

Der Beitrag des Zweitplatzierten des Richard Marek-Preises

# Elektronenstrahlschweißen einer artfremden Verbindung (A625/CB2) für Anwendungen im Kraftwerksbau



■ Christopher Wiednig

Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, Technische Universität Graz

## Einleitung

Aufgrund des jährlich steigenden weltweiten Energiebedarfs und der Tatsache das ca. 80% des weltweiten Energiebedarfes von fossilen Kraftwerken gedeckt wird [1] ist die Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades kalorischer Kraftwerke ein wichtiger Schritt um den CO<sub>2</sub> Ausstoß zu reduzieren. Eine Steigerung des Wirkungsgrades kann durch eine Erhöhung des Dampfdruckes und der Temperatur bewirkt werden. Da moderne Kraftwerkweit über dem kritischen Dampfdruck (typischerweise um  $T=600^{\circ}\text{C}$  und  $p=26.5\text{MPa}$ ) arbeiten, ist dies eine große Herausforderung für die verwendeten Materialien. Aktuell sind martensitische 9-12% Chrom Stähle im Kraftwerksbau weit verbreitet. Bei weiter gesteigerten Dampftemperaturen führt aber kein Weg an Nickelbasislegierungen vorbei. Aufgrund des hohen Preises dieser Legierungen werden sie allerdings nur dort eingesetzt wo sie, aufgrund der dort vorherrschenden hohen Temperaturen, unbedingt notwendig sind. Ingenieure, müssen sich jetzt den Problemen der Verbindung dieser sehr unterschiedlichen Materialien stellen.

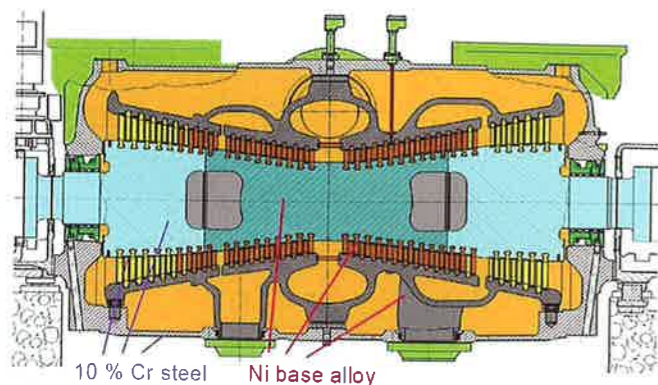


Abbildung 1: Beispielhafte Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe in modernen Kraftwerken, www.saarschmiede.com, 2012

## Aufgabenstellung

Die Verschweißung dieser Werkstoffkombination ist mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Der martensitische 9% Chromstahl (hier eine CB2 Legierung) muss vor dem Schweißen vorgewärmt werden und benötigt eine Wärmenachbehandlung um seine Eigenschaften, hohe Festigkeit und gute Kriechbeständigkeit, zu bekommen. Völlig konträr sind dagegen die Anforderungen der Nickelbasislegierung. Hier sollte beim Schweißen auf eine so geringe Wärmeerbringung wie möglich geachtet werden und keine Wärmenachbehandlung durchgeführt werden. Dieser Umstand macht eine Pufferung des 9% Chromstahls mit Nickelbasislegierung nötig um dann, nach einer Wärmebehandlung des gepufferten Bauteils die Werkstücke, artgleich, mit einem Nickelbasis Zusatz „kalt“ verschweißen zu können. Bei dieser Methode wird allerdings die Nickelbasis Pufferlage einer Wärmebehandlung unterzogen die zur Bildung einer spröden Phase ( $\delta$ -phase) im Werkstoff führt.

Diese Arbeit (vgl. [2] und [3]) ist eine Erweiterung zur Diplomarbeit von B. Berger [4] in der die Verschweißung dieser Materialien mithilfe verschiedener Lichtbogenverfahren untersucht wurde. Dort wurde gezeigt, dass nur der sehr zeitintensive Lichtbogenhandschweißprozess mit Stabelektroden, die Schweißverfahrensprüfung nach EN ISO 15614-1 bestehen konnte. Mit der vorliegenden Untersuchung soll die Schweißbarkeit dieser beiden Gusslegierungen miteinander, mittels des Elektronenstrahlverfahrens an 50mm dicken Gussstücken untersucht werden. Die Anwendung des Elektronenstrahlschweißverfahrens bietet gegenüber konventionellen Schweißverfahren folgende Vorteile.

- Keine Zusatzwerkstoff nötig
- Geringere Wärmeerbringung
- Kleine Schweißzone
- Wesentlich kürzere Schweißzeit

- In vielen Fällen kein Vorwärmen und keine Wärmenachbehandlung erforderlich
- Kostengünstige Nahtvorbereitung (I-Stoß)
- Voll Automatisierbarer Schweißprozess

## Literatur

Die Nickelbasis-Legierung A625 vereint gute mechanische Eigenschaften in Verbindung mit hoher Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit sowie herausragender Kriechbeständigkeit. Die Legierung A625 wurde für Hochtemperaturanwendung bis  $700^{\circ}\text{C}$  entwickelt. Die hohe Festigkeit wird über Ausscheidungshärtung ( $\gamma''$ -Phaseanteile  $[\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Al}, \text{Ti})]$ ) bzw. über Mischkristallverfestigung (Mo und Nb) erzielt. Aufgrund dieser Eigenschaften hat A625 ein sehr weit gefächertes Anwendungsgebiet in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Kraftwerkstechnik und im chemischen Anlagenbau. Aufgrund der hohen Zähigkeit und der Eigenschaft der Kaltverfestigung ist die mechanische Bearbeitung allerdings kostenintensiv. In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die Legierungszusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs angeführt [5]–[8].

	C	Si	Mn	P	S	Al	Co
Min	0.030	-	-	-	-	-	-
Max	0.100	0.500	0.500	0.02	0.015	0.400	1.000
	Cr	Fe	Mo	Nb + Ta*	N	Ti	
	20.00	-	8.000	3.150	-	-	
	23.00	5.000	10.00	4.200	0.400	0.400	

Tabelle 1: Legierungszusammensetzung A 625

	Rp02%	Rm	A5	Av	20°C	HV 10
	MPa	MPa	%	J		
Nom.	-	-	20	50	-	-
Act.	257	475	56	-	-	160

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften A 625

**Gefüge:** Die Legierung ist kubisch flächenzentriert und umwandlungsfrei im festen Zustand. Die Korngröße liegt beim Gusswerkstoff im Bereich mehrerer Millimeter. An den Korngrenzen finden sich Titan- und Niobkarbide welche sich früh aus der Schmelze ausscheiden. Typisch für diesen Gusswerkstoff ist auch eine große Anzahl von kleinen Poren. Abhängig vom Anwendungsgebiet (hohe Korrosionsbeständigkeit oder hohe Kriechfestigkeit) werden verschiedenen Wärmebehandlungen durchgeführt. Für Hochtemperaturanwendungen ( $T > 600^{\circ}\text{C}$ ) wo hohe Festigkeiten und gute Kriechbeständigkeit gefordert sind, wird der Werkstoff bei  $1120^{\circ}\text{C}$  lösungsgeglüht um eine  $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Mo})$  Phase zu bilden [7], [9]–[11].

**Schweißbarkeit:** Ausscheidungsgehärtete Nickelbasislegierungen neigen bei konventionellen Schweißprozessen zur Bildung von Heißrissen da sich eutektische Phasen bilden können. Hier können in Anwesenheit von Schwefel sehr

niedrig schmelzende Phase ( $\text{Ni-Ni}_3\text{S}_2$  Eutektikum  $T_s = 637^{\circ}\text{C}$ ) entstehen [4]. Ebenso zu erwähnen ist, dass die Kriechbeständigkeit aufgrund einer Kornverfeinerung in der Schweißzone abnehmen kann. Da das Material keine Umwandlung im festen Zustand durchläuft ist in der Wärmeinflusszone (WEZ) jedoch mit einer Kornvergrößerung zu rechnen. Je geringer die Wärmeerbringung beim Schweißen und je schneller der Temperaturzyklus beim Schweißen durchlaufen wird desto geringer ist die Anfälligkeit für Heißrisse und desto schmaler sind die Zonen in denen eine Kornverfeinerung (Schmelzzone) bzw. Kornvergrößerung (WEZ) einsetzt [11].

## 9% Chrom Stahl

Martensitische 9% Chrom Stähle zählen aufgrund ihrer Kombination von hoher Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit, guter Wärmeleitfähigkeit und geringem Wärmeausdehnungskoeffizienten zu den bedeutendsten Werkstoffen im Bereich kalorischer Kraftwerke. Sie können bis zu Temperaturen von  $625^{\circ}\text{C}$  eingesetzt werden. 9% Chrom Stähle sind zudem gut zu bearbeiten und zu recyceln. Wirtschaftlich gesehen sprechen eine hohe Verfügbarkeit und relativ geringe Kosten für die Verwendung dieses Materials [12]. In Tabelle 3 und Tabelle 4 sind die Legierungszusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs angeführt [13].

UTPmaintenance  
Using Well-Matched Components. This is How I Perform.

UTPperform lässt unabhängiges Schweißen für die Öl- und Erdgaswirtschaft Wirklichkeit werden.

voestalpine Böhler Welding  
www.voestalpine.com/welding

voestalpine  
ONE STEP AHEAD

	C	Si	Mn	P	S	Al	Co	Cr
Min.	0.120	0.200	0.800	-	-	0.010	0.900	9.000
Max.	0.140	0.300	1.00	0.015	0.005	0.020	1.100	10.00
	Cu	Mo	V	Nb	Ni	Ti	B	N
-	-	1.400	0.180	0.050	0.100	-	0.008	0.015
	0.100	1.600	0.220	0.070	0.200	0.005	0.015	0.030

Tabelle 3: Legierungszusammensetzung CB2 Stahl

	Rp02%	Rm	A5	Av 20°C	HV 10
	MPa	MPa	%	J	
Nom.	450	600-750	15.0		

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften CB2 Stahl

**Gefüge:** 9% Chrom Stähle sind umwandlungshärtende Stähle die ihre Eigenschaften durch eine gezielte Wärmebehandlung bekommen. Ihr Gefüge besteht nach dem Austenitisieren, Abschrecken und mehrmaligen Anlassen aus angelassenem Martensit. Der in der tetragonal verzerrten Matrix gelöste Kohlenstoff scheidet sich in Form von Karbiden ( $M_{23}C_6$ ) und Karbonitriden (MX) an den ehemaligen Austenitkorn Grenzen aus. Die resultierende Mikrostruktur besteht aus einer kubisch raumzentrierten Matrix mit einer hohen Dichte an Ausscheidungen und Versetzungen. Das Vorhandensein von unterschiedlichen internen Korngrenzen und Ausscheidungen trägt zur hohen Festigkeit und Kriechbeständigkeit solcher Stähle bei [14]. Der je nach Legierungsbestandteilen vorhandene  $\delta$ -Ferrit soll so gering wie möglich gehalten werden da mit steigendem  $\delta$ -Ferritanteil im Gefüge die Zähigkeit und die Kriechfestigkeit abfällt [15]–[17].

**Schweißbarkeit:** Die durch Wärmebehandlungen optimierten Gefügeeigenschaften des Materials gehen durch den Schweißprozess verloren. In der Grobkornzone ( $T > A_{c3}$ ) werden Ausscheidungen, teilweise aufgelöst und grobe Austenitkörner gebildet, welche sich bei Temperaturen über  $1250^\circ\text{C}$  in  $\delta$ -Ferrit umwandeln [5]. Aufgrund des schnellen Abkühlens beim Schweißen bleibt der  $\delta$ -Ferrit bis zum Erreichen der Raumtemperatur stabil. Dieser Bereich der WEZ weist typischerweise die größte Härte und die geringste Zähigkeit auf [8]. Die weiter von der Schmelzlinie entfernte Feinkornzone ( $T > A_{c3}$ ) in der WEZ ist bei Hochtemperaturanwendungen das schwächste Glied in Schweißverbindungen. Selbst bei niedriger Spannung können Schweißungen in kriechbeständigen martensitischen Stählen in diesem Bereich brechen (Type IV Cracking) [8], [18]. Beim Schweißen dieses Stahls erhöht sich mit zunehmender Wärmeeinbringung der  $\delta$ -Ferrit Anteil im Gefüge, was vor allem bei mehrlagigen Schweißungen der Fall ist. Weiters nimmt die Breite der Martensitlatten zu und die ursprüngliche Gussstruktur geht verloren [16], [19].

#### Elektronenstrahlschweißen

Elektronenstrahlschweißen (ESS) ist ein Schmelzschweiß-

verfahren mit sehr hoher Energiedichte. Je nach Fokussierungsgrad des Strahls sind bis zu  $10^9\text{W}/\text{cm}^2$  [20], [21] möglich. Die Wärme wird hierbei direkt an der Schweißstelle, durch die auf das Werkstück auftreffenden Elektronen, erzeugt. ESS ist ein qualitativ sehr hochwertiges Schweißverfahren (Schweißung im Vakuum, kein Schweißzusatz, vollständig CNC gesteuerter Prozess) mit ausgezeichneter Wiederholbarkeit. Eine herausstechende Eigenschaft des ESS ist es dickwandige Bauteile einlagig, mit sehr geringer Wärmeeinbringung zu verschweißen. Die Schweißnahtbreite in Stahl bei einer 100mm tiefen Naht bewegt sich zwischen 3 und 8 mm. Bis zu 200mm dicke Bauteile aus Stahl können einlagig geschweißt werden [22]–[24]. Das Schweißen von artfremden Verbindungen stellt eine besondere Herausforderung an die Schweißtechnik dar. Hier sind nicht nur die Schwierigkeiten beim Schweißen der jeweiligen Materialien zu berücksichtigen, sondern auch die Probleme bzw. Besonderheiten die in der Aufmischungszone der Schweißung entstehen. Mit dem ESS können evtl. auftretende Schwierigkeiten vermindert werden [25]–[27]:

- Durch die hohe Energiedichte spielen unterschiedliche Schmelzpunkte eine untergeordnete Rolle
- Durch das kleine Schweißbad wird die Aufmischungszone der Materialien sehr klein gehalten
- Durch den schnellen Schweißprozess wird die Diffusionszeit begrenzt in der sich spröde Phasen ausbilden können
- Aufgrund des hohen Temperaturgradienten und der damit verbundenen schnellen Abkühlung der Materialien wird die Löslichkeitsgrenze zu höheren Temperaturen verschoben

#### Versuche

Für die Experimente wurden Gussstücke beider Werkstoffe mit einer Wanddicke von 50 mm von der Firma voestalpine Gießerei Traisen zur Verfügung gestellt. Die Schweißungen wurden in PA Position durchgeführt. Die Naht wurde von einer metallischen Badstütze aus CB2 gestützt. Es wurde eine pro-beam Universalkammermaschine EBG 45-150 K14 (max. Leistung 45kW, Vakuumkammer  $1,4\text{m}^3$ ) eingesetzt. In Abbildung 2 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

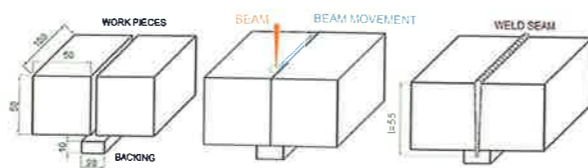


Abbildung 2: Versuchsaufbau

Die Ermittlung der Schweißparameter erfolgte in Vorversuchen [2]. Es wurden zuerst die Parameter für die jeweiligen Materialien ermittelt und danach die Parameter für die artfremde Verbindung ermittelt. Das statistische Verfahren „Design of Experiments“ [28] kam hier zur Anwendung. Als

Zielgröße dienten neben der Fehlerfreiheit (Poren und Risse) der Naht, die Nahttiefe und die Nahtbreite. Die variierten Prozessgrößen waren der Schweißstrom, die Schweißgeschwindigkeit und die Fokuslage des Strahls (vgl. [21]). Die Mikrostruktur der Naht wurde anhand von Schlifften untersucht. Aufgrund der stark unterschiedlichen Ätzbarkeit der Materialien wurden unterschiedliche Ätzungen eingesetzt. Um die qualitative Verteilung der Elemente in der Schweißzone zu ermitteln, wurde eine energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) durchgeführt. Der Härteverlauf der Schweißung wurde durch mehrere Härtereihen quer zur Schweißnaht bestimmt. Die mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht wurden mit folgende Prüfungen ermittelt.

- Zugversuch nach DIN 50125; Probenform B; konstante Belastungsrate 10MPa/s
- Kerbschlagbiegeversuch nach ONORM EN 10045-1; Kerben in Dickenrichtung; Kerbpositionen im Schweißgut und in den jeweiligen Wärmeinflusszonen
- Seitenbiegeprobe nach EN ISO 5173; Probendicke 10 mm; Biegedornradius 40 mm; Biegewinkel  $180^\circ$

Alle Prüfungen wurden sowohl im geschweißten (AW) als auch im wärmebehandelten Zustand (PWHT) durchgeführt.

#### Ergebnisse

**Metallographie:** In Abbildung 3 ist ein Querschliff der Schweißung zu sehen. In der Schmelzzone ist dendritisches Gefüge zu erkennen. Weiters sind Erstarrungslinien und kleine Poren zu sehen. Die Porenverteilung ist ähnlich wie im A625 Grundmaterial. Eine Wärmeinflusszone im A625 ist nicht sichtbar. Abbildung 4 zeigt die Wärmeinflusszone des CB2. Neben der Schmelzlinie ist ein ca. 0,8mm breiter Bereich mit fein gestreiftem Martensit erkennbar. Eine Grobkornzone konnte nicht ausgemacht werden. Der vergrößerte Bildausschnitt zeigt den Bereich nahe der Schmelzlinie, hier ist eine ca.  $20\mu\text{m}$  breite Zone zu sehen in der  $\delta$ -Ferrit Körner (blau) auftreten.



Abbildung 3 und 4: Schweißnaht und Wärmeinflusszone CB2

Die qualitative Elementverteilung wurde im REM mit einer EDX Messung bestimmt. In Abbildung 5 ist das Ergebnis des Linienscans, quer über die Naht, abgebildet. Es sind die Elemente Eisen (Fe), Nickel (Ni), Chrom (Cr) und Molybdän

(Mo) dargestellt. Die Fügezone (FZ) zeigt eine sehr homogene Verteilung der Elemente. An der Grenze zum jeweiligen Grundmaterial stellt sich mit einem sehr großen Gradienten sofort wieder die Zusammensetzung des jeweiligen Grundwerkstoffs ein.

**Härtemessung:** Abbildung 6 zeigt die Härteverteilung quer zur Schweißnaht nach der Schweißung (AW, blaue Linie) und nach einer Wärmenachbehandlung (PWHT, rote Linie). Auf der A625 Seite nimmt die Härte nahe der Schweißnaht

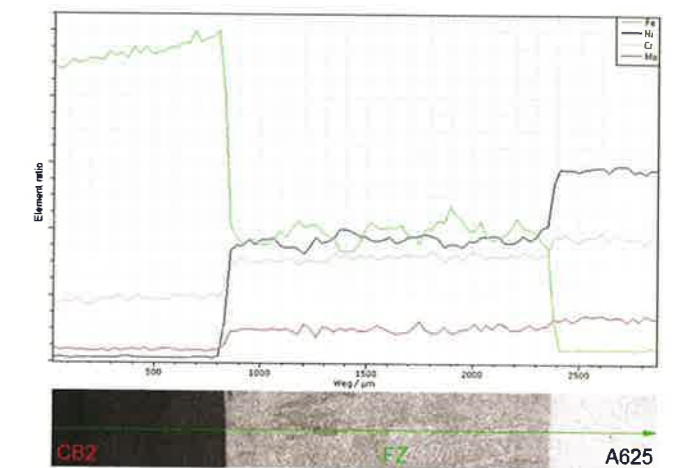


Abbildung 5: Energiedispersive Röntgenspektroskopie quer zur Schweißnaht

**utp maintenance**  
by voestalpine

PERFORM

YOUR OWN WAY!

utperform

- Das unabhängige Schweißsystem
- Hochleistungselektroden
- Hochleistungsnetzgerät
- Erstklassige Schweißergebnisse

UTPperform ist ein einzigartiges Schweißsystem, das es Ihnen ermöglicht, immer und überall, fernab von einem stationären Netzgerät, zu schweißen. Ein Gerät, das für die Ansprüche unabhängiger Menschen entwickelt wurde, die nach individuellen Schweißlösungen suchen. Schweißzusätze, die Ihren besonderen Anforderungen unter härtesten Bedingungen gerecht werden. Eine Live-Demo finden Sie unter: [www.utp-maintenance.com/perform](http://www.utp-maintenance.com/perform)

voestalpine Böhler Welding  
[www.voestalpine.com/welding](http://www.voestalpine.com/welding)

**voestalpine**  
ONE STEP AHEAD

leicht zu (ca. 200HV10). Die Schmelzzone weist eine Härte zwischen 200 und 220HV10 auf. In der Wärmeinflusszone des CB2, nahe der Schmelzlinie, erreicht die Härte einen Höchstwert von 430HV10. Kurz danach fällt der Wert wieder auf den des CB2 Grundwerkstoffes (240HV10) ab. Durch eine Wärmenachbehandlung konnte diese Härtespitze auf 265HV10 reduziert werden. Dieser Wert ist nach ONORM EN ISO 15614-1 und den Spezifikationen der voest alpine Gießerei Traisen zulässig.

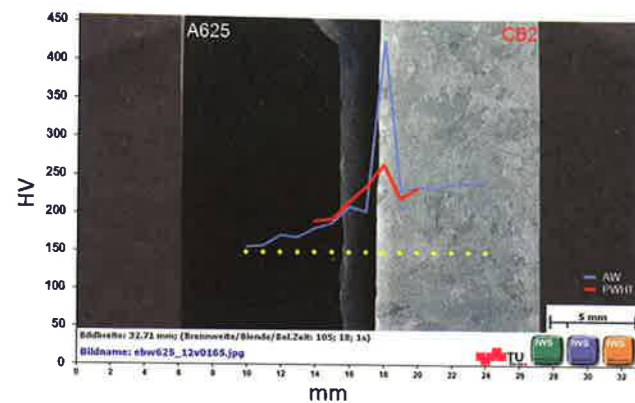


Abbildung 6: Härteprofil quer zur Schweißnaht

**Zugversuch:** Aufgrund der höheren Streckgrenze des CB2 trat plastische Verformung und folglich der Bruch immer im Bereich des A625 Grundwerkstoffes auf. In der Schweißnaht oder der Wärmeinflusszone sind keine Brüche aufgetreten.

**Kerbschlagbiegeprüfung:** Da es sich um eine Schweißung mit artfremden Fügepartnern handelt, wurden Proben mit drei verschiedenen Kerbpositionen gefertigt: WEZ-A625, Fügezone (FZ) und WEZ-CB2. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Alle Proben erreichten eine höhere Kerbschlagarbeit als die Vergleichsproben aus CB2 Grundmaterial (GM).

**Seitenbiegeprüfung:** Sieben Proben wurden geprüft, drei davon waren wärmebehandelt, wobei eine wärmenachbehandelte Probe den Test nicht bestand (ein Riss über 3 mm). Alle anderen Proben konnten den Test nach EN ISO 5173 bestehen.

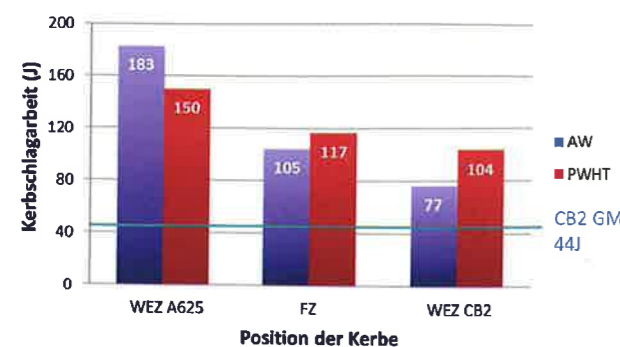


Abbildung 7: Kerbschlagwerte der Artfremden Verbindung

**Verfahrensprüfung:** Um diese Ergebnisse von dritter Stelle zu verifizieren, wurde von der Firma voest alpine Gießerei Traisen eine Verfahrensprüfung nach ISO 15614-1 durchgeführt. Die geschweißte Normprobe bestand alle Tests.

### Zusammenfassung

Diese Forschungsarbeit zeigt, dass 50 mm dicke Bauteile aus Nickelbasislegierung (A625) und martensitischem 9 % Chrom Stahl (CB2) verschweißt werden können. Nach dem Ermitteln der passenden Schweißparameter konnten die Fügepartner fehlerfrei verschweißt werden. Die Verbindung besitzt gut mechanische Eigenschaften. Die Gefügeuntersuchungen zeigten, dass die etwa 2,5 mm breite Fügezone keine Poren oder Risse aufweist und eine gleichmäßige Aufmischung der Schweißpartner in der Fügezone gegeben ist. Eine Wärmeinflusszone auf der A625 Seite war nicht ersichtbar. Die knapp 1 mm breite WEZ im CB2 besteht aus feinstreifigem Martensit. Nahe der Schmelzlinie sind einzelne d-Ferrit Körner sichtbar. Der Bereich hoher Härte in der Wärmeinflusszone des CB2 hat keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Verbindung. Ein Vorwärmen bzw. eine Wärmenachbehandlung der geschweißten Bauteile ist somit nicht erforderlich! Im Hinblick auf Kriechfestigkeit können die sehr feinkörnige Wärmeinflusszone des CB2 sowie der Bereich mit d-Ferrit nahe der CB2 Schmelzzone nachteilig sein. Um dies festzustellen werden aktuell Kriechproben, bei verschiedenen Spannungen, bei 625°C im Labor des Institutes für Werkstoffkunde und Schweißtechnik geprüft.

### Wirtschaftliche Aspekte

Die Vorteile des Elektronenstrahlschweißens liegen neben der hohen Reproduzierbarkeit vor allem auf der wirtschaftlichen Seite. Einlagige und sehr schmale Nähte ohne Zusatzwerkstoff zu produzieren kann die Kosten von Schweißungen deutlich reduzieren. In Tabelle 5 ist ein Vergleich dieser artfremden Verbindung anhand eines EN ISO 15614-1 konformen Prüfstückes (Nahtlänge 350 mm, Blech-



Abbildung 8: Vergleich der Schweißnahtquerschnitte: Elektronenstrahl (links), Lichtbogen mit Stabelektroden (rechts)

Elektronenstrahl		Lichtbogenschweißung	
-	<b>Schweißvorbereitung</b>	Aufbringen von drei Nickelbasis Pufferlagen auf den CB2: Vorwärmen des CB2 auf 220°C; Nickelbasis Pufferlagen aufbringen; Zwischenlagentemperatur <260°C; wärmenachbehandeln des gesamten Bauteils für 8 h bei 710°C	
I-Stoß	<b>Stoßvorbereitung</b>	U-Stoß; 10° Tulpenform	
-	<b>Zusatzwerkstoff</b>	ca. 4 kg Nickelbasis	
1	<b>Lagenanzahl</b>	ca. 50	
-	<b>Zwischenbearbeitung</b>	Entfernung der Schlacke und wegschleifen von Unebenheiten nach jeder Raupe	
30 s	<b>Schweißzeit</b>	8 h	

Tabelle 5: Vergleichstabelle der Schweißverfahren anhand einer Normprobe

dicke 50 mm) dargestellt. Es wird eine Lichtbogenhandschweißung (siehe [4]) mit einer Elektronenstrahlschweißung verglichen. Abbildung 8 zeigt Schliffe der Schweißnahte beider Verfahren.

### Industrielle Umsetzung

Mit dem Elektronenstrahl können Zeit und Kosten bei dem Fügen dieser Verbindung im Kraftwerksbau gespart werden. An den CB2/A625 Verbindungsstellen der Komponenten kann ein Nickelbasis-Puffer mittels Elektronenstrahlverfahren auf die Stahlgussbauteile aufgebracht werden. Auf ein Vor- und Nachwärmen der Bauteile kann dadurch verzichtet werden. Beim Zusammenbau der Kraftwerkskomponenten vor Ort, können so alle Schweißungen artgleich (Nickelbasis Zusatz) und ohne Vorwärmung, mit konventionellen Verfahren durchgeführt werden. Das Elektronenstrahlschweißen ermöglicht bei dieser Anwendung nicht nur eine enorme Zeitersparnis, sondern es wird auch das artfremde Schweißen von der Baustelle in die Produktionsstätte verlagert. Vor allem aber werden teure und zeitaufwändige Wärmebehandlungen eingespart, welche die Eigenschaften der Nickelbasis Pufferschicht negativ beeinflussen würden. ■

### Quellenverzeichnis

- [1] International Energy Agency, "Key World Energy Statistics 2014," Paris, 2014.
- [2] C. Wiednig, "Electron Beam Welding Alloy 625," Technische Universität Graz, 2013.
- [3] C. Wiednig, C. Lochbichler, N. Enzinger, C. Beal, and C. Sommitsch, "Dissimilar Electron Beam Welding of Nickel base Alloy 625 and 9 % Cr Steel," Procedia Eng., vol. 86, pp. 184–194, 2014.
- [4] B. Berger, "Dissimilar Schweißen von (Konstruktionsschweißungen) NIBAS 625 mit warmfestem Cr- Stahl COST CB2," Technische Universität Graz, 2011.
- [5] T. Krupp, "Nicrofer® 6020 hMo- alloy 625," Werdol, GER, 2007.
- [6] Voestalpine Gießerei Traisen, "Werkstoffdatenblatt NiCr22Mo9Nb; 2.4856," Traisen, 2007.
- [7] S. Rai, A. Kumar, and V. Shankar, "Characterization of microstructures in Inconel 625 using X-ray diffraction peak broadening and lattice parameter measurements," Scr. Mater., vol. 51, no. 1, pp. 59–63, Jul. 2004.
- [8] V. Shankar, "Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy," J. Nucl. ..., vol. 288, no. 2–3, pp. 222–232, Feb. 2001.
- [9] Special Metals, "INCONEL alloy 625 - Information Sheet," 2006.
- [10] S. Weiß, "Metallkundliche Untersuchungen zum Hochtemperaturverformungsverhalten strahlgeschweißter hochwarmfester Werkstoffe, Gemeinsamer Zwischenbericht November 1999 bis Juni 2001," Essen, 2001.
- [11] D. Dobeneck v., Elektronenstrahlschweißen - Anwendungsbeispiele aus 30 Jahren Lohnschweißpraxis, 2. Auflage. Burg, Germany: pro-beam AG & Co. KGaA, 2007.
- [12] A. Göcmen, "Grundrisse der Gefügeausbildung und der Zeitstandeigenschaften martensitischer 9-12% Chromstahle," ETH Zürich, 1997.
- [13] Voestalpine Gießerei Traisen, "Werkstoffprüfung GX13CrMoCoVN-bNB10-1-1," Traisen, 2009.
- [14] I. Holzer, "Modelling and Simulation of Strengthening in Complex Martensitic 9-12% Cr and a Binary Fe-Cu Alloy," Graz University of Technology, 2010.
- [15] B. Sonderegger, "Charakterisierung der Substruktur in modernen Kraftwerkswerkstoffen mittels der EBSD- Methode," Technische Universität Graz, 2005.
- [16] A. Schalber, "Charakterisierung der Schweißnaht des Bor-modifizierten 9% Chromstahls CB2A," Technische Universität Graz, 1998.
- [17] G. Kukutschki, "Sammlung und Auswertung der Materialdaten von Stählen für Gas- und Dampfturbinenrotoren anhand eines Eigenschaftsprofils," Technische Universität Graz, 2003.
- [18] C. Schlacher, "Untersuchung des Kriech- und Schädigungsverhaltens von Schweißverbindungen eines martensitischen borlegierten 9 % Cr-Stahls," Technische Universität Graz, 2015.
- [19] F. Méndez-Martin, "No Title Microstructural characterisation of the HAZ of new creep resistant 9% chromium steels using weld simulation technique," Technische Universität Graz, 2006.
- [20] D. Dobeneck v., T. Löwer, and V. Adam, Elektronenstrahlschweißen - Das Verfahren und seine industrielle Anwendung für höchste Produktivität. Burg, Germany: Verlag moderne Industrie, 2001.
- [21] H. Schultz, Elektronenstrahlschweißen, 2nd ed. Düsseldorf: DVS-Verlag GmbH, 1989.
- [22] W. Behr, "Wettbewerbsfähige Lösungen für die Fügetechnik," DVS-Aktuell: „Elektronenstrahlschweißen“, 2009.
- [23] U. Dilthey, Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1 Schweiß- und Schneidtechnologien, 3. Auflage. Berlin- Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- [24] K. R. Schulze, "Durch dick und dünn - Elektronenstrahlschweißen-Verfahren und Technologien," Schweiß. und Schneid., vol. 63, no. 6, pp. 320–325, 2011.
- [25] M. Dobner, "Untersuchungen zum Elektronenstrahlschweißen dickwandiger Bauteile," Technische Hochschule Aachen, 1996.
- [26] Z. Sun and R. Karppi, "The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview," J. Mater. Process. Technol., vol. 59, no. 3, pp. 257–267, May 1996.
- [27] K. Woeste, "Elektronenstrahlschweißen metallischer Werkstoffkombinationen," Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2005.
- [28] D. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, 8th ed. Singapore: John Wiley & Sons, 2013.