vergleichsweise homogenen Nahtverlauf mit geringem Nahteinfall. Die Verbindung mit 600°C Vorwärmung zeigt ebenfalls einen vergleichsweise homogenen Nahtverlauf auf. Im Vergleich zur Referenzschweißung ohne Vorwärmung wird hier eine um etwa 30 % verbreiterte Schmelzzone ermittelt. Der durch die Vorwärmung thermisch beeinflusste Bereich sowie die aus dem Schweißprozess resultierende Wärmeeinflusszone sind bei der vorgewärmten Probe im Vergleich zur Referenzschweißung erwartungsgemäß wesentlich verbreitert.

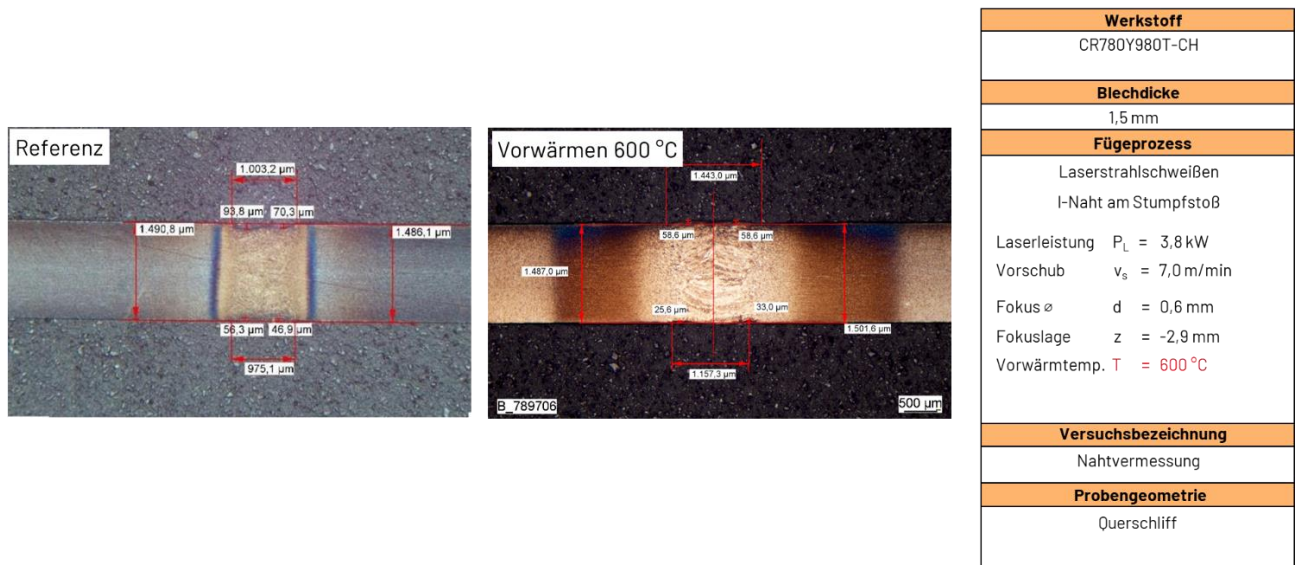
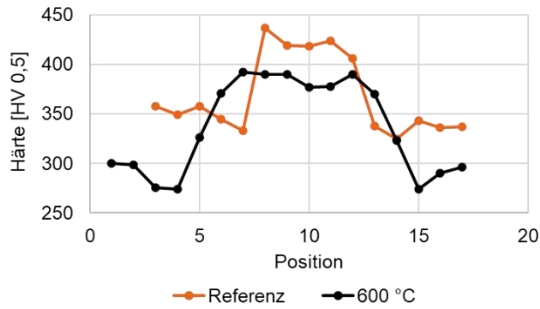
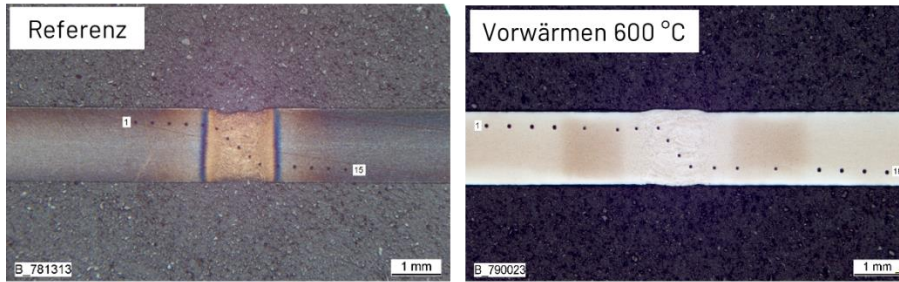


Abbildung 27: Querschliffe mit Nahtvermessung, Referenzprobe ohne Vorwärmung und 600°C vorgewärmte Probe

In Abbildung 28 sind für die ausgewählten Proben Querschliffe und zugehörige Härteverläufe der Laserstrahlschweißverbindungen am Stumpfstoß für die artgleiche Verbindung CR780Y980T-CH GI als Referenzschweißung ohne Vorwärmung und für das Schweißen mit 600°C Vorwärmung gezeigt.

Innerhalb der Gussstruktur des Schweißgutes werden bei der Referenzschweißung ohne Vorwärmung im Härteverlauf gegenüber dem Grundwerkstoff höhere Härtewerte von mehr als 425 HV 0,5 gegenüber der Grundwerkstoffhärte von ca. 350 HV 0,5 des CR780Y980T-CH GI gemessen. Ausgehend von der Grundwerkstoffhärte sinkt die Härte in den Wärmeeinflusszonen bis auf Werte von ca. 330 HV0,5.



Werkstoff
CR780Y980T-CH
Blechedicke
1,5 mm
Fügeprozess
Laserstrahlschweißen I-Naht am Stumpfstoß
Laserleistung $P_L = 3,8 \text{ kW}$
Vorschub $v_s = 7,0 \text{ m/min}$
Fokus \varnothing $d = 0,6 \text{ mm}$
Fokuslage $z = -2,9 \text{ mm}$
Vorwärmtemp. $T = 600 \text{ °C}$
Versuchsbezeichnung
Härteverlauf
Probengeometrie
Querschliff

Abbildung 28: Querschliffe und zugehörige Härteverläufe, Referenzprobe ohne Vorwärmung und 600°C vorgewärmte Probe

Für die Schweißung mit 600°C Vorwärmung werden durch Anlasseffekte im Grundwerkstoff im Vergleich zur Referenzschweißung geringere Härtewerte von ca. 300 HV 0,5 gemessen. Hier sinkt die Härte in den Wärmeeinflusszonen davon ausgehend auf Werte von 275 HV 0,5 ab.

Ein Härteabfall in den Wärmeeinflusszonen ist beim Schweißen von Stählen in der Festigkeitsklasse 1000 MPa bei Dual- und Komplexphasenstählen durch Anlasseffekte typisch und daher häufig vorhanden und kann bei der späteren Umformung als Tailor Welded Blank zu einer Schwachstelle im Bauteil führen.

Die Maximalhärte im Schweißgut steigt im Vergleich zur Referenzschweißung nur auf knapp 400 HV 0,5 an. In den Härteverläufen ist deutlich die Verbreiterung der Schmelzzone und die Verbreiterung von thermisch beeinflusstem Bereich sowie der Wärmeeinflusszone der vorgewärmten Probe im Vergleich zur Referenzschweißung erkennbar.

In den zugehörigen Härtemappings in Abbildung 29 wird die zuvor beschriebene Situation noch einmal besonders deutlich.

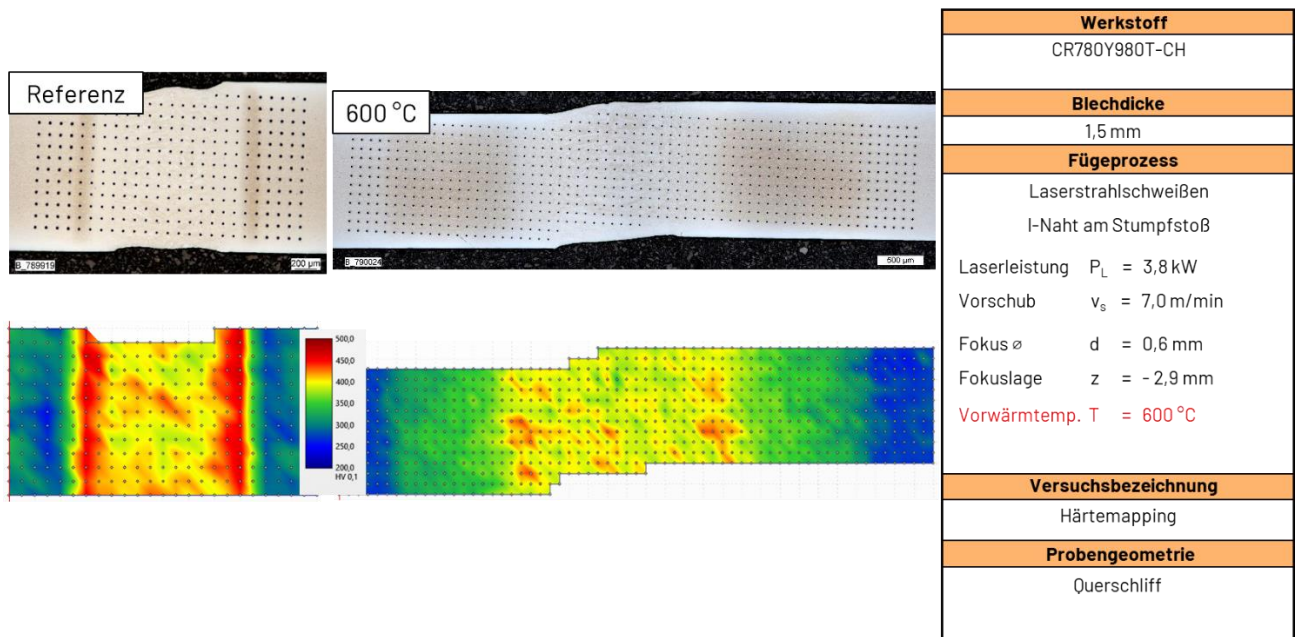


Abbildung 29: Querschliffe und zugehörige Härtemappings, Referenzprobe ohne Vorwärmung und 600°C vorgewärmte Probe

In Abbildung 30 sind ausgewählte Spannungs-Dehnungs-Verläufe (gemittelte Kurven) aus dem quasistatischen Zugversuch für die artgleichen Verbindungen CR780Y980T-CH GI t = 1,5 mm als Referenzschweißung ohne Vorwärmung sowie die mit 600°C Vorwärmung geschweißten Verbindungen aufgetragen.

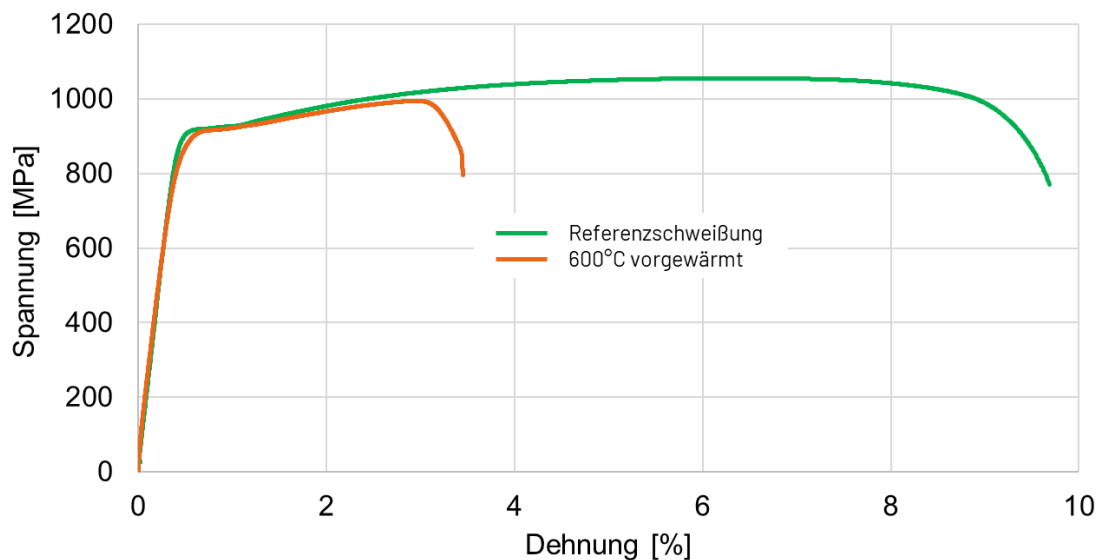


Abbildung 30: Spannungs-Dehnungs-Verläufe aus dem quasistatischen Zugversuch, Referenzprobe ohne Vorwärmung und Probe mit 600°C Vorwärmung

Für die Referenzschweißung ohne Vorwärmung werden grundwerkstofftypische Zugfestigkeiten von ca. 1050 MPa mit Bruchdehnungen von ca. 9,6 % ermittelt. Die Bruchdehnungen fallen bei den geschweißten

Verbindungen im Vergleich zum ungeschweißten Grundwerkstoffen im Mittel um ca. 20 % geringer aus. Dies ist damit zu begründen, dass die verfestigte Fügezone als Teil der Messlänge verformungsmindernd wirkt.

Für die Verbindungen mit 600°C Vorwärmung werden im Vergleich zu den Referenzschweißungen ohne Vorwärmung geringere Zugfestigkeiten von ca. 1000 MPa bei signifikant verringerter Bruchdehnung von nur 3,5 % ermittelt.

In Abbildung 31 sind die Bruchbilder oben beschriebenen Verbindungen dargestellt. Dabei versagen die Verbindungen aus CR780Y980T-CH GI $t = 1,5$ mm für die Referenzschweißung außerhalb der Naht im unbeeinflussten Grundwerkstoff. Demgegenüber wird für die Verbindungen mit 600°C Vorwärmung das Versagen im Bereich der Wärmeeinflusszone festgestellt.

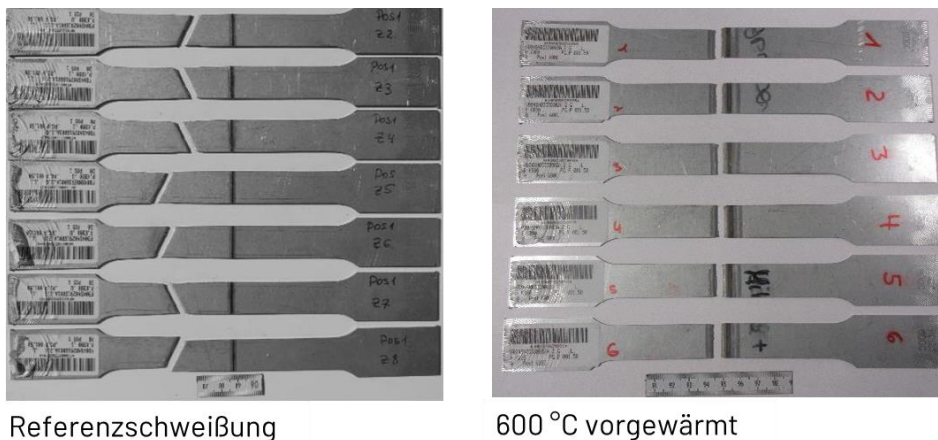


Abbildung 31: Bruchbilder, Referenzprobe ohne Vorwärmung und Probe mit 600°C Vorwärmung

Das auf Grundlage der analytischen Untersuchungen postulierte verbesserte Verformungsverhalten der geschweißten Probekörper in Relation zu den Referenzschweißungen nach Vorwärmen der Naht konnte an den Zugproben nicht bestätigt werden. Das reduzierte Härteprofil der vorgewärmten Proben mit deutlich vergrößerter Wärmeeinflusszone mit wiederum geringeren Härtewerten nach Vorwärmung führt zu einer Reduktion der maximal erreichbaren Spannung und Dehnung bei gleichzeitigem Übergang zu einem Probenversagen in der Lasernaht. Eine Begründung kann in der überwiegend bainitischen Gefügestruktur der Wärmeeinflusszone gesehen werden, die ein vergleichsweise geringes Verformungspotenzial aufweist.

Nachfolgend sind In Abbildung 32 die Nakajima-Proben nach Prüfung als Vollrunde mit Durchmesser 200 mm und solche mit Durchmesser 200 mm und 80 mm breitem Steg exemplarisch für die artgleichen Verbindungen des CR780Y980T-CH GI mit einer Dicke von $t = 1,5$ mm als Referenzschweißung ohne Vorwärmung sowie die mit 600°C Vorwärmung geschweißten Verbindungen dargestellt.

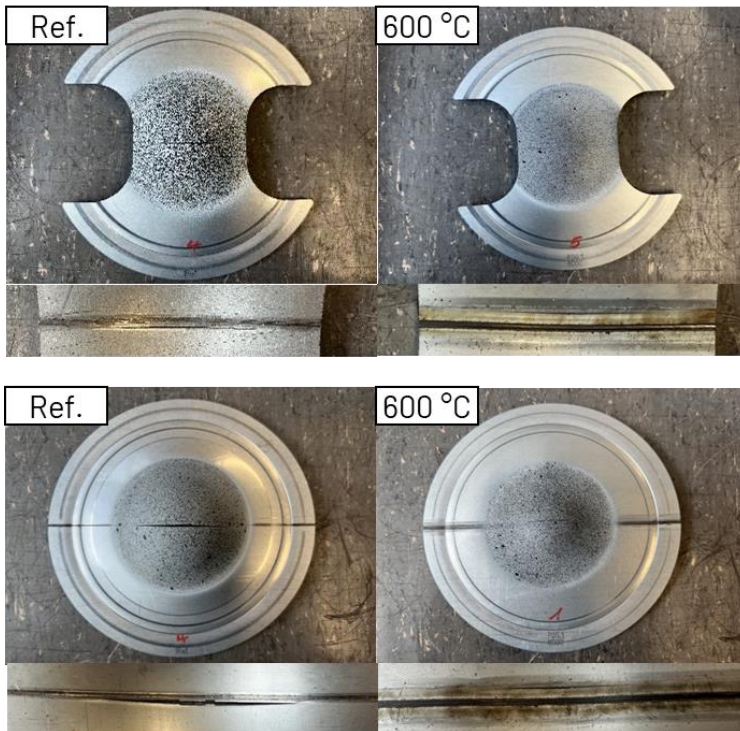


Abbildung 32: Nakajima Proben als Vollrunde mit Durchmesser 200 mm und solche mit Durchmesser 200 mm und 80 mm breiten Steg für die artgleichen Verbindungen CR780Y980T-CH GI t = 1,5 mm als Referenzschweißung ohne Vorwärmung sowie die mit 600°C Vorwärmung geschweißten Verbindungen

Die zugehörigen Kraft-Weg-Verläufe aus dem Nakajima Tiefungsversuch sind in Abbildung 33 aufgetragen.

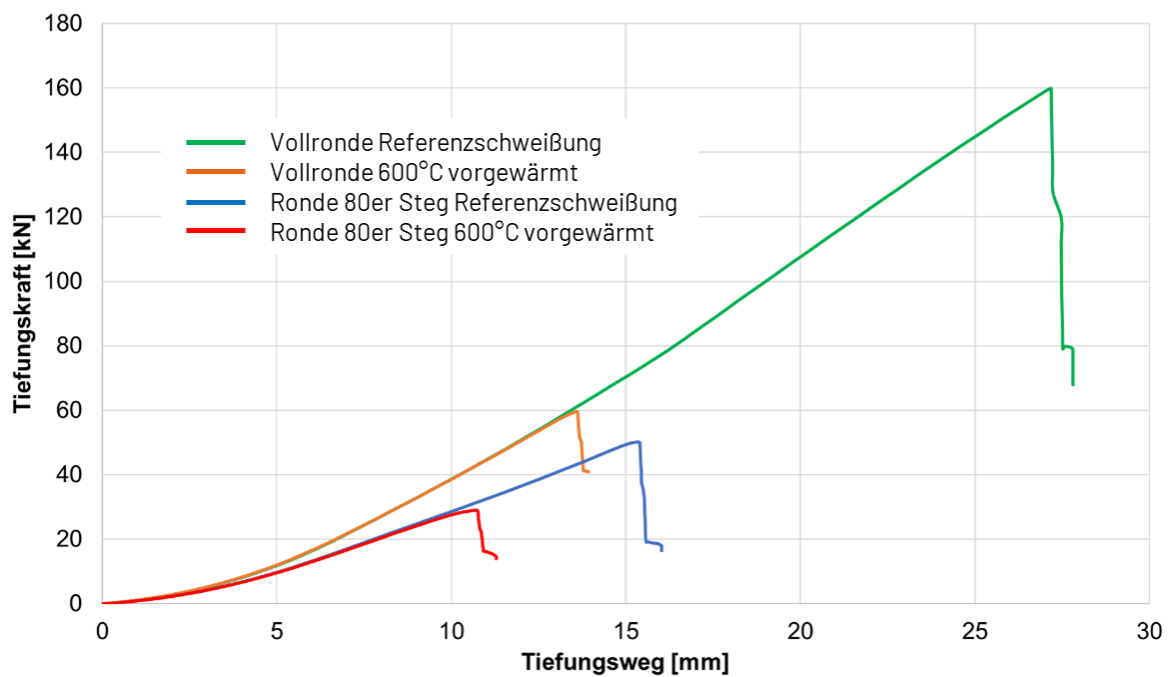


Abbildung 33: Kraft-Weg-Verläufe aus dem Nakajima Tiefungsversuch

Für die Referenzschweißung ohne Vorwärmung werden bei der Vollrunde Maximalkräfte von 160 kN ermittelt mit Verformungswegen von ca. 27 mm. Für die Verbindungen mit 600°C Vorwärmung werden im Vergleich zu den Referenzschweißungen ohne Vorwärmung geringere Maximalkräfte von ca. 60 kN bei signifikant verringertem Verformungsweg von nur 13 mm ermittelt. Für die Referenzschweißung ohne Vorwärmung werden bei der Ronde mit 80 mm breitem Steg Maximalkräfte von ca. 50 kN ermittelt mit Verformungswegen von ca. 16 mm. Für die Verbindungen mit 600°C Vorwärmung werden bei den Ronden mit 80 mm breitem Steg im Vergleich zu den Referenzschweißungen ohne Vorwärmung geringere Maximalkräfte von ca. 24 kN bei einem dem gegenüber verringertem Verformungsweg von nur 11 mm ermittelt.

Die Ergebnisse der Nakajima-Versuche bestätigen die bereits diskutierten Ergebnisse aus dem Zugversuch

In Abbildung 34 und Abbildung 35 sind die lokalen Dehnungen für verschiedene Tiefungswege aus dem Nakajima Tiefungsversuch dargestellt.

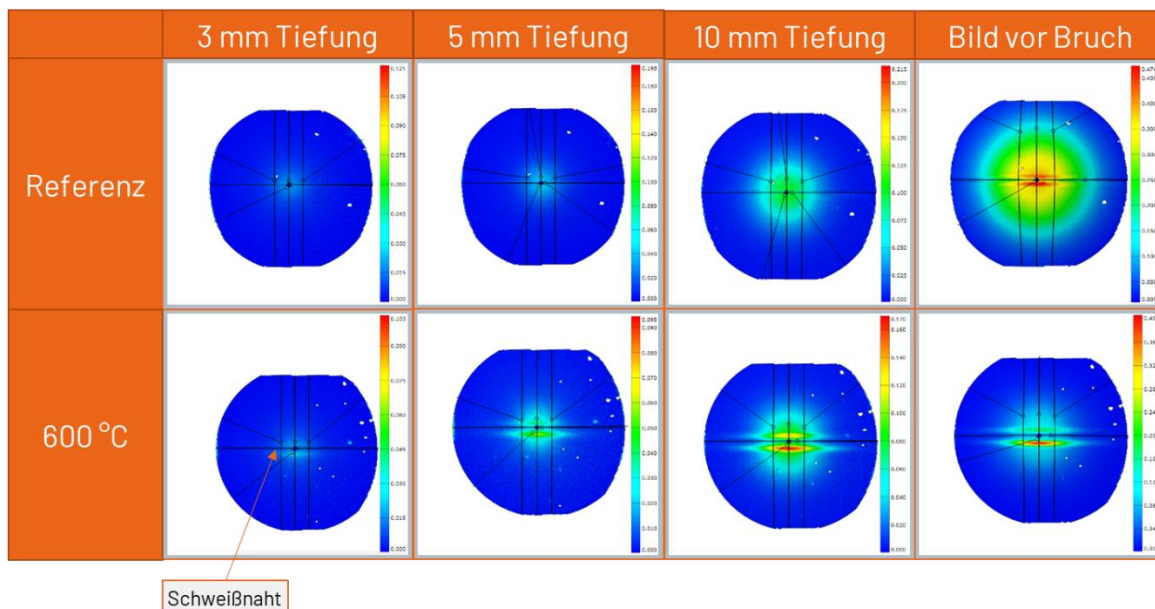


Abbildung 34: Lokale Dehnungen für verschiedene Tiefungswege aus dem Nakajima Tiefungsversuch (Vollrunde)

Für die Referenzschweißung ohne Vorwärmung werden bei der Vollrunde mit zunehmendem Tiefungsweg höhere lokale Verformungen im Bereich des Stempels gemessen. Diese sind kreisförmig homogen verteilt. Erst bei einem Tiefungsweg von ca. 27 mm (vgl. Abbildung 34) werden lokale Dehnungsspitzen um die Region der Schweißnaht gesehen. An einer dieser Dehnungsspitzen kommt es zur Rissinitiation.

Im Vergleich zu den Referenzschweißungen ohne Vorwärmung werden für die Verbindungen mit 600°C Vorwärmung lokale Dehnungsspitzen mit anschließender Rissinitiation bereits bei deutlich geringeren Tiefungswerten festgestellt (vgl. Abbildung 35).

Ähnliche Verhältnisse werden bei der Prüfung bei den Ronden mit 80 mm breitem Steg gesehen (Abbildung 35).

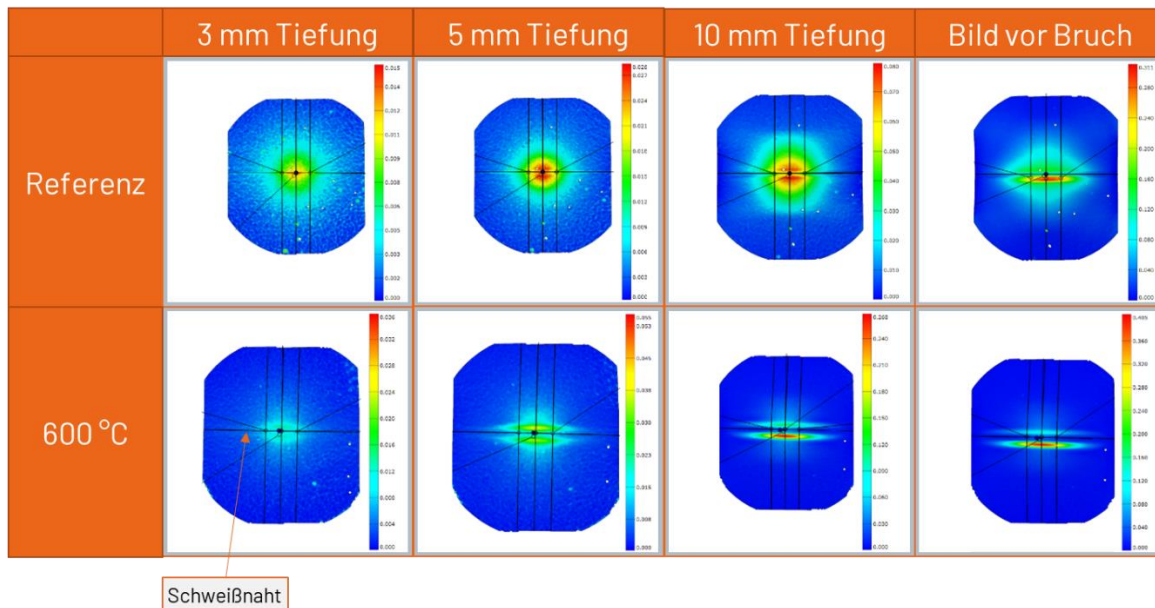


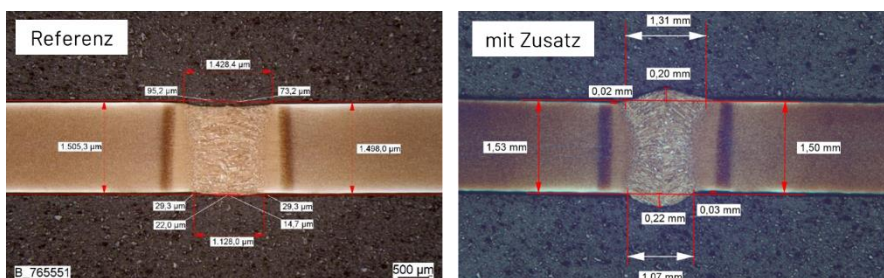
Abbildung 35: Lokale Dehnungen für verschiedene Tiefungswege aus dem Nakajima Tiefungsversuch Ronde mit 80-er Steg

Als Fazit kann festgehalten werden, dass auf Basis der metallographischen Analyse Ansätze für eine Verbesserung des Umformverhaltens für die Prozessoptimierung durch induktives Vorwärmen abzuleiten sind. In weiterführenden mechanischen Tests konnte dies jedoch nicht bestätigt werden. Die resultierenden mechanischen Kennwerte sind gegenüber den Referenzschweißung signifikant reduziert.

Angepasster Schweißzusatz

In Abbildung 36 sind die Querschliffe mit Nahtvermessung für die artgleiche Verbindung CR780Y980T-CH GI als Referenzschweißung ohne Zusatz und für das Schweißen mit Zusatzdraht dargestellt.

Artgleiche Verbindungen



- Artgleiche Verbindungen Referenz mit homogenem Nahtverlauf und geringem Nahteinfall
- Artgleiche Verbindungen mit Zusatz mit Nahtüberhöhungen außerhalb der Norm

Werkstoff	CR780Y980T-CH
Blechdicke	1,5 mm
Fügeprozess	LBW I-Naht am Stumpfstoß mit Zusatzdraht: Union NiMoCr, Ø 1,0 mm Laserleistung $P_L = 4,9(4,8)$ kW Vorschub $v_s = 7,0(6,5)$ m/min Drahtvorschub $v_D = 4,0$ m/min Fokus \varnothing $d = 0,6$ mm Fokusbauart $z = -2,9(-1,0)$ mm Y-Position $Y = 0,01$ mm Anpassung gegenüber Referenz
Versuchsbezeichnung	Nahtvermessung
Probengeometrie	Querschliff

Abbildung 36: Querschliffe mit Nahtvermessung, Referenzprobe ohne Zusatz und Probe mit Zusatz

Die Referenzschweißung ohne Zusatz zeigt einen homogenen Nahtverlauf mit geringem Nahteinfall. Die Verbindung, mit Zusatzdraht geschweißt, ist durch die erwartbare Nahtüberhöhung gekennzeichnet, die außerhalb der typischen Toleranz von 10 % der Blechdicke liegt. Dies ist für einen nachfolgenden Umformvorgang als kritisch zu bewerten.

In Abbildung 37 sind Querschliffe und zugehörige Härteverläufe von Laserstrahlschweißverbindungen am Stumpfstoß für die artgleiche Verbindung des CR780Y980T-CH GI als Referenzschweißung ohne Zusatz und für die mit Zusatzdraht geschweißte Verbindung aufgezeigt.

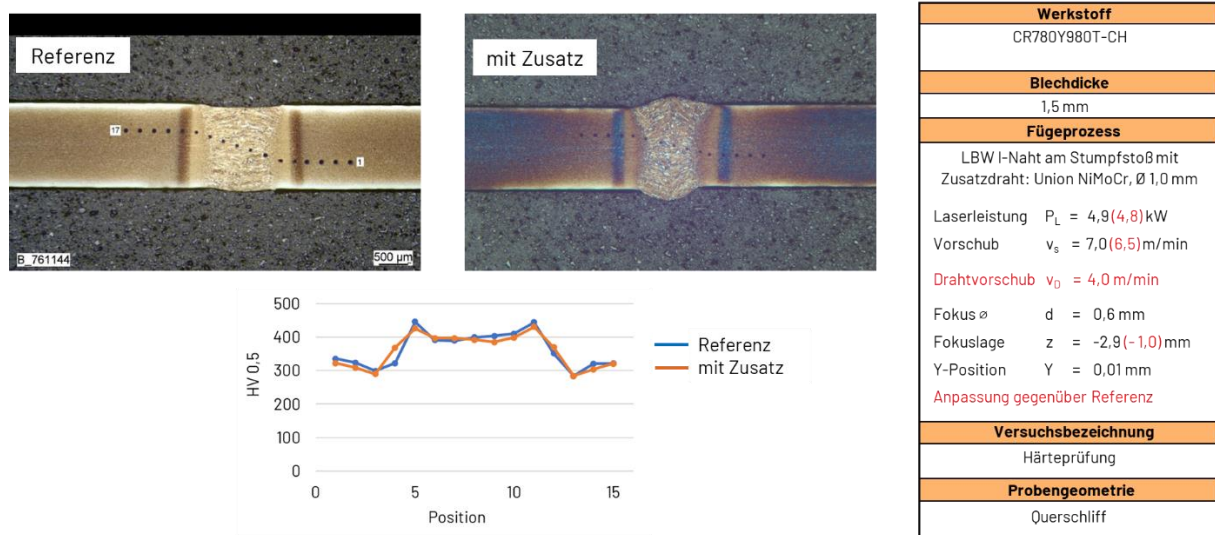
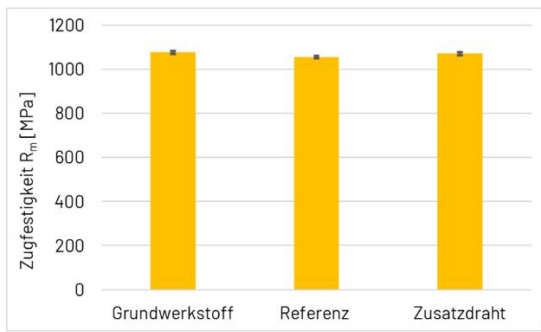


Abbildung 37: Querschliffe und zugehörige Härteverläufe, Referenzprobe ohne Zusatz und Probe mit Zusatz

Innerhalb der Gussstruktur des Schweißgutes werden bei beiden Werkstoffzuständen, geschweißt mit und ohne (hier als Referenz bezeichnet), im Härteverlauf gegenüber dem Grundwerkstoff höhere Härtewerte von 450 HV 0,5 gegenüber der Grundwerkstoffhärte von ca. 340 HV 0,5 beim CR780Y980T-CH GI gemessen. Ausgehend von der Grundwerkstoffhärte sinkt die Härte für beide Werkstoffzustände in den Wärmeeinflusszonen ein wenig ab bis auf Werte von ca. 300 HV0,5. An den Schmelzlinien werden dann Härtespitzen mit Härtewerten von knapp 450 HV 0,5 gemessen. Eine wesentliche Veränderung / Verringerung der Aufhärtung im Bereich der Fügezone bei der Verwendung des Zusatzes gegenüber der Referenzverbindung ohne Zusatz wurde hierbei nicht erreicht.

In Abbildung 38 sind die Zugfestigkeiten aus dem quasistatischen Zugversuch für den Grundwerkstoff CR780Y980T-CH GI $t = 1,5$ mm sowie die artgleichen Verbindungen ohne (Referenz) und mit Zusatzdraht aufgetragen. Für die geschweißten Verbindungen werden für beide Werkstoffzustände jeweils ähnliche Zugfestigkeiten mit gering Streuungen im Vergleich zum Grundwerkstoff ermittelt.

Die Verbindungen des CR780Y980T-CH GI $t = 1,5$ mm versagen für beide Werkstoffzustände außerhalb der Naht im unbeeinflussten Grundwerkstoff.

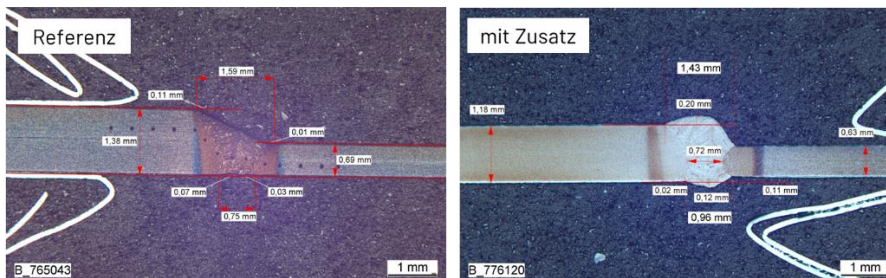


Werkstoff
CR780Y980T-CH
Blechedicke
1,5 mm
Fügeprozess
LBW I-Naht am Stumpfstoß mit Zusatzdraht: Union NiMoCr, \varnothing 1,0 mm
Laserleistung $P_L = 4,9(4,8)$ kW
Vorschub $v_s = 7,0(6,5)$ m/min
Drahtvorschub $v_D = 4,0$ m/min
Fokus \varnothing $d = 0,6$ mm
Fokuslage $z = -2,9(-1,0)$ mm
Y-Position $Y = 0,01$ mm
Anpassung gegenüber Referenz
Versuchsbezeichnung
Zugprüfung

Abbildung 38: Zugfestigkeiten Grundwerkstoff: 1. Säule von links, und geschweißte Verbindung: 2. und 3. Säule von links sowie Bruchbilder der geschweißten Verbindungen

In Abbildung 39 sind die Querschliffe mit Nahtvermessung für die Verbindung CR780Y980T-CH GI t = 1,2 mm an CR440Y780T-DP GI t = 0,7 mm als Referenzschweißung ohne Zusatz und für das Schweißen mit Zusatzdraht dargestellt.

Verbindung mit Dickensprung



- Verbindung mit Dickensprung Referenz mit homogenem Nahtübergang
- Verbindung mit Dickensprung mit Zusatz mit Nahtüberhöhungen außerhalb der Norm

Werkstoff
CR780Y980T-CH t = 1,2 mm CR440Y780T-DP t = 0,7 mm
Blechedicke
siehe oben
Fügeprozess
LBW I-Naht am Stumpfstoß mit Zusatzdraht: Union NiMoCr, \varnothing 1,0 mm
Laserleistung $P_L = 3,6(3,0)$ kW
Vorschub $v_s = 7,0(7,5)$ m/min
Drahtvorschub $v_D = 5,0$ m/min
Fokus \varnothing $d = 0,6$ mm
Fokuslage $z = -2,9(0,2)$ mm
Y-Position $Y = 0,01(0,1)$ mm
Anpassung gegenüber Referenz
Versuchsbezeichnung
Nahtvermessung
Probengeometrie
Querschliff

Abbildung 39: Querschliffe mit Nahtvermessung, Verbindung mit Dickensprung, Referenzprobe ohne Zusatz und Probe mit Zusatz

Die Referenzschweißung mit Dickensprung ohne Zusatz ist auf der Nahtoberseite durch einen stetigen Nahtverlauf ohne innere und äußere Nahtfehler vom dicken zum dünnen Fügepartner gekennzeichnet. Die Verbindung, mit Zusatzdraht geschweißt, ist analog zu den bereits gezeigten Ergebnissen mit Zusatzdraht auch bei der Verbindung mit Dickensprung durch eine außerhalb typischer Grenzen liegende Nahtüberhöhung gekennzeichnet und einen entsprechend schroffen Übergang vom dicken zum dünnen Fügepartner aufweisen. Dies ist auch für eine Verbindung mit Dickensprung für einen nachfolgenden Umformvorgang als eher kritisch zu bewerten.

In Abbildung 40 sind die Querschliffe und zugehörige Härteverläufe für die Verbindung CR780Y980T-CH GI t = 1,2 mm an CR440Y780T-DP GI t = 0,7 mm als Referenzschweißung ohne Zusatz und für das Schweißen mit Zusatzdraht dargestellt.

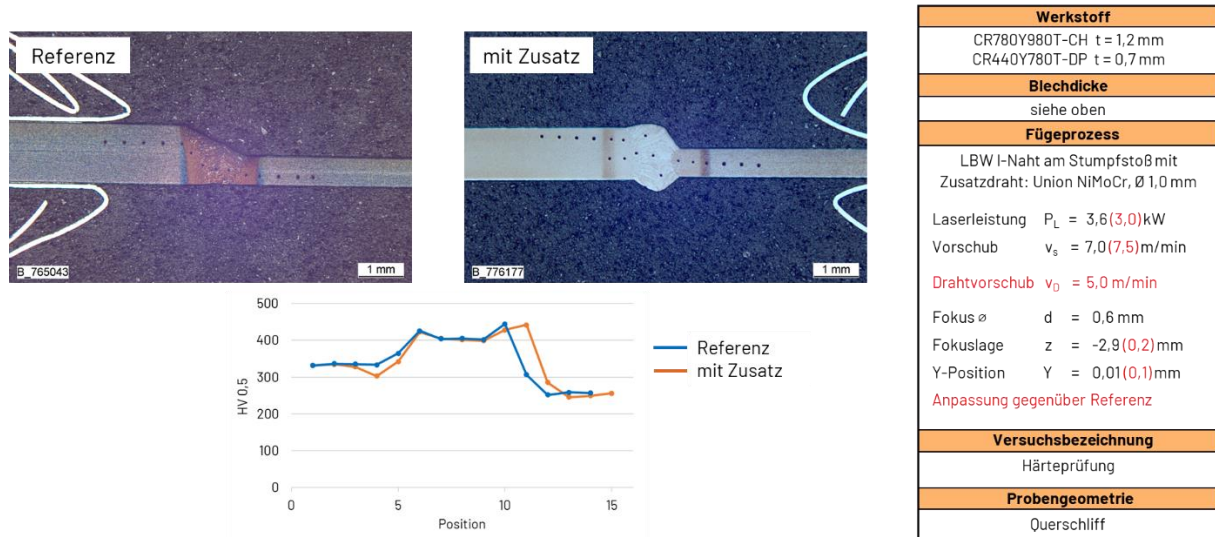


Abbildung 40: Querschliffe und zugehörige Härteverläufe, Verbindung mit Dickensprung, Referenzprobe ohne Zusatz und Probe mit Zusatz

Bei der Verbindung CR780Y980T-CH GI t = 1,2 mm an CR440Y780T-DP GI t = 0,7 mm werden bei beiden Werkstoffzuständen innerhalb der Gussstruktur des Schweißgutes im Härteverlauf gegenüber dem Grundwerkstoff höhere Härteverläufe von ca. 400 HV 0,5 gegenüber der Grundwerkstoffhärte von ca. 340 HV 0,5 beim CR780Y980T-CH GI und von ca. 250 HV 0,5 beim CR440Y780T-DP GI gemessen. Ausgehend von der Grundwerkstoffhärte sinkt die Härte beim CR780Y980T-CH GI hin zur Wärmeeinflusszone ein wenig ab bis auf Werte von ca. 320 HV0,5. An den Schmelzlinien werden dann Härtespitzen mit Härteverläufen von bis zu 450 HV 0,5 gemessen.

Bei der Verbindung, geschweißt mit Zusatzdraht wird im Vergleich zur Referenzschweißung ohne Zusatz, in der Wärmeeinflusszone seitens des CR780Y980T-CH GI t = 1,2 mm ein Härteabfall von 50 HV 0,5 gegenüber der Grundwerkstoffhärte gemessen.

In Abbildung 41 sind die Zugfestigkeiten aus dem quasistatischen Zugversuch für die Grundwerkstoffe CR780Y980T-CH GI t = 1,2 mm und CR440Y780T-DP GI t = 0,7 mm sowie der Verbindungen aus CR780Y980T-CH GI t = 1,2 mm an CR440Y780T-DP GI t = 0,7 mm als Referenzschweißung ohne Zusatz und für das Schweißen mit Zusatzdraht aufgetragen.

Für die geschweißten Verbindungen werden dabei für beide Werkstoffzustände jeweils ähnliche Zugfestigkeiten erreicht. Diese entsprechen denen des dünneren Fügepartners CR440Y780T-DP GI t = 0,7 mm.

Alle Proben mit Dickensprung versagen außerhalb der Naht im unbeeinflussten Grundwerkstoff des CR440Y780T-DP GI t = 0,7 mm.

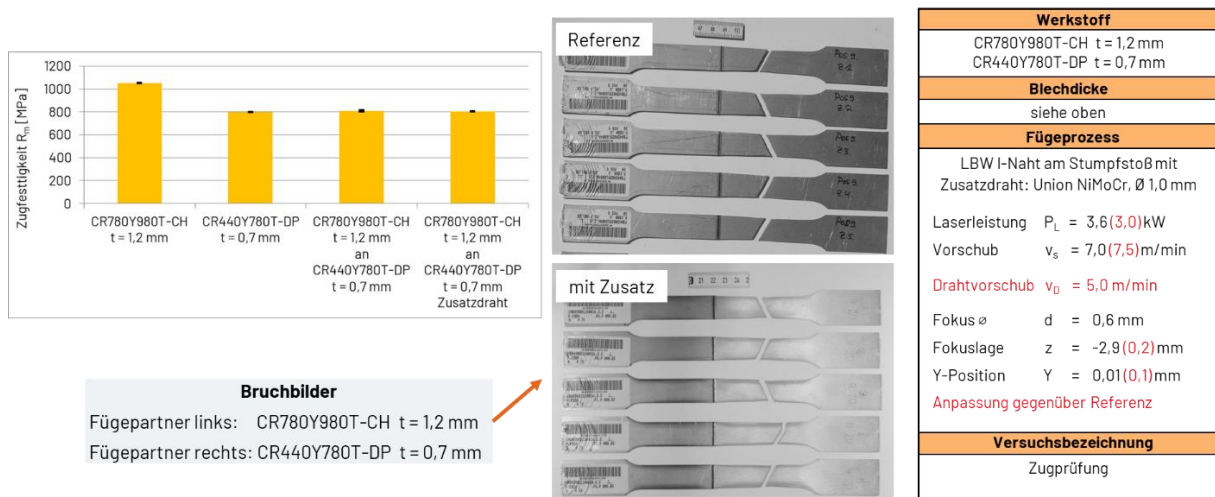


Abbildung 41: Zugfestigkeiten Grundwerkstoff: 1. und 2. Säule von links, und geschweißte Verbindung: 3. und 4. Säule von links sowie Bruchbilder der geschweißten Verbindungen mit Dickensprung

Als Fazit für das Schweißen mit Drahtzusatz kann festgehalten werden, dass zum Einen eine vergleichsweise hohe Nahtüberhöhung für einen Umformprozess nicht zuträglich ist und zum Anderen das Härteprofil durch Verwendung von Schweißzusatz im Vergleich zur Referenzschweißung ohne Zusatz nicht wesentlich verändert ist. Ein verbessertes Umformverhalten ist nicht zu erwarten. Weitere Versuche mit einem weicheren Zusatz führten zu einem selbigen Ergebnis.

Modifizierte Strahlform

In Abbildung 42 sind die Querschliffe mit Nahtvermessung exemplarisch für die artgleiche Verbindung des CR780Y980T-CH in t = 1,5 mm als Referenzschweißung ohne Strahlpendeln und für das Schweißen mit Strahlpendeln quer zur Vorschubrichtung vergleichend dargestellt. Ebenso sind die zugehörigen Schweißparameter sowie Einstellungen der modifizierten Strahlform dargestellt.

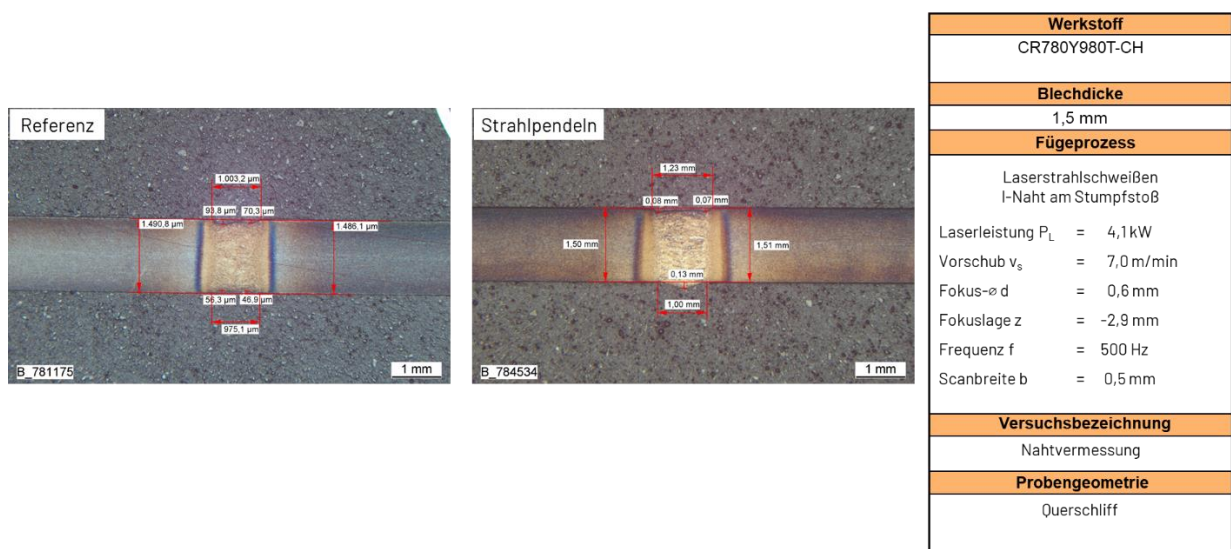


Abbildung 42: Querschliffe mit Nahtvermessung, Referenzprobe ohne Strahlpendeln und Probe mit Strahlpendeln

Die Referenzschweißung ohne Strahlpendeln sowie die Verbindungen mit Strahlpendeln zeigen einen homogenen Nahtverlauf mit geringem Nahteinfall auf. Im Vergleich zur Referenzschweißung ohne Strahlpendeln wird hier eine um knapp 20 % verbreiterte Schmelzzone ermittelt. Die Wärmeeinflusszone ist bei der Probe mit Strahlpendeln im Vergleich zur Referenzschweißung leicht verbreitert. Grund hierfür ist der vergleichsweise hohe Wärmeeintrag durch das Strahlpendeln in Verbindung mit der Scanbreite ($b = 0,5 \text{ mm}$) im Vergleich zur Referenzschweißung.

In Abbildung 43 sind die Querschliffe der zugehörigen Härteverläufe an ausgewählten Proben für die artgleiche Verbindung des CR780Y980T-CH in $t = 1,5 \text{ mm}$ als Referenzschweißung ohne Strahlpendeln und für das Schweißen mit Strahlpendeln quer zur Vorschubrichtung vergleichend dargestellt.

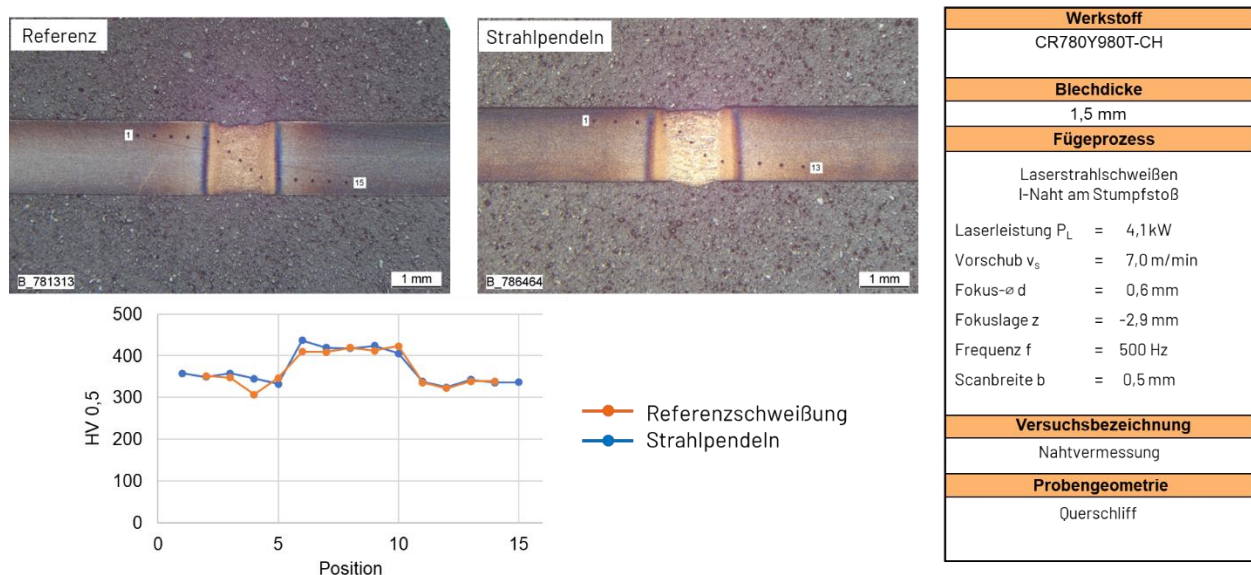


Abbildung 43: Querschliffe und zugehörige Härteverläufe, Referenzprobe ohne Strahlpendeln und Probe mit Strahlpendeln

Innerhalb der Gussstruktur des Schweißgutes werden beim Referenzprozess ohne Strahlpendeln sowie beim Prozess mit Strahlpendeln im Härteverlauf gegenüber dem Grundwerkstoff höhere Härtewerte von 430 HV 0,5 gegenüber der Grundwerkstoffhärte von ca. 350 HV 0,5 gemessen. Ausgehend von der Grundwerkstoffhärte sinkt die Härte bei diesen beiden Werkstoffzuständen in den Wärmeeinflusszonen auf Werte von ca. 300 HV 0,5. An den Schmelzlinien werden bei diesen beiden Werkstoffzuständen kaum Härtespitzen gemessen. Ein mögliches Potential zur Verbesserung der Umformeigenschaften von geschweißten Probekörpern ist auf Basis der dargestellten Ergebnisse nicht zu vermuten.

Als Fazit der bei SZMF durchgeführten Untersuchungen zum Arbeitspaket Optimierte Schweißversuche kann festgehalten werden, dass auf Basis der metallographischen Analysen und Härteprüfungen einzig durch den Ansatz der Prozessoptimierung mittels induktiven Vorwärmens über die Erhöhung der Abkühlzeiten eine daraus anzunehmende Verbesserung des Umformverhaltens postuliert werden konnte. In weiterführenden mechanischen Tests konnte diese Annahme jedoch nicht bestätigt werden.

Darüber hinaus waren ursprünglich vorgesehen Versuche mit modifizierter Strahlform zum Faser-in-Ringfaser-Konzept zusammen mit IPK durchzuführen.

Beim IPK wurden parallel Schweißsimulationen für die thermische Nahtvorbehandlung, das Niedrig-Energieschweißen durch Reduktion der Streckenenergie und für den Einsatz einer modifizierten Strahlform (Faser-in-Ringfaser-Konzept) durchgeführt. Die Simulationsergebnisse zeigen ebenfalls, dass eine signifikante Erhöhung der Abkühlzeiten und somit eine Homogenisierung des Härteprofils im Bereich der Fügezone nur für die Prozessoptimierung durch induktives Vorwärmen abzuleiten sind.

Die Simulationsergebnisse zur Prozessoptimierung mit modifizierter Strahlform (Faser-in-Ringfaser-Konzept) belegen eindeutig, dass durch die modifizierte Strahlform kein signifikanter Unterschied in den Abkühlzeiten und dem damit korrelierenden Härteprofil relativ zu den Referenzschweißungen zu erreichen ist. Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Simulation ist auch für den realen Versuch nicht von einer signifikanten Verbesserung der Verbindungseigenschaften durch den Einsatz des Faser-in-Ringfaser-Konzeptes auszugehen.

AP 5.1: Bewertung des Lebenszyklus

Bei SZEP wurden die spezifischen CO₂ Emissionen, bezogen auf die Herstellung von 1 kg Tailor Welded Blank (TWB), ermittelt. Darin enthalten sind die direkten Emissionen von SZFG und SZEP sowie die Emissionen, die bei der Herstellung der Rohstoffe freigesetzt werden (Eisenerz, Kohle, Legierungsmittel...). Den Hauptanteil an der CO₂-Emission der TWB hat dabei der Stahlherstellungsprozess (Hochofen, Kraftwerk, Warmwalzen). Der SZEP-Prozess hat demgegenüber nur einen Anteil von unterhalb 0,2 %. Neben dem Stahlherstellungsprozess hat die Materialeffizienz einen wesentlichen Einfluss auf die gesamte CO₂-Emission, da pro kg TWB ca. 1,11 kg Stahl produziert werden muss. Die Schrottquote bei der Herstellung von TWB beträgt ca. 10,1 % (vgl. Berichte SZEP).

AP 6: Demonstrator => Unterstützung durch SZMF

Die Versuchswerkstoffe für den Demonstrator wurden von SZMF zur Verfügung gestellt. Im Anschluss an die Herstellung der TWB bei SZEP sind mittels Laserstrahlschneiden bei SZMF daraus die entsprechenden Formplatinen hergestellt worden. In Abbildung 44 sind die Formplatinen mit den entsprechenden Werkstoffen und dem resultierenden Prototypenbauteil dargestellt.

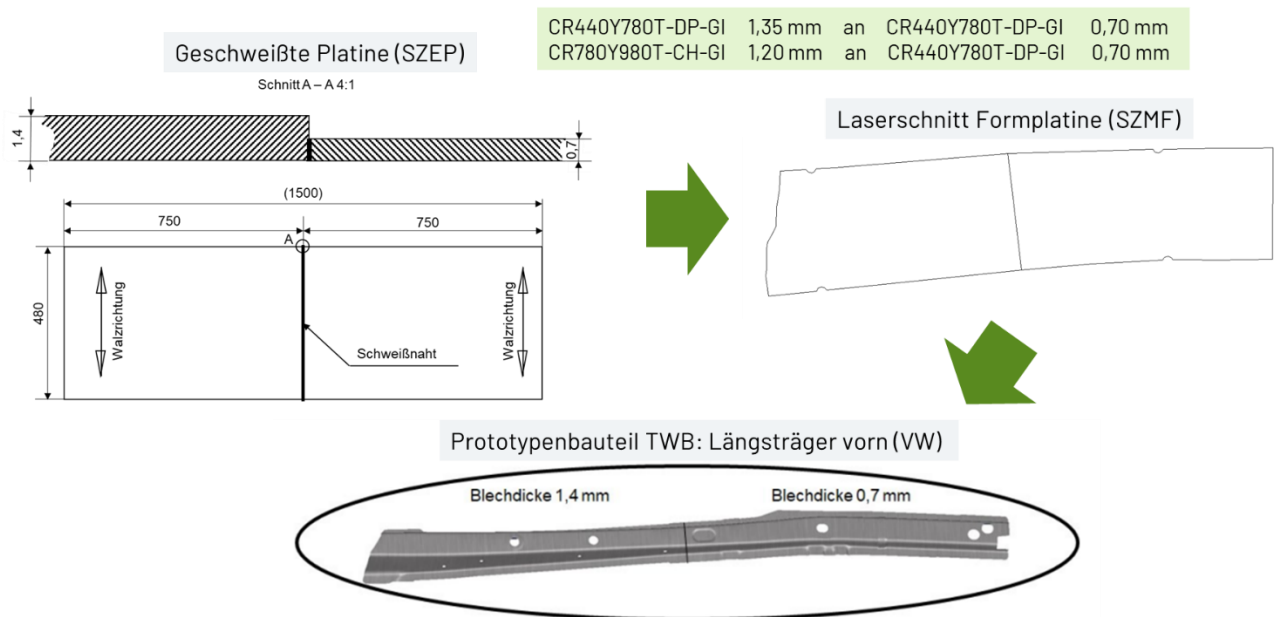


Abbildung 44: Skizze der Prozessroute des Demonstrators

Abbildung 45 zeigt die Schlibfbilder der Verbindung CR440Y780T-DP mit $t = 1,35$ mm an CR440Y780T-DP mit $t = 0,7$ mm . Es ist ein homogener Nahtverlauf vom dickeren zum dünneren Fügepartner zu erkennen.

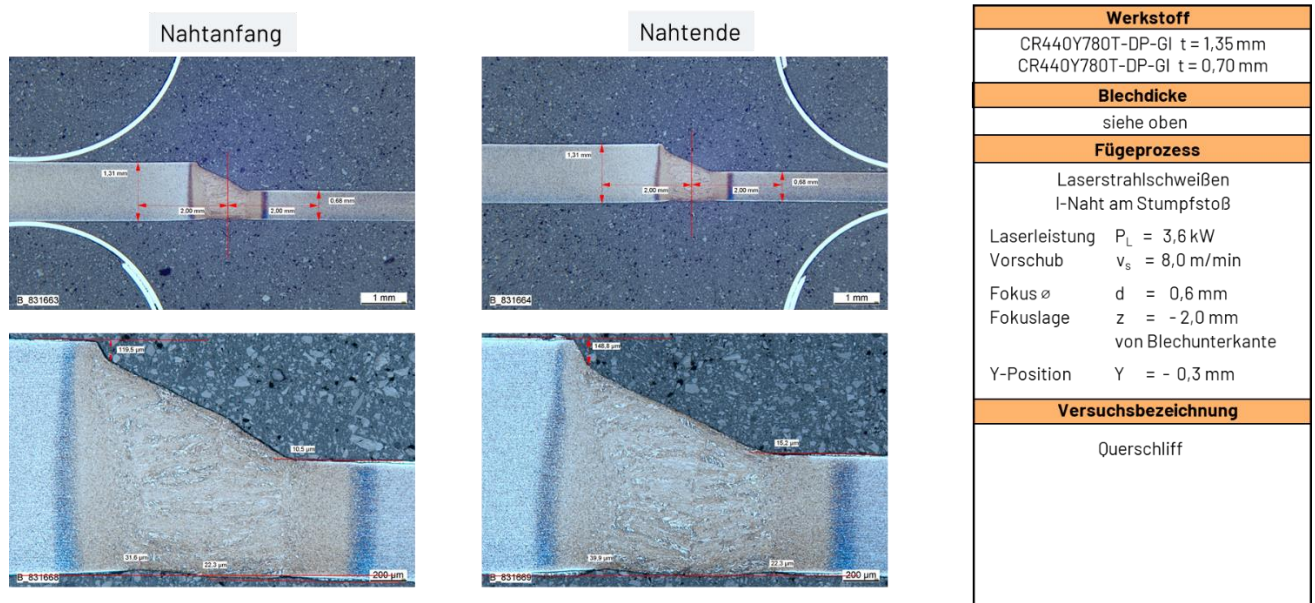


Abbildung 45: Schlibfbilder der Verbindung CR440Y780T-DP $t = 1,35$ mm an CR440Y780T-DP $t = 0,7$ mm

In Abbildung 46 sind die Schlibfbilder der Verbindung CR780Y980T-CH mit $t = 1,2$ mm an CR440Y780T-DP mit $t = 0,7$ mm dargestellt. Auch bei dieser Verbindung ist ein homogener Nahtverlauf vom dickeren zum dünneren Fügepartner zu erkennen.

2.3 Der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für die Einführung von höchstfesten TWB aus Dual- und Complexphasenstählen mit Festigkeiten bis 1.000 MPa und verbesserten Duktilitätseigenschaften (u.a. DH/CH) in der Serienfertigung wurde ein neues Konstruktionskonzept entwickelt, das dem Konstrukteur lückenlosen Zugriff auf die digitale Prozesskette vom höchstfesten Material ausgehend über das Schweißen und Umformen bis hin zur Auslegung der Komponente für den Anwendungsfall (v. a. Crash) erlaubt. Auf Grund der vielen verschiedenen Akteure sowie der Verknüpfung von Experimental- und Simulationsdaten wurde ein individualisiertes Datenmanagement basierend auf Blockchain-Technologie entwickelt, das die Nachverfolgbarkeit aller Eingangs- und Ausgangsgrößen absichert. Höchstfeste Tailor Welded Blanks im Automobil- und Nutzfahrzeugbau dienen als Beispiel, da die zur Auslegung benötigte Prozesskette aus Schweißen und Umformen noch nicht hinreichend erforscht ist und so das Potential zur Materialreduktion unter Einsatz der neuesten Stahlwerkstoffe bisher nicht ausgeschöpft wurde.

2.4 Des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Mit Ausweitung der industriellen Nutzung von stahlbasierten Bauteilen, die mittels Tailor Welded Blank (TWB) Verfahren hergestellt werden, kann sich für die Salzgitter AG (respektive SZEP) ein erweitertes Geschäftsfeld ergeben, das die heute erzeugten Flachstahl-Produkte, hier höchstfeste Stähle, kompatibel für eine Leichtbau-Bauweise mit TWB-Bauteilen macht.

Die vorliegenden Projektergebnisse zeigen, dass Potenzial für gefertigte Bauteile aus TWB mit höchstfesten Stählen vorhanden ist. Die Projektergebnisse aus dem Projekt TWBlock werden bei externen Zulieferern vermarktet, um eine erweiterte Kompetenz der SZMF / SZEP bzgl. des TWB Fertigungsverfahrens mit höchstfesten Stählen aufzuzeigen. Zusätzlich werden die Ergebnisse in entsprechenden Forschungsforen in den nächsten 2 Jahren weiterhin vorgestellt, um die Vernetzung in die Welt der Fertigung von TWB weiter voranzutreiben.

Die erarbeiteten Ergebnisse im Projekt zeigen, dass erfolgreich ein TWB mit einem Fügepartner aus höchstfestem Stahl gefertigt werden konnte, das in seinen Eigenschaften an ein konventionell hergestelltes Halbzeug mit weniger festen Fügepartnern heranreicht. Damit wurde ein Transferschritt erreicht.

2.5 Des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind dem Zuwendungsempfänger keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden. Eine Patentrecherche seitens des Projektkoordinators IPK ergab keine das Vorhaben betreffenden Ergebnisse oder kritische Überschneidungen.

2.6 Der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.

Lemke, J.; Weber, J.; Kompenhans, M.; Hoefemann, M.; Joos, P. (2022): Nachhaltiger im Automobil mit TWB. Kombination aus numerischer Simulation und Blockchain-Technologie erschließt in der Produktion neue Einsparpotentiale von CO₂-Emissionen. In: Stahl+Eisen (Juli 2022), S. 49–53, zuletzt geprüft am 01.07.2022.

Lemke, J.: Hochfester Stahl im Automobilbau - Tailor Welded Blanks, Batteriegehäuse und die Einsparpotentiale. Vortrag, Berlin, August 24, 2022.

Weber, J.; Lemke, J.; Sunderkoetter, C.; Haase, P.; Hoefemann, M.; Joos, P.; Merklein, M. (2022): Recource efficient production of car body parts - implementation of digital twins across process chains. Forming Technology Forum 2022, September 21 & 22, 2022, Enschede, The Netherlands

Josefine Lemke; Joshua Weber; Anastasia Rys; Daniel González Marx; Matthias Höfemann; Paul Joos: Tailor Welded Blanking Digital. Wie die Kombination von numerischen Simulationen anspruchsvolle Fragestellungen löst und dabei Material und Emissionen spart In: Stahl+Eisen (Oktober 2023), S. 43–58.

Lemke, J.; Höfemann, M; Biegler, M; Rethmeier, M.: Process strategies for optimizing the cooling behaviour of laser-welded Tailor Welded Blanks made of advanced high strength steels (AHSS). 13th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2024], 15-19 September 2024, Fürth, Germany