

Untersuchungen zum Einfluss von Kaltdrahtzufuhr und Wärmenachbehandlung beim UP-Schweißen von Duplexstahl

Stützer, J.; Zinke, M.; Jüttner, S.

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Werkstoff- und Fügetechnik (IWF)

Korrespondenzadresse: juliane.stuetzer@ovgu.de

Abstract

Der vorliegende Beitrag informiert über die Möglichkeit der Produktivitätssteigerung beim Unterpulverschweißen des Superduplexstahls X2CrNiMoN25-7-4 (EN 1.4410) infolge einer Kaltdrahtzugabe sowohl beim Standard-Prozess mit einer Drahtelektrode als auch beim Doppeldrahtschweißen. Darüber hinaus wird gezeigt, inwiefern eine Beeinflussung von Gefüge und mechanisch-technologischen Gütewerten durch eine anschließende Wärmenachbehandlung zu erzielen ist.

1 Einleitung

Die hochlegierten Duplexstähle besitzen ein zweiphasiges Gefüge bestehend aus Ferrit und Austenit. Aufgrund ihrer Eigenschaften, bspw. Loch- und Spannungsrisskorrosionsbeständigkeit, hohe Festigkeit und gute Zähigkeit, werden sie in der petro-/chemischen, der Papier-, der Nahrungsmittel- und auch in der Bauindustrie eingesetzt [1]. Duplexstähle erstarren infolge ihrer chemischen Zusammensetzung zunächst primär ferritisch. Während der Abkühlung wandelt ein Teil des Ferrits diffusionsgesteuert in Austenit um. Die bei Raumtemperatur vorliegenden Gefügeanteile sind einerseits von der Menge der ferrit- sowie austenitbildenden Elemente abhängig und andererseits von der Abkühlzeit zwischen 1200 und 800 °C [2]. Das ausgeglichene Ferrit-Austenit-Verhältnis der Grundwerkstoffe wird durch ein Lösungsglühen bei einer Temperatur von 1050 bis 1100 °C und anschließendes Abschrecken in Wasser erzielt [3]. Für spezielle Anwendungen ist auch an Schweißverbindungen eine Wärmenachbehandlung (WB) erforderlich.

Für die Verarbeitung dickwandiger Komponenten aus Duplexstahl mit Blechdicken von mehr als 8 mm wird das Unterpulver-(UP)schweißen häufig eingesetzt. Da Grenzwerte für maximal zulässige Streckenenergien (25Cr-Duplex: $E \leq 15 \text{ kJ/cm}$) eingehalten werden müssen, um die Bildung unerwünschter Ausscheidungen sowie intermetallischer Phasen zu vermeiden [1, 4], ist eine Produktivitätssteigerung über die Erhöhung des Schweißstroms bei diesen Stählen nur begrenzt möglich. Die Verwendung eines zusätzlichen Kaltdrahtes (KD) ermöglicht hingegen eine Steigerung der Abschmelzleistung ohne die Streckenenergie unzulässig zu erhöhen.

2 Werkstoffe und methodisches Vorgehen

Zur Ermittlung der Produktivitätssteigerung erfolgten Verbindungsschweißungen an 15 mm dicken Blechen des Superduplexstahls X2CrNiMoN25-7-4 (EN 1.4410) mit den Verfahrensvarianten UP-Eindraht (UP-ED, Referenz), UP-Eindraht mit Kaltdraht (UP-ED+KD) und UP-Doppeldraht mit Kaltdraht (UP-DD+KD, UP-ICE™-Prozess der Firma ESAB). Die Schweißzusätze vom Typ S 25 9 4 N L wurden als Elektrode sowie als Kaltdraht mit einem Drahtdurchmesser von 2,4 mm eingesetzt. Die chemischen Zusammensetzungen der verwendeten Grund- und Zusatzwerkstoffchargen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Wurzel- und Kapplagen der mit einer V-Naht (40 ° Flankenwinkel und 2 mm Steghöhe) vorbereiteten Bleche wurden zunächst manuell WIG geschweißt. Anschließend wurde die erste UP-Lage als sogenannter Cold Pass mit etwas geringerer Streckenenergie geschweißt, um die Wurzel thermisch nicht zu überlasten. Dementsprechend konnte in der ersten UP-Lage etwas weniger Kaltdraht zugegeben werden als in den weiteren Lagen. Die Schweißparameter der Schweißungen und entsprechende Abschmelzleistungen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Schweißungen erfolgten mit agglomerierten, aluminat-fluorid-basischen Schweißpulvern und einem Kontaktrahabstand von 25 mm. Die UP-ED-Schweißungen wurden dabei mit einer Pulverringschüttung und die UP-DD-Schweißungen mit einer Pulvervorschüttung durchgeführt. Die Pulverschütthöhe betrug 25 mm.

Im Weiteren wurde das Potential einer zusätzlichen Wärmenachbehandlung hinsichtlich einer Verbesserung von Gefüge und mechanisch-technologischen Eigenschaften analysiert. Zur Quantifizierung einer möglichen Steigerung der Nahtqualität wurden Gütewerte von Schweißungen im Schweißzustand und im nachträglich wärmebehandelten Zustand ermittelt und vergleichend gegenübergestellt. Die dafür mit dem UP-ED-Prozess erfolgten Schweißungen wurden bei 1080-1090 °C für 45 min lösungsgeglüht und anschließend in Wasser abgeschreckt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Makroschliffbilder der Schweißungen mit entsprechender Kennzeichnung des Lagenaufbaus sind in Abbildung 1 dargestellt. Zur Nahtfüllung wurden mit dem UP-ED-Prozess sechs UP-Raupen und mit zusätzlicher Kaltdrahtzugabe fünf Raupen benötigt. Mit dem UP-ICE™-Prozess wurden zur vollständigen Füllung der Naht wiederum sechs Raupen benötigt. Die Abschmelzleistung für die UP-ED-Schweißung

ohne Kaltdraht beträgt bei maximaler Streckenenergie 6,4 kg/h. Die Kaltdrahtzufuhr führt bei dieser Prozessvariante bei sonst gleichen Schweißparametern zu einer Erhöhung der Abschmelzleistung auf 8,4 kg/h. Mit dem UP-ICE™-Prozess wurde bei maximaler Streckenenergie eine Abschmelzleistung von 12,6 kg/h erzielt. Bei der UP-ED+KD-Schweißung führte die Erhöhung der Abschmelzleistung insgesamt zur Einsparung einer Schweißraupe. Die erhöhte Abschmelzleistung der UP-ICE™-Schweißung bewirkte hingegen eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit um 70 %, vgl. Tabelle 2.

Die Ergebnisse der Werkstoffprüfungen der Schweißungen sind in Tabelle 3 dargestellt. Auf einer Länge von 500 mm wurden mittels Röntgenprüfung vermehrt einzelne Mikroporen nachgewiesen. Die Porenanzahl der UP-ICE™-Schweißung ist zwar etwas geringer, dafür weisen die einzelnen Poren einen größeren Durchmesser auf, so dass sich die Porenanteile im Vergleich nur unwesentlich unterscheiden. Insgesamt sind die Porenanteile jedoch gering und alle Schweißungen erfüllen die Anforderungen der Bewertungsgruppe B gemäß ISO 5817:2014. Die in der Decklage per Bildanalyse ermittelten Ferritgehalte der UP-ED-Schweißungen sowohl mit als auch ohne Kaltdraht betragen 53 %. Die mit dem UP-ICE™-Prozess gefertigte Schweißung weist einen Ferritanteil von 36 % auf. Dies ist auf die etwas geringeren Chromgehalte sowie etwas höheren Stickstoffgehalte der für diese Schweißung verwendeten Schweißzusätze (Charge PVT025509450) im Vergleich zu den Schweißzusätzen der UP-ED-Schweißungen (Charge 101451) zurückzuführen. Die Ferritanteile aller Schweißungen entsprechen den Forderungen gemäß ISO 17781:2017. Die mit einer Prüftemperatur von –46 °C durchgeführten Kerbschlagbiegeversuche weisen bei Kerblage in der Schweißnahtmitte (VWT) im Mittel Kerbschlagarbeitswerte von 52 J (UP-ED), 61 J (UP-ED + KD) bzw. 60 J (UP-DD + KD) auf. Bei Kerblage in der WEZ (VHT) betragen sie im Mittel 86 J (UP-ED), 96 J (UP-ED + KD) bzw. 96 J (UP-DD + KD). Alle Kerbschlagproben erfüllen damit sowohl die Anforderungen an den Mittelwert als auch an den kleinsten Einzelwert. Allerdings korrelieren sie nicht mit den bildanalytisch ermittelten Ferritanteilen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Ferritanteile ausschließlich in der Decklage bestimmt wurden und somit nicht die Ferritanteile im Bereich der Probenentnahme für die Kerbschlagbiegeversuche repräsentieren. Die an je drei Querschnittproben ermittelten Zugfestigkeiten betragen im Mittel 838 MPa (UP-ED), 831 MPa (UP-ED + KD) bzw. 854 MPa (UP-DD + KD) und entsprechen somit den

Anforderungen gemäß NORSOK M-630:2013. Die Proben sind stets im Grundwerkstoff gerissen. Die gemäß ASTM G48 – Methode A bei einer Standardprüftemperatur von 35 °C an jeweils drei Proben durchgeführten Korrosionsversuche zeigen für keine Verfahrensvariante Lochkorrosion.

Im Schweißzustand weist das Schweißgutgefüge das typische Widmannstättensche Gefüge auf, vgl. Abbildung 2 a). Die ferritische Matrix wird von der austenitischen Phase in spitzer nadliger Form durchzogen. Die ca. 150 µm breite Wärmeeinflusszone (WEZ) weist relativ großflächige Bereiche ferritischer Phase auf. Der Austenit wurde hier vorrangig an den primären Ferritkorngrenzen gebildet. Zusätzlich wurden verhältnismäßig kleine Austenitnadeln innerhalb der Ferritkörner ausgeschieden. Nach erfolgter WB ist die Widmannstättensche Struktur immer noch zu erkennen, jedoch ist die Verteilung der austenitischen Phase wesentlich homogener, vgl. Abbildung 2 b). Der Austenitanteil im Schweißgut hat sichtbar zugenommen und die Austenitnadeln sind weniger spitz. Auch in der WEZ ist die Verteilung der austenitischen Phase in der ferritischen Matrix wesentlich gleichmäßiger.

Die Zunahme des Austenitanteils infolge der WB spiegelt sich in den bildanalytisch ermittelten Ferritanteilen wider, vgl. Abbildung 3. Der Ferritgehalt der WEZ liegt vor der WB an der maximalen Zulässigkeitsgrenze von 70 %. Infolge der WB sinkt dieser auf 52 %. Der Ferritgehalt des Schweißgutes, der vor der WB 53 % betrug, beträgt nach der WB nur noch 39 %. Ebenfalls zeigt sich die Zunahme des Austenitanteils in einer deutlichen Erhöhung der Kerbschlagarbeitswerte, vgl. Abbildung 4. Während jene Proben ohne WB mit Kerblage im Schweißgut die Mindestanforderungen gerade so erfüllen, übertreffen die WB-Proben die Mindestanforderungen weitaus. Noch ausgeprägter zeigt sich die Zunahme der Kerbschlagarbeitswerte der Proben mit Kerblage von 2 mm neben der Schmelzlinie. Diese weisen nach der WB annähernd die Werte des Grundwerkstoffes auf.

Im Schweißgut und in der WEZ kommt es infolge der WB zu einer deutlichen Reduzierung der Härte, vgl. Tabelle 3. Die Minderung der Härte korreliert mit der Abnahme des Ferritanteils und lässt sich mit der geringeren Härte der austenitischen Phase im Vergleich zur ferritischen Phase erklären. Die durchgeführten Zugversuche weisen keine relevante Änderung der Zugfestigkeit der geschweißten Proben infolge der Wärmenachbehandlung auf. Jedoch zeigte sich eine leichte Zunahme der Bruchdehnung.

4 Fazit

Mit jeder der drei UP-Prozessvarianten werden zufriedenstellende Nahtqualitäten erreicht und normative Anforderungen erfüllt.

Die Zugabe eines Kaltdrahtes beim Standard-UP-Prozess führt in Abhängigkeit vom Nahtquerschnitt zur Einsparung von Schweißraupen. Der Vorteil des UP-ICE™-Prozesses liegt hingegen in der sehr viel höheren Schweißgeschwindigkeit, die eine Senkung der Fertigungszeit zur Folge hat und somit eine Steigerung des Durchsatzes ermöglicht.

Eine Wärmenachbehandlung der Schweißnaht ist zum Erreichen der erforderlichen Werkstoffkennwerte nicht zwingend notwendig, da diese mitunter bereits im Schweißzustand erreicht werden. Dennoch können die Eigenschaften des Schweißgutes mittels Wärmenachbehandlung direkt beeinflusst werden. So lassen sich bspw. Härtewerte reduzieren, Ferritgehalte senken und Kerbschlagarbeitswerte erhöhen.

Literatur

- [1] TMR Stainless, Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels, London (GB): International Molybdenum Association (IMOA), 3rd ed., 2014.
- [2] J. C. Lippold und D. J. Kotecki, Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels,, New Jersey: Wiley, 2005.
- [3] Butting, Wärmebehandlung von Duplex-Rohren. Glühen oder nicht?, Perspektiven, 2010.
- [4] L. Karlsson, „Welding Duplex Stainless Steels - A Review Of Current Recommendations,“ *Welding in the World*, Vol. 56, No. 5, pp. 65-76, 2012.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 19.936 B / DVS-Nr. 01.2262 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses sei für ihre wertvolle Unterstützung herzlich gedankt.

Tabellen und Abbildungen

Table 1: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Grund- und Zusatzwerkstoffchargen gemäß Spektralanalyse und Trägergasschmelzextraktion

Material	Charge	Verwendung	Anteil der Hauptelemente in Gew.-%							
			Cr	Ni	Mo	Si	Mn	N	C	Fe
EN 1.4410	562232	Schweißungen ohne WB	25,6	7,3	3,9	0,4	0,9	0,296	0,024	Basis
	592912	Schweißungen mit WB	24,7	6,8	4,0	0,3	0,7	0,296	0,022	Basis
S 25 9 4 N L	101451	UP-Eindraht-Schweißungen	25,4	9,3	4,2	0,4	0,9	0,247	0,026	Basis
	PVT025509450	UP-Doppeldraht-Schweißungen	24,9	9,3	4,1	0,4	0,4	0,260	0,013	Basis

Table 2: Schweißparameter und Abschmelzleistungen in Abhängigkeit der UP-Verfahrensvariante und der geschweißten UP-Raupe

Verfahrensvariante	UP-Raupe	I in A	U in V	v _s in cm/min	E in kJ/cm	v _{KD} in m/min	Kaltdrahtanteil in %	Abschmelzleistung in kg/h
UP-Eindraht	1	300	29	50	10,4	-	-	4,6
	2-6	400	31	50	14,9	-	-	6,4
UP-Eindraht mit Kaltdraht	1	300	29	50	10,4	0,3	12,2	5,3
	2-5	400	31	50	14,9	1,0	25,4	8,4
UP-Doppeldraht mit Kaltdraht	1	520	32	100	10,0	0,5	9,1	11,6
	2-6	620	34	85	14,9	0,8	13,0	12,6

Tabelle 3: Mechanische und technologische Kennwerte der Verbindungsschweißungen sowie normative Anforderungen gemäß ISO 5817:2014, ISO 17781:2017 und NORSOK M-630:2013

	UP-ED	UP-ED mit KD	UP-DD mit KD	UP-ED mit WB	Anforderungen
Porenanteil in %	0,06	0,09	0,08	k. A.	≤ 2
Porenanzahl	35	37	24	k. A.	/
Ferritanteil in %	53	53	36	39	ohne WB: 30-70, mit WB: 35-65
Härte in HV10	MW: 304, MAX: 311	MW: 299, MAX: 308	MW: 309, MAX: 318	MW: 288, MAX: 293	/
Korrosionsrate in g/m ²	0,133	0,091	0,070	0,102	≤ 4
Kerbschlagarbeit in J (VWT 0/2; -46°C)	MW: 52, MIN: 48	MW: 61, MIN: 52	MW: 60, MIN: 59	MW: 78, MIN: 74	MW ≥ 45, EW ≥ 35
Kerbschlagarbeit in J (VHT 2/2; -46°C)	MW: 86, MIN: 83	MW: 96, MIN: 88	MW: 96, MIN: 98	MW: 200, MIN: 164	
Zugfestigkeit in MPa	838	831	854	830	≥ 750
ED – Eindraht, KD – Kaltdraht, DD – Doppeldraht, WB – Wärmenachbehandlung, MW – Mittelwert, EW – Einzelwert, MAX – Maximum, MIN – Minimum					

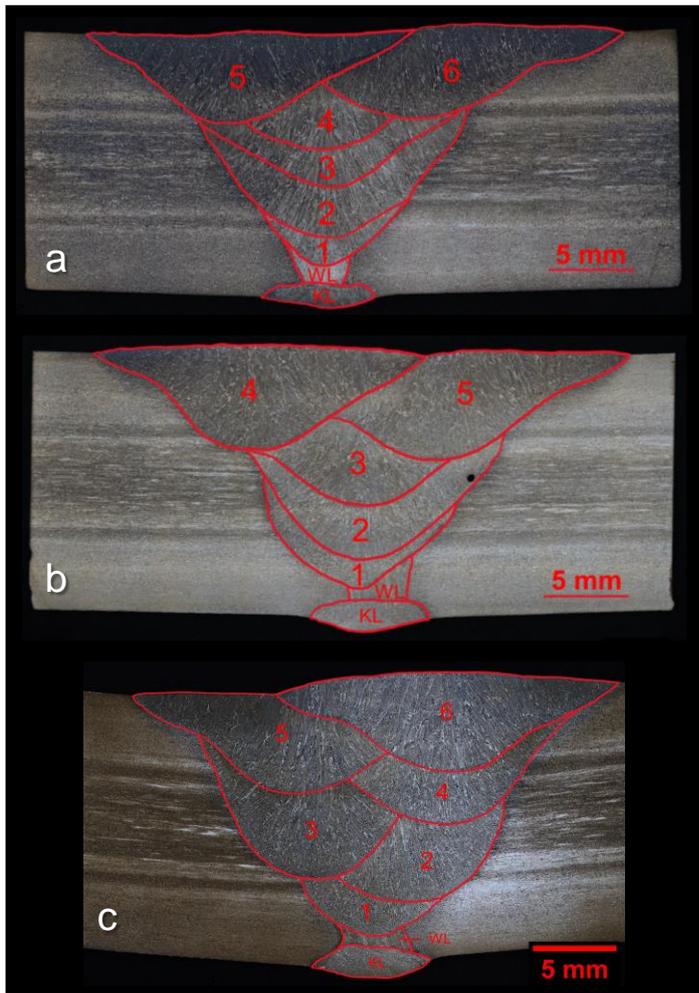


Abbildung 1: Makroschliffbilder der Schweißungen mit Kennzeichnung des Lagenaufbaus, a) UP-Eindraht, b) UP-Eindraht mit Kaltdraht, c) UP-Doppeldraht mit Kaltdraht

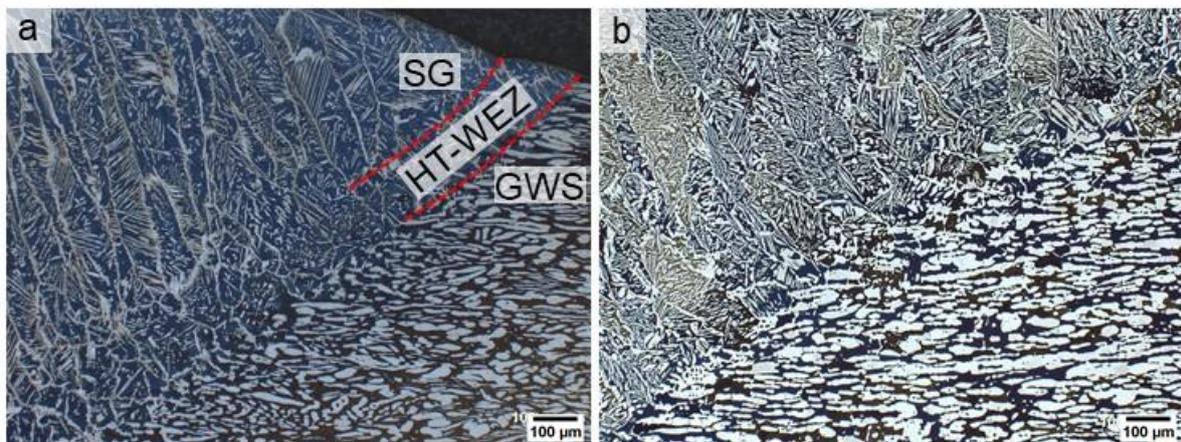


Abbildung 2: Gefügeaufnahmen aus dem Übergangsbereich Schweißgut-Hochtemperatur-Wärmeeinflusszone-Grundwerkstoff am Beispiel der UP-Eindraht-Schweißung, a) Schweißzustand, b) wärmebehandelter Zustand, Ätzung Beraha II, blau/braun: Ferrit, weiß: Austenit

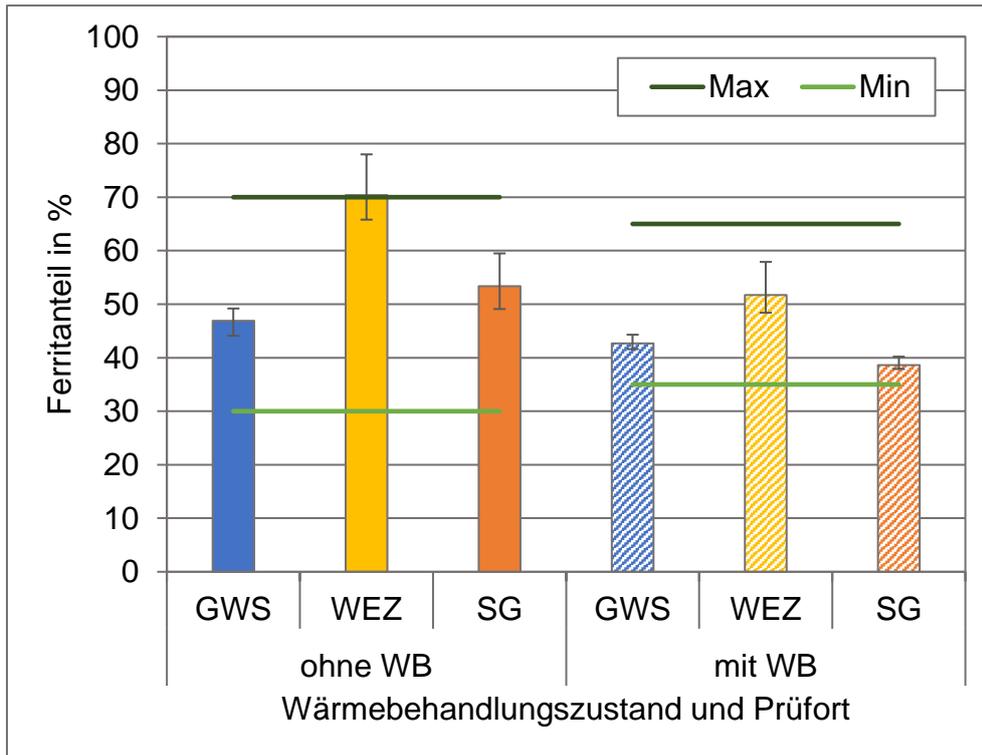


Abbildung 3: Ferritgehalte des Grundwerkstoffes (GWS), der Wärmeinflusszone (WEZ) und des Schweißgutes (SG) der UP-Eindraht-Schweißung im Schweißzustand und im wärmebehandelten Zustand, Zulässigkeitsgrenzen gemäß ISO 17781:2017

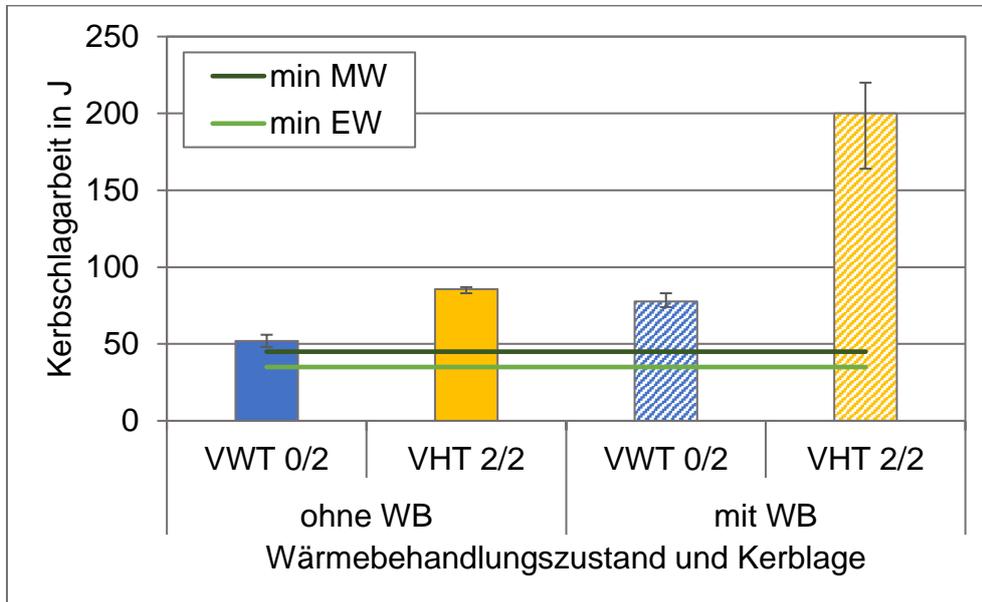


Abbildung 4: Kerbschlagarbeitswerte der UP-Eindraht-Schweißungen im Schweißzustand und im wärmebehandelten Zustand, Prüftemperatur: -46 °C, Zulässigkeitsgrenzen gemäß NORSOK M-630:2013