

# Laserstrahl-Mehrlagen-Engstspalt-Schweißen von Alloy 617occ – Fertigen von Schlüsselkomponenten zukünftiger energieeffizienter und ressourcensparender Hochtemperatur-Prozesse

B. Keßler, D. Dittrich, B. Brenner, J. Standfuß und E. Beyer, Dresden

Zur Schonung der Umwelt und Erreichen der weltweiten Klimaschutzziele ist es notwendig, den derzeitigen CO<sub>2</sub>-Austoß bestehender und neu zu planender Kraftwerke zu reduzieren und zu begrenzen. Eine Möglichkeit stellt die Effizienzverbesserung von Hochtemperatur-Prozessen durch eine Steigerung der Dampfparameter Temperatur und Druck bei der Energieerzeugung dar. Die Erhöhung des Wirkungsgrades dampfbetriebener Kraftwerke auf über 50% erfordert beispielsweise die Anhebung der Dampfeintrittstemperatur auf 700°C. Aus diesem Grund steigen die Anforderungen an die im Bereich der Hochtemperatur-Prozesse eingesetzten Werkstoffe weiter an. Nickelsuperlegierungen und insbesondere die Legierung Alloy 617occ werden diesen Beanspruchungen gerecht. Einhergehend ist es notwendig, neue effiziente Fügeprozesse zu entwickeln, da Nickelsuperlegierungen bei der schweißtechnischen Verarbeitung durch zu viel Wärmeeinbringung in ihren Hochtemperatüreigenschaften nachhaltig geschädigt werden können und zudem während der Verarbeitung zur Ausbildung von Heißrissen neigen. Das Laser-Mehrlagen-Engstspalt-Schweißen (Laser-MES) besitzt das Potential, diesen Herausforderungen gerecht zu werden. Folgend soll auf das Schweißverfahrensprinzip, die neu entwickelte Systemtechnik und erste Ergebnisse der Schweißprozessentwicklung zum Fügen dickwandiger Bauteile aus Alloy 617occ eingegangen werden.

## 1 Einleitung und Motivation

Die Sicherung der Energieversorgung Deutschlands erfolgt derzeit und auch zukünftig maßgeblich durch den Betrieb von konventionellen Kraftwerken [1].

Zur Schonung der Umwelt ist es nötig, den CO<sub>2</sub>-Austoß dieser Kraftwerke deutlich zu reduzieren. Eine wesentliche Maßnahme stellt die Steigerung des thermischen Wirkungsgrades dar. Deshalb ist die Erhöhung der Turbineneintrittstemperatur auf 700°C weit oben in der Agenda der internationalen Kraftwerkshersteller angesiedelt. Die Anhebung des Wirkungsgrades auf über 50% stellt jedoch deutlich höhere Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe, sodass ein Wechsel von den bisher eingesetzten hochwarmfesten Stählen hin zu Nickelsuperlegierungen unausweichlich ist. Nur diese besitzen die erforderlichen Werkstoffeigenschaften – zum Beispiel Kriech- und Zeitstandfestigkeit – und werden den hohen Anforderungen gerecht [5,6]. Als besonders geeigneter Kandidat für dickwandige Bauteile des Dampfkessels gilt die aus Alloy 617 weiterentwickelte Alloy 617mod bzw. 617occ [12].

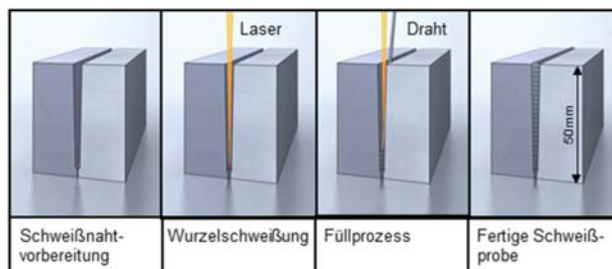
Klassische Schweißverfahren stoßen bei der Verarbeitung dieser Werkstoffe – insbesondere bei im Kraftwerksbau typischen großen Bauteilabmessungen und gleichzeitiger Forderung nach schmalen, schlanken Nähten – an ihre Grenzen, da die Hochtemperatüreigenschaften des Werkstoffes nachhaltig geschädigt werden können und deren Wiederherstellung nur durch sehr aufwändige Wärmebehandlung möglich ist.

Großes Potential zum schädigungsarmen Fügen der Nickelsuperlegierung Alloy 617occ besitzt das Laser-MES aufgrund der im Anschluss erläuterten Verfahrensspezifika.

## 2 Das Laser-Mehrlagen-Engstspalt-Schweißen

Das am Fraunhofer-IWS entwickelte Laser-Mehrlagen-Engstspalt-Schweißen nutzt den Laserstrahl als berührungsloses Werkzeug zum sicheren Aufschmelzen der Fügepartner und des Schweißzusatzwerkstoffes [4].

Die Wurzelschweißung wird in der Regel mit einem statischen Laserstrahl erzeugt. Beim sich anschließenden Füllprozess wird der Laserstrahl mit Hilfe eines Galvanometer-Scanners zwischen den Bauteilflanken zyklisch oszilliert, sodass ein sicheres Aufschmelzen der zu fügenden Bauteile und des Zusatzwerkstoffes gewährleistet werden kann (Bild 1). Das Verfahren zeichnet sich insbesondere durch die Möglichkeit aus, extrem schmale Schweißnähte zu erzeugen. Zur Realisierung solcher Engstspalte sind hochbrillante Laserstrahlquellen mit einem Strahlparameterprodukt  $SPP < 8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  zu bevorzugen. Der sehr gut fokussierbare Laserstrahl kann auch in eine Engstspaltfuge mit sehr großen Aspektverhältnissen und einer durchschnittlichen Fugenbreite von 2 bis 3 mm vollständig bis zum Fugengrund eingeleitet werden.



**Bild 1:** Verfahrensprinzip des Laser-MES [3]

Beim Schweißen von Nickelsuperlegierungen wirken sich die verfahrensspezifischen Vorteile des Laser-MES – das sind: geringe Streckenenergien und damit

geringe thermische Wechselwirkungen mit dem Grundwerkstoff, geringe Materialverzüge und minimaler Verbrauch von Schweißzusatzwerkstoff positiv auf die Schweißbarkeit und Wirtschaftlichkeit aus.

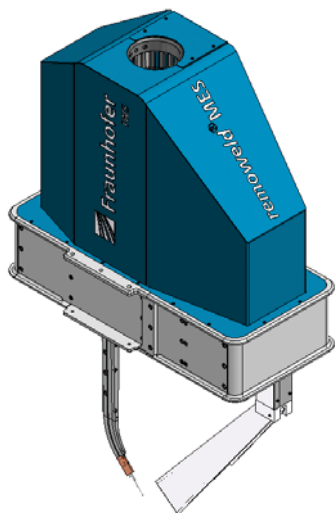
Zur potentiellen Anwendung in einem industriellen Umfeld ist es jedoch erforderlich, eine werkstoffangepasste Prozessentwicklung vorzunehmen. Das bedeutet, dass das Prozessverständnis und die Wirkungsweise der bestimmenden Schweißparameter, das sind: die Laserstrahlleistung, die Schweißgeschwindigkeit, die Größe des Fokusdurchmessers, die Ausbildung und Oszillationsfrequenz der Scankontur sowie die Drahtposition und Zuführgeschwindigkeit des Zusatzwerkstoffes verstanden und eine Anpassung an die zu schweißende Werkstofflegierung vorgenommen wird.

Das Schweißverfahren eignet sich auch sehr gut für weitere schwer schweißbare Werkstoffe und wurde am Fraunhofer-IWS bereits erfolgreich an verschiedenen Werkstofflegierungen entwickelt und beispielsweise zum Fügen von Bauteilen aus der Aluminiumlegierung AlSi1MgMn mit einer Schweißnahttiefe von 50 mm eingesetzt [13].

### 3 Die Systemtechnik - remoweld®MES

Das Fraunhofer-IWS hat einen eigens an die Anforderungen an das Laser-MES angepassten Schweißkopf-Prototypen mit dazu gehöriger Steuerungs- und Überwachungseinheit nach industriellen Standards konzipiert und entwickelt.

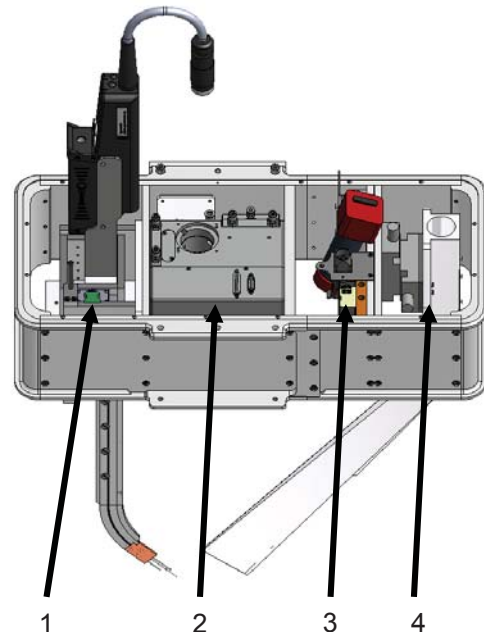
Die optische Auslegung des remoweld®MES Schweißkopfes (Bild 2) ist so gestaltet, dass es zukünftig möglich ist, Schweißnahttiefen bis 250 mm zu realisieren.



**Bild 2:** remoweld®MES Schweißkopf-Prototyp

Ziel der Schweißkopfentwicklung war es, eine flexible und damit an verschiedene Anforderungen anpassbare Systemtechnik zur individuellen Schweißprozessentwicklung zu konzipieren. Der konstruktive Aufbau des remoweld®MES Schweißkopfes wurde daher modular gestaltet. Diese Vorgehensweise besitzt mehrere Vorteile. Zum einen ist gewährleistet, dass

ein leichter Transport und eine einfache Montage bei Baustellenbetrieb möglich sind. Zum anderen wird eine schnelle Anpassung der Schweißoptik an verschiedene Schweißaufgaben sichergestellt. In Bild 3 sind die vier Module zu sehen, diese erfüllen folgende Aufgaben:



**Bild 3:** Module des Schweißkopf-Prototypen

#### 1 Drahtjustage-Modul

Die 3-D-Bewegungseinheit des Drahtjustage-Moduls gewährleistet die wiederholgenaue Positionierung des Schweißzusatzwerkstoffes in drei Raumrichtungen sowie durch eine schwenkbare Achse unabhängig von der Schweißposition. Die Gestaltung des Drahtschwertes ist so gewählt, dass der Drahtanstellwinkel mit geringem Montageaufwand angepasst werden kann. Zudem befinden sich im Inneren des Drahtschwertes Kanäle zur Zuführung des Schweißschutzgases, sodass eine Abschirmung der Prozesszone vor Luftzutritt gewährleistet werden kann und gleichzeitig eine Kühlung des Schwertes realisiert wird.

#### 2 Scanner-Modul

Mit Hilfe des Scanner-Moduls wird die Laserstrahlformung zum sicheren Aufschmelzen der Bauteilflanken und der vorherigen Lage vorgenommen. Der Scanner liefert in einem für das Laser-MES typischen Arbeitsfeld (3x3 mm) die Möglichkeit der hochfrequenten Strahlableitung, sodass zudem die Schmelzbad-dynamik gezielt beeinflusst werden kann. Die Ansteuerung des Scanners erfolgt dabei über eine am Fraunhofer-IWS neu entwickelte Software-Lösung.

#### 3 Sensor-Modul

Das Sensor-Modul dient in erster Linie der Qualitätsüberwachung in Form einer visuellen Prozesskontrolle

durch den Bediener. Die hier verbaute Hochgeschwindigkeitskamera und dazugehörig ein Beleuchtungslaser erlauben es, die Schweißprozesszone in Verbindung mit einer speziell entwickelten Software auch in großen Schweißnahttiefen zu beobachten. Zur Messung der Spalttiefe und Spaltbreite wird derzeit geeignete Sensorik in den Schweißkopf-Prototypen implementiert. Dadurch wird es möglich zukünftig, eine automatische Positionierung des Schweißkopfes im Fügspalt und eine Anpassung der Scanbreite an die aktuelle Spaltbreite vorzunehmen.

#### 4 Absaug-Modul

Das Absaug-Modul besitzt zwei Aufgaben. Zum einen gewährleistet es die prozessnahe Absaugung von entstehenden Schweißräuchen und -stäuben und damit insbesondere bei der schweißtechnischen Verarbeitung von Nickelbasis- und hochlegierten Stahlliegierungen nötige Minimierung der Schadstoffbelastung für den Bediener. Zum anderen wird durch die prozessnahe Absaugung eine Belegung der Nahtflanken mit Metaldampf-, Oxiden und/oder Stäuben verringert bzw. vermieden.

Die Bewegung des Schweißkopfes kann mit Hilfe eines Roboters, einer CNC-Maschine oder eines Pentapoden erfolgen. Die Steuerung der eingesetzten Bewegungsmaschine und des Scanner- und Sensor-Moduls erfolgt über eine zentrale Steuerungs- und Überwachungseinheit.

#### 4 Das Versuchsmaterial Alloy 617occ

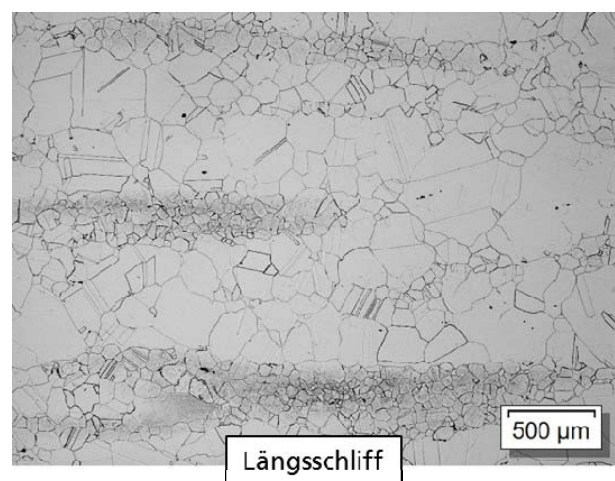
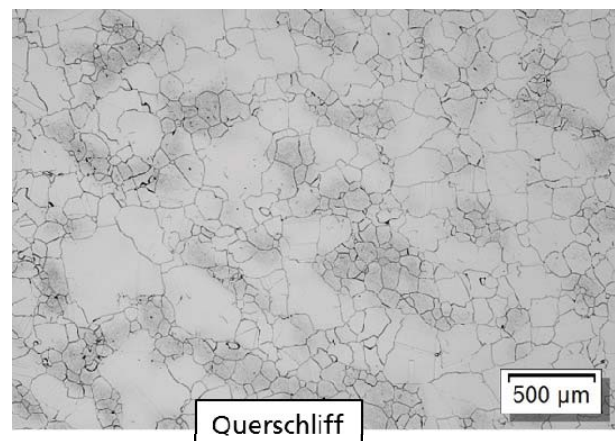
Der Werkstoff Alloy 617occ ist eine Weiterentwicklung der bereits seit Jahrzehnten bekannten und erfolgreich eingesetzten Nickelsuperlegierung Alloy 617. Es handelt sich dabei um eine austenitische, nicht aushärtbare, mischkristallverfestigende Legierung mit großer Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit sowie einer sehr guten Hochtemperaturfestigkeit. Alloy 617occ wird mit dem Kurzzeichen NiCr23Co12MoB oder der Werkstoffnummer 2.4673 bezeichnet [10]. Die Bezeichnung Alloy 617occ leitet sich aus dem Englischen ab und steht für „optimised chemical composition“. Hier liegt auch der Grund für die im Vergleich zu Alloy 617 verbesserten Eigenschaften. Zum einen wird der Werkstoff ausschließlich im Vakuum er- und umgeschmolzen, wodurch die Aufnahme unerwünschter Elemente aus der Luft vermieden wird. Zum anderen ist die chemische Zusammensetzung im Vergleich zu Alloy 617 zur Steigerung der Zeitstandfestigkeit und Verbesserung der Schweißbarkeit verändert worden. So führt die Optimierung des Kohlenstoff- und Molybdängehaltes zur Verbesserung der Schweißbarkeit bei gleichbleibenden Festigkeitseigenschaften und die Zugabe von Vanadium und Niob zur Vermeidung von Karbidseigerungen [9]. Des Weiteren werden durch gezieltes Zulegieren von Bor sowie das engere Tolerieren der festigkeitssteigernden Elemente Aluminium, Titan, Kobalt und Kohlenstoff verbesserte Kriecheigenschaften erreicht [8].

Tabelle 1 zeigt den Vergleich der chemischen Zusammensetzungen beider Werkstoffe und zur Einordnung die des eingesetzten Versuchsmaterials.

**Tabelle 1:** Chemische Zusammensetzungen in Massen [%]

Element	Alloy 617		Alloy 617occ		Versuchsmaterial
	min	max	min	max	
Ni	bal.		bal.		bal.
Cr	20,0	23,0	21,0	23,0	21,88
Co	10,0	13,0	11,0	13,0	11,49
Mo	8,0	10	8,0	10,0	8,47
Ti	0,2	0,5	0,25	0,5	0,43
Al	0,6	1,5	0,8	1,3	1,21
Fe	-	2,0	-	1,5	0,66
Mn	-	0,7	-	0,5	0,34
Si	-	0,7	-	0,3	0,06
C	0,05	0,1	0,05	0,08	0,056
P	-	0,012	-	0,012	0,006
S	-	0,008	-	0,008	0,005
V	k.A.		>0	0,6	0,3
Nb	k.A.		>0	0,6	0,17
B	0	0,006	0,001	0,005	0,004

Das Gefüge des vorliegenden Versuchsmaterials zeigt im Quer- und Längsschliff eine ausgeprägte Karbidzeiligkeit (Bild 4). Untersuchungen mittels TEM zeigen, dass diese chrom- und molybdänreichen Mischkarbide vom Typ  $M_{23}C_6$  sowohl im Korninneren als auch an den Korngrenzen vorliegen.



**Bild 4:** Quer- und Längsschliff des Versuchsmaterials

## 5 Schweißtechnische Anforderungen

Alloy 617occ ist schweißgeeignet und wird in der Regel im lösungsgeglühten Zustand geschweißt. Die schweißtechnische Verarbeitung bringt jedoch einige Herausforderungen mit sich. Beim Schweißen der Legierung ist auf eine möglichst geringe Wärmebringung und eine schnelle Wärmeabfuhr zu achten, da der große thermische Ausdehnungskoeffizient zu hohen Schrumpfspannungen führt. Des Weiteren besitzt NiCr23Co12MoB ein relativ großes Erstarrungsintervall. In der Folge treten häufig Heißrisse vom Typ Erstarrungsrisse im Schweißgut und Wiederaufschmelzrisse im Bereich der Schmelzlinie und im wärmebeeinflussten Schweißgut von Mehrlagenschweißungen auf. Zudem wird durch eine relativ hohe Viskosität des Schmelzbades das Fließen insbesondere an Bauteilflanken erschwert, wodurch Bindefehler vom Typ Flankenbindefehler begünstigt werden.

[7, 10, 11]. Wird der Werkstoff mehrlagig verschweißt, dann ist darauf zu achten, dass die Zwischenschichttemperatur  $120^{\circ}\text{C}$  nicht übersteigt. Nach dem Schweißen wird zudem eine Wärmebehandlung zur Vermeidung von Spannungsrelaxationsrissen durchgeführt. In [10] wird aus diesem Grund eine dreistündige Glühung bei  $980^{\circ}\text{C}$  empfohlen.

## 6 Laser-MES Prozessentwicklung

Voruntersuchungen in Form von Bead-on-Plate Versuchen haben gezeigt, dass insbesondere den Schweißparametern Laserstrahlleistung, Schweißgeschwindigkeit und Strahloszillationsfrequenz eine herausragende Bedeutung bei der Verarbeitung von Alloy 617occ zukommt. Im Laufe der Verfahrensentwicklung kristallisierte sich heraus, dass es zweckmäßig ist, mit moderaten Laserleistungen bei gleichzeitiger Verwendung eines Laserstrahlfokussdurchmessers von  $300\ \mu\text{m}$  und geringen Schweißgeschwindigkeiten zu arbeiten. Im Ergebnis entstehen Schweißnähte mit einem Nahtaufbau von 1 bis  $1,5\ \text{mm}$  je Schweißlage. Vorteil ist, dass die Streckenergien zwischen  $1,2$  bis  $2,4\ \text{kJ/cm}$  liegen und damit sehr gering gehalten werden. Gleichzeitig kann das geringe Schmelzbadausmaß trotzdem hinreichend lange flüssig gehalten werden, sodass in der Schmelze enthaltene Gase entweichen können und Poren weitestgehend vermieden werden. Einfluss auf die Schmelzbadausbildung und -dynamik sowie die Entgasung kann zudem nicht nur über die Schweißgeschwindigkeit und Laserstrahlleistung, sondern auch über die Strahloszillation genommen werden. So zeigte sich, dass bei gleichen Schweißparametern die Erhöhung der Strahloszillationsfrequenz eine bessere Entgasung des Schmelzbades bewirkt.

Die Laser-MES Prozessentwicklung zur Anwendung für Alloy 617occ wurde an Rohrabschnitten in Schweißposition PA verschiedener Wandstärken ( $12,5$ ;  $32$  und  $50\ \text{mm}$ ) durchgeführt. Bild 4 zeigt die Fugenvorbereitung einer Schweißprobe mit einer

Schweißnahttiefe von  $12,5\ \text{mm}$ . Die Vorbereitung entspricht dabei einer Y-Naht mit einer Stegbreite von  $2\ \text{mm}$  und einem Flankenöffnungswinkel von  $1,1^{\circ}$ . Die Probenvorbereitungen der  $32$  und  $50\ \text{mm}$  tiefen Schweißungen sind entsprechend Bild 4a skaliert worden.

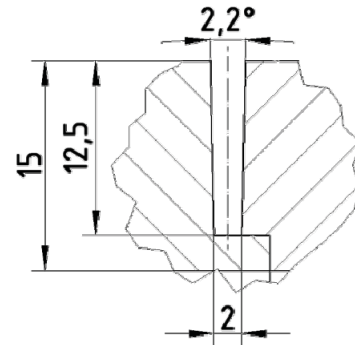


Bild 4a: Fugenvorbereitung der Schweißproben

Die jeweiligen Rohrabschnitte wurden, wie in Bild 5 dargestellt, mit Hilfe einer Presspassung mechanisch gefügt und anschließend einseitig in einer Drehachse eingespannt und auf Plan- und Rundlauf geprüft. Die Füllschweißungen wurden mit Hilfe einer Drahtelektrode aus Alloy 617 mit Durchmesser  $1,2\ \text{mm}$  realisiert. Als Schutzgas kam bei den bisherigen Untersuchungen reines Argon zum Einsatz.



Bild 5: Einspannverhältnisse der Rohrabschnitte

## 6 Ergebnisse und Bewertung der Füllschweißungen

Im Ergebnis entstehen Schweißnähte mit einem sehr gleichmäßigen Lagenaufbau, wie in Bild 6 zu sehen ist.



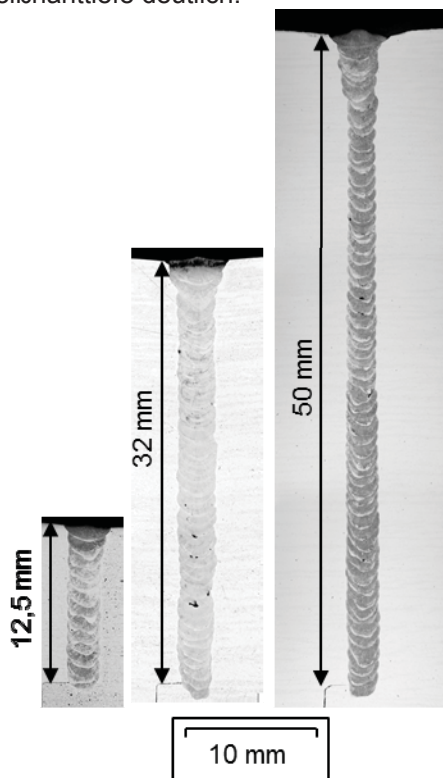
Bild 6: Querschliff einer  $12,5\ \text{mm}$  tiefen Schweißnaht

Die Schweißungen zeigen, wie in der Detailaufnahme in Bild 7 zu sehen ist, einen gleichmäßigen homogenen Lagenaufbau und eine sichere Flankenanbindeung.



**Bild 7:** Detailaufnahme Lagenaufbau

In Bild 8 sind exemplarisch Querschliffe der verschiedenen Schweißnahttiefen dargestellt. In den Übersichtsaufnahmen werden nochmals die extremen Aspektverhältnisse von Schweißnahtbreite zu Schweißnahttiefe deutlich.

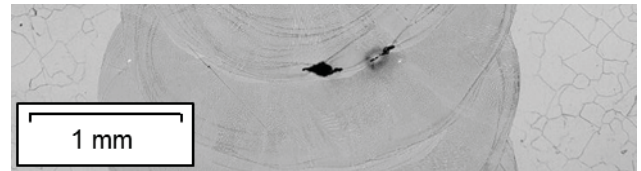


**Bild 8:** Makroschliffe der Schweißverbindungen

Die metallographischen Untersuchungen der vorliegenden Schweißnähte mittels Auflichtmikroskop und REM zeigten keine Hinweise auf Heißrisse vom Typ Erstarrungs- oder Wiederaufschmelzrisse und ebenso keine Flankenbindefehler. Als detektierbare Schweißnahtunregelmäßigkeiten sind vereinzelt Lagenbindefehler in Nahtmitte (siehe Bild 9), welche sich systematisch in den Schliffbildern zeigen, und vereinzelt Prozessporen zu finden.

Diese Poren sind jedoch als unkritisch einzustufen, da ihre Anzahl und Größe gering sind und die Grenzwer-

te für die Unregelmäßigkeiten der Bewertungsgruppe B nach EN ISO 13919-1 oder EN ISO 5817 genügen.

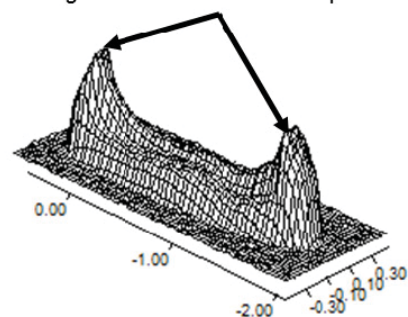


**Bild 9:** Detailaufnahme eines Lagenbindefehlers

Zur Klärung der Ursache der Lagenbindefehler rückte die bis dato angewendete Nahtaufbaustrategie noch einmal in den Fokus der Betrachtungen.

Es zeigte sich, dass die Einschweißung in Nahtmitte der zu überschweißenden Nahtlage aufgrund einer zu geringen Einschweißtiefe zum Teil nicht gewährleistet war. Zur Vergrößerung dieser sind beim Laser-MES zwei Strategien zweckmäßig. Zum einen kann durch eine Anhebung der gesamten Streckenenergie eine sichere Einschweißung gewährleistet werden. Nachteilig an dieser Vorgehensweise ist der damit verbundene erhöhte Energieeintrag in die Bauteile. Zum anderen kann dank der Verfahrensspezifika des Laser-MES eine Veränderung der lateralen Leistungsdichteverteilung ohne Anhebung der Streckenenergie vorgenommen werden. Zur Untersuchung der Ist-Leistungsdichteverteilung wurde der in den Schweißversuchen oszillierte Laserstrahl mit Hilfe eines Strahlvermessungsgerätes untersucht. Bild 10 zeigt, dass in den Umlenkpunkten Energiemaxima zu finden sind. Diese sind erwünscht und bewusst erzeugt, um eine sichere Flankenanbindeung und damit Flankenbindefehler zu vermeiden, jedoch gegenüber der Nahtmitte – wo zudem der Zusatzwerkstoff zugeführt wird – deutlich überhöht.

Energiemaxima in den Umkehrpunkten

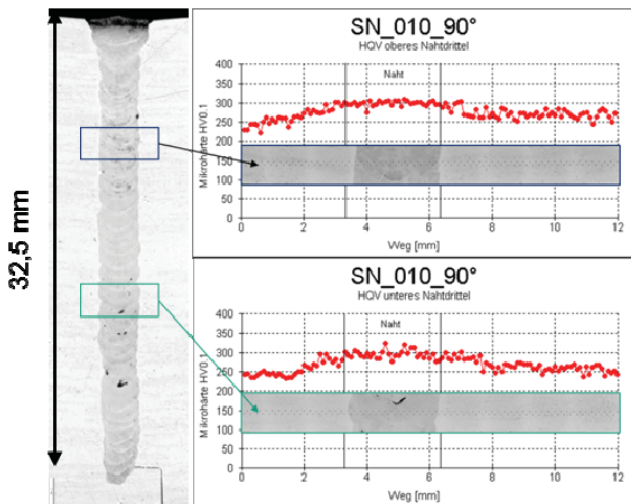


**Bild 10:** Laterale Leistungsdichteverteilung des oszillierten Laserstrahls

Eine Anpassung der lateralen Leistungsdichteverteilung durch Veränderung der lokalen Bahngeschwindigkeit oder Leistungsmodulation bzw. Verwendung optimierter Scankonturen wird daher angestrebt. Die Forschungsarbeiten zu dieser Themenstellung sind Bestandteil der weiteren Untersuchungen.

Erste Härtemessungen an Schweißungen (Bild 11) zeigen nur geringe Härteunterschiede zwischen unbeeinflusstem Grundwerkstoff (lösungsgeglüht), WEZ und Schweißgut. Die Messergebnisse liefern einen kontinuierlichen Härteverlaufsanstieg um ca.

50HV0.1. Der Anstieg ist konstant über die gesamte Nahttiefe. Exemplarisch sind in Bild 11 zwei Härtemessspuren dargestellt.



**Bild 11:** Härteverlaufsmessung GWS–Naht–GWS

Zur weiteren Absicherung der Schweißprozessentwicklung wurde zudem die chemische Zusammensetzung des unbeeinflussten Grundwerkstoffes, der WEZ und des Schweißgutes durch EDX-Analysen in Form von Linienscans näher untersucht. Dabei konnte kein für die Hochtemperatureigenschaften schädigender Legierungselementeabbau detektiert werden, sodass erwartet ist, dass die mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht über die gesamte Nahttiefe gleichbleibend sind.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Laboruntersuchungen haben das große Potential des Laser-MES zum Fügen dickwandiger Bauteile aus Alloy 617oc aufgezeigt. Die entwickelte Systemtechnik erlaubt eine für die Prozessstabilität enorm wichtige, genaue Positionierung von Zusatzwerkstoff zu Laserstrahl sowie eine visuelle Prozesskontrolle. Eine Weiterentwicklung des *remoweld*<sup>®</sup> MES Schweißkopfes zur sicheren Vermessung der angestrebten Spaltgeometrien wird derzeit implementiert und die Systemtechnik erweitert. Die bisherigen Schweißergebnisse sind vielversprechend, in den Schlißergebnissen jedoch z.T. noch fehlerbehaftet. Die Unregelmäßigkeiten können jedoch mit den aufgezeigten Strategien mit hoher Wahrscheinlichkeit abgestellt werden, sodass mit der Anpassung und Optimierung der Prozessführung eine weitere Steigerung der Schweißnahttiefe bis zu 200 mm mittels Laser-MES angestrebt wird. Ein Ziel ist es, bei den genannten Schweißnahttiefen gegenüber dem Stand der Technik eine deutliche Reduzierung an benötigtem Schweißzusatzwerkstoff und eine Verkürzung der Prozesszeit gegenüber den konventionellen Schweißverfahren zu erreichen. Sollte die bisherige Skalierbarkeit weitere Anwendungen – auch bei größeren Schweißnahttiefen – finden können, dann liegt das derzeit abschätzbare Einsparpotential bei 60 bis 80% für den SZW im Vergleich zum WIG-Engspalt-Verfahren [2].

Der Fokus der weiteren Forschungsarbeit liegt auf der Charakterisierung der Schweißungen hinsichtlich der statischen, Ermüdungs- und Kriechfestigkeit sowie eine bessere Absicherung der Schweißnahtqualität durch die bereits genannten Ansätze sowie die Erprobung von Gasgemischen mit reduzierenden Anteilen zur Optimierung der Einbrandverhältnisse. Des Weiteren stehen Wurzelschweißversuche insbesondere mit Betrachtungen zur Ausbildung der Wurzelgeometrie im Zentrum der weiteren Untersuchungen.

## Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse sind im Rahmen der wissenschaftsorientierten, strategischen Allianz des Fraunhofer-IWS, des Fraunhofer-IWM und des Fraunhofer-IKTS entstanden und beinhalten Auszüge aus dem Projekt „Laser-Mehrlagen-Engstspaltschweißen für Schlüsselkomponenten zukünftiger energieeffizienter und ressourcensparender Hochtemperatur-Prozesse“. Gefördert im Rahmen der Internen Programme der FhG, Fördernummer WISA 828 505.

Im Namen der Projektbeteiligten sei an dieser Stelle für die Förderung herzlich gedankt.

## Literatur

- [1] <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Strommarkt-der-Zukunft/zahlen-fakten.html>, Stand 04.07.2016
- [2] Barthoux, J.-P.; Schnee, D.: WIG-Engspalt-Verfahren ohne Alternative bei vielen Anwendungen im Kesselbau. In: Das IndustrieMagazin 2009, Nr. 9, S. 32-35.
- [3] Dittrich, D.; Schedewy, R.; Brenner, B.; Beyer, E.: Laserstrahl-Mehrlagen-Engstspaltschweißen zum verzugsarmen und heißrissfreien Fügen von Aluminiumlegierungen im Dickblechbereich. In: Schweißen und Schneiden 67 (2015), Nr. 3, S. 114-117
- [4] Göbel, G.; Brenner, B.; Beyer, E.: New application possibilities for fiber laser welding. ICALEO 2007, 26th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Congress proceedings, October 29 - November 1, 2007, Orlando, FL, USA
- [5] Klenk, A.: Anforderungen an Schweißverbindungen in Hocheffizienzkraftwerken. Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart. Cluster-Forum Schweißtechnik im Kraftwerksbau. SLV München; München, 2009
- [6] Klöwer, J.; Gehrman, B.: Nickellegierungen im Kraftwerksbau. In: Stahl (2007), Nr. 4, S. 11-14
- [7] Lehmkuhl, C.; Schröder, H. C.; Stahl, F.; Gräb, T.: Werkstoffherausforderungen im Bereich der Hochtemperaturtechnologie- Risiken und Chancen bei der Herstellung und dem Betrieb von Anlagen. In: DVS-Berichte Band 291, S. 47-51; 70; DVS Media GmbH; Düsseldorf, 2013

- [8] Maier, G.: Mikrostruktur, Verformung und Lebensdauerstruktur der Legierung 617B. Experimente, Modelle und Bauteilvorhersagen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Hg. v. Shaker Verlag; Aachen, 2013
- [9] N.N.: Mehr Effizienz, weniger CO<sub>2</sub>: Neuer Werkstoff für 700-Grad-Kraftwerke bereit für praktische Testphase. Fachpresse-Mitteilung: ThyssenKrupp AG, 29.04.2010
- [10] N.N.: VdTÜV-Werkstoffblatt 573. Hochwarmfeste Nickelbasislegierung NiCr23Co12MoB; Werkstoff-Nr. 2.4673. Stab, Schmiedestück. Hg. v. Verband der TÜV e.V.; Köln, 2013
- [11] Reisgen, U.; Wieland, S.; Willms, K.: Fügen eines dickwandigen Längsnahtrohres aus der hochwarmfesten Nickelbasislegierung Alloy 617B. In: DVS-Berichte Band 322, S. 64-70; DVS Media GmbH; Düsseldorf, 2016
- [12] Speicher, M.; Hueggenberg, D.; Klenk, A.; Zickler, S.; Metzger, K.: Materials for Advanced Ultra-Supercritical Fossil-Fuel Power Plants: Materials Properties, Microstructure, and Component Behavior. In: Energy Technology (2016), Nr. 4, S. 187–192.
- [13] Standfuß, J.; Beyer, E.; Brenner, B.; Schedewy, R.; Dittrich, D.; Strohbach, R. (2015): Laser-Multi-Pass-Welding of aluminium and steel with sheet thickness above 50 mm. ICALEO 2015, 34th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Conference proceeding, October 18 - 22, 2015. Atlanta, GA, USA