

Beeinflussung des Kornwachstums beim Schweißen austenitischer Schweißverbindungen, mit dem Ziel der verbesserten Ultraschallprüfbarkeit

Sabine WAGNER*, Sandra DUGAN*, Martin BARTH**, Frank SCHUBERT**, Bernd KÖHLER**

* MPA Universität Stuttgart (Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart)

** Fraunhofer- IZFP Institutsteil Dresden

Kurzfassung. Die Ultraschallprüfbarkeit austenitischer Schweißnähte wird erheblich durch die Ausprägung grober Stängelkristalle erschwert, speziell bei eingeschränkter Zugänglichkeit. Ziel der hier vorgestellten Projektarbeiten ist es, die Kornstruktur während des Schweißprozesses, also in der Erstarrungsphase, zu beeinflussen im Hinblick auf eine prüfgerechte Kornstruktur, welche die Ultraschallausbreitung in der Schweißnaht erleichtert. Es wird angestrebt, ein feineres Korn zu erzeugen, indem das stängelartige Wachstum der Kristallite gestört wird. Metallografische Untersuchungen zeigen, dass mittels magnetischer Beeinflussung während des Schweißprozesses sowie durch die Anwendung von WIG-Lichtbogen-Pulsen eine veränderte Kornstruktur im Schweißnahtgefüge erreicht werden kann. Die Optimierung und Bewertung der Einflussparameter erfolgt anhand von Ultraschall-Testkörpern mit künstlich eingebrachten Testfehlern. Anhand von Ultraschallprüfungen und Ultraschallsimulationen wurde die Durchschallbarkeit der veränderten Schweißnähte untersucht. Es ergaben sich Hinweise für eine veränderte Durchschallbarkeit der Schweißnähte mit beeinflusster Kornstruktur. Laservibrometer-Messungen an den Schweißnähten dienten zur Entwicklung eines realistischen Gefügemodells für die Ultraschallsimulationen. In diesem Beitrag werden die verschiedenen Methoden zur Beeinflussung der Erstarrung beim Schweißprozess dargestellt und der Einfluss auf die Durchschallbarkeit und den Fehlernachweis in der Schweißnaht anhand der Ergebnisse von Ultraschallprüfungen demonstriert. Die Ultraschallsimulationen und Laservibrometer-Messungen wurden vom Projektpartner am Fraunhofer-IZFP Dresden durchgeführt (Posterbeitrag: (P49) [1]) und werden hier nicht dargestellt. Für die hier dargestellten Untersuchungen wurde der Weg der Beeinflussung beim Schweißen gewählt.

1. Einführung

1.1. Motivation

Für den sicheren Betrieb druckführender Komponenten, die hoher Spannung und Temperatur ausgesetzt sind, ist die Integrität der Schweißverbindung von entscheidender



Bedeutung. Zur zerstörungsfreien Prüfung insbesondere der dickwandigeren Schweißverbindungen wird die Ultraschallprüfung eingesetzt. Hierbei erfolgt die Prüfung von beiden Seiten der Naht, sofern zugänglich. Kann nur von einer Seite geprüft werden, muss die Schweißnaht durchschallt werden, um die Gegenseite inklusive Nahtnebenbereich beurteilen zu können [2], [3]. Die Herausforderung bei der Ultraschallprüfung von austenitischen Schweißnähten besteht in der Charakteristik des erstarrten Schweißgutes: deutliche Grobkornbildung mit bevorzugter Orientierung, (Stängelkristalle), erschwerend kommt die elastische (akustische) Anisotropie des Materials hinzu. Daraus ergeben sich lokale Änderungen der Schallgeschwindigkeit, es kommt zur Ablenkung und Streuung der Schallwellen an den Korngrenzen und der Fusionslinie, zur Wellenumwandlung und zu Änderungen der Ausbreitungsrichtung. Diese Effekte führen zu einer Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses und können in einer Fehlinterpretation der Ultraschallsignale, z.B. einer fehlerhaften Lagebestimmung der erhaltenden Anzeigen, resultieren.

Da austenitische Schweißverbindungen in weiten Bereichen (Nuklear-, Petrochemische-, Chemische Industrie, Luftfahrt sowie in konventionellen Kraftwerken mit erhöhten Betriebstemperaturen) Anwendung finden, ist es erforderlich, eine gute Prüfbarkeit dieser Bauteile zu ermöglichen. Dies kann erreicht werden durch verbesserte Prüfmethoden und -techniken [4], durch konstruktive Verbesserungen oder durch Beeinflussung des austenitischen Gefüges, hinsichtlich geeigneterer Durchschallbarkeit. Als konstruktive Maßnahme wird das Schweißen von Engspaltnähten empfohlen. Durch die Reduzierung des Schweißnahtvolumens geht man von einer Reduzierung des Einflusses auf den Ultraschall aus. Aber auch hier können grobe Strukturen beobachtet werden, die durch mehrere Schweißlagen hindurch wachsen. Insbesondere in der Schweißnahtmitte können sehr lange, in Waddickenrichtung orientierte Kristallite entstehen, an deren Grenzfläche Ultraschall reflektiert und gestreut wird [5], [6].

1.2. Beeinflussungsmöglichkeiten des austenitischen Gefüges

Für Körner, die im Bezug zur Ultraschall-Wellenlänge klein und zufällig orientiert sind, kann eine Beeinflussung der akustischen Eigenschaften durch das anisotrope Material in makroskopischer Größenordnung nicht beobachtet werden. Es ist also ein feines Korn mit zufälliger Orientierung für eine verbesserte Ultraschallprüfbarkeit anzustreben.

In der Literatur finden sich zahlreiche Studien zur Kornfeinung des Gefüges mit dem Ziel verbesserte mechanisch-technologische Eigenschaften zu erhalten, nicht zur Verbesserung der Prüfbarkeit. Zu dem handelt es sich oft um volumenhafte Schmelzen die während des Gießens oder in zylindrischen Tiegeln bei der Erstarrung beeinflusst werden. Die beeinflusste Erstarrung eines Schmelzbades beim Schweißen einer gleichartigen oder Mischverbindung aus austenitischem Werkstoff wird nicht beschrieben.

Für die Beeinflussung des Gefüges selbst wird der Übergang vom zeiligen zum feinen Korn, columnar-to-equiaxed transition CET, angestrebt. Es existieren drei Mechanismen, die diesen Vorgang erzeugen: Dendriten-Fragmentierung, Kornabschmelzung sowie die heterogene Keimbildung [7], [8], [9]. Die zur Erzeugen eines feinen Korns zielführenden Technologien aus der Literaturstudie werden im Folgenden kurz genannt:

Einfluss elektromagnetischer Felder: Magnetfelder beeinflussen über den Magnetohydrodynamischen Effekt das Wachstum der stängeligen Kristallite. Das Elektromagnetische Rühren (EMS) verschiedener flüssiger metallischer Legierungen in volumenhaften Schmelztiegeln wird in [10], [11], [12], [13] als kornfeinend beschrieben. Magnetfelder werden auch eingesetzt um den Lichtbogen während des Plasmaschweißens [14] oder während des Laserschweißprozesses [15], [16] zu beeinflussen. Als Nebeneffekt wird eine veränderte Nahtstruktur bzw. ein verändertes Gefüge beobachtet.

Ultraschallbeeinflussung/ Vibrationen: [17] beschreibt den Einfluss hochenergetischer Ultraschallwellen auf flüssige Metallschmelzen als kornfeinend. Im Unterschied dazu erfolgt die Kornfeinung in [18] durch Ultraschallbehandlungen (US-shock-treatment) des erstarrten Gefüges. Auch hier werden verbesserte mechanische Eigenschaften erzielt.

Einfluss des Schweißprozesses: Ein weiterer Parameter zur Beeinflussung des Gefüges in der Schweißnaht ist der Schweißprozess selbst. Hier können das ausgewählte Verfahren, Energieführung sowie die Prozesssteuerung Einfluss auf die Erstarrung beim Schweißen haben. Führende Schweißgeräte-Hersteller entwickelten Technologien für reduzierten Wärmeeintrag in das Material: z.B. EWM coldArc- oder Fronius CMT-Technologie. Hierbei werden erheblich kürzere Abkühlzeiten erreicht, was dem Wachstum der groben Kornstrukturen entgegensteht.

2. Durchgeführte Arbeiten zur Beeinflussung der Erstarrung beim Schweißen

Anhand der erstellten Literaturstudie sowie aufgrund der langjährigen Erfahrungen an der MPA Stuttgart wurden folgende Parameter ausgewählt und werden im Folgenden näher erläutert: Während des Schweißprozesses kamen Magnetfelder, verschiedene Temperaturen, veränderte Schweißprozesseinstellungen, sowie Vibrationsbeeinflussung zum Einsatz.

Als weiterer Parameter wurde die mechanische Behandlung des erstarrten Schweißguts untersucht. Anhand der im Projekt mit den unterschiedlichen Parametern geschweißten Testkörper wurde der Einfluss der Parameter auf die Kornstruktur sowie auf die Durchschallbarkeit bei der abschließenden Ultraschallprüfung ermittelt.

Zur Herstellung der Testkörper wurden für alle verwendeten Parameter identische Materialien und Abmessungen verwendet, um eine Vergleichbarkeit der Testkörper zu garantieren. Der verwendete Grundwerkstoff (1.4432 bzw. X2CrNiMo17-12-2) wurde in den ersten Versuchen in Form von 2 Platten (d = 16 mm) mittels V-Naht verbunden. In den späteren Versuchen wurde die identische Nahtvorbereitung in eine Platte funkenerosiv eingebracht (Abbildung 1). Dies diente dazu, den Einfluss der handgeschweißten Wurzellagen zu eliminieren. Der Einfluss der Wurzelschweißung stellte sich nach den ersten makroskopischen Untersuchungen als nicht vernachlässigbar heraus.

Die Versuchsnahte wurden mit Zusatzwerkstoff SAS4-IG (Böhler Schweißtechnik Austria GmbH) mehrlagig geschweißt, wobei jede Schweißung aus bis zu 15 Raupen besteht. Aus jeder angefertigten Testschweißnaht wurden der spätere Ultraschall-Testkörper sowie mehrere metallografische Schiffe entnommen.

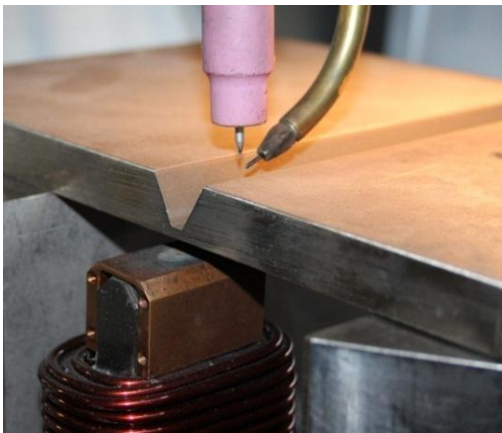


Abbildung 1: Detailaufnahme experimenteller Aufbau mit Elektromagnet, Schweißbrenner, Drahtzufuhr, Nahtgeometrie funkenerosiv hergestellt

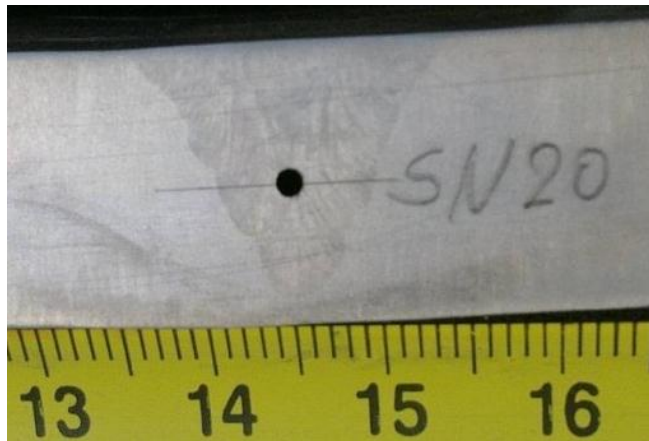


Abbildung 2: Ausschnitt eines Testkörpers mit geätzter Schweißnaht-Stirnseite und Bohrung (künstlicher Reflektor) für die Ultraschall-Untersuchung

Die Testkörper für die Ultraschallprüfung wurden mit einer 1,5 mm Zylinderbohrung in der Schweißnahtmitte über die halbe Testkörperbreite ($l = 20 \text{ mm}$) als künstlicher Reflektor versehen (Abbildung 2).

Das in dieser Studie verwendete WIG-Schweißverfahren, wurde ausgewählt, weil es ein gängiges und für die Anwendungen des Werkstoffes gefordertes Verfahren darstellt. Zur Herstellung der abschließenden Testkörperschweißungen, wurde eine WIG-Schweißanlage (aufbauend auf einer Fronius Magic Wave 2600) im Labor errichtet. Diese verfügt nun neben einem integrierten Drahtzufuhrsystem und einer Steuereinheit für verschiedene Lichtbogen-Betriebsmoden auch über eine mehrachsige Bahnsteuerung sowie Kanäle zur Temperaturerfassung und Steuereinheiten zur Parametermanipulation (Elektromagnet-Ansteuerung).

Zur Untersuchung der Makrostruktur wurden die metallografischen Schliffe angefertigt und geätzt. Die Herausforderung bei der Ätzung bestand darin, die stängelige Struktur der Körner gleichzeitig mit dem Lagenaufbau der Schweißnähte sichtbar zu machen.

2.1. Beeinflussung beim Schweißen

Magnetfeld-Versuche mit Elektromagnet: Basierend auf den Erkenntnissen aus der Literaturstudie wurde ein DC-Elektromagnet mit Pulsbetrieb ausgewählt und mit einem Luftspalt (4 mm) unter der Schweißnaht in Höhe des Schweißbrenners positioniert (Abbildung 1). Aufgrund der existierenden Bahnsteuerung konnte der Elektromagnet unter dem Schweißbrenner während der Schweißung nachgeführt werden.

Es wurden Versuche mit 500 Hz, 100 Hz (Abbildung 3) und 50 Hz Pulsfrequenz des Elektromagneten durchgeführt.

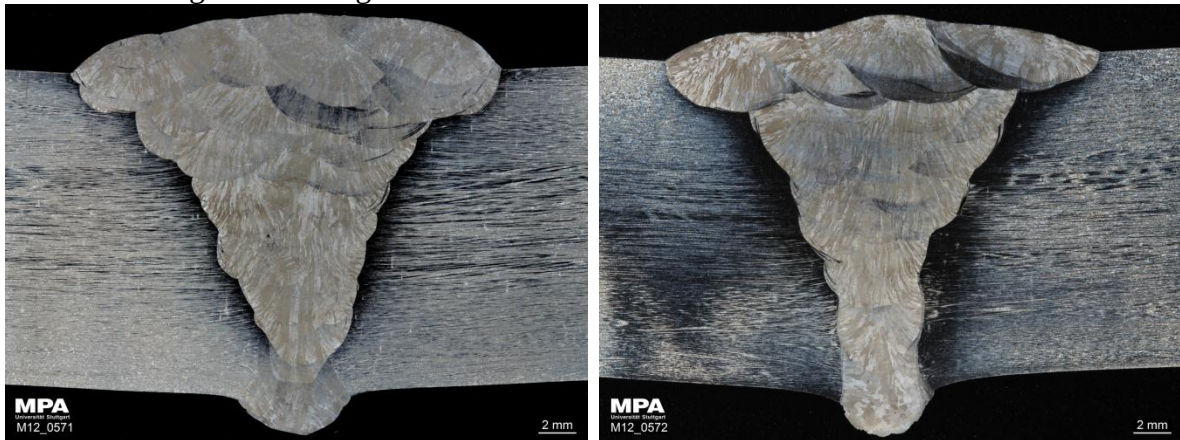


Abbildung 3: Schweißnähte unter Beeinflussung eines Elektromagnet geschweißt:

(li) Magnetfeld gepulst mit 100 Hz, (re) Magnetfeld gepulst mit 500 Hz

Magnetfeld-Versuche mit Permanentmagnet: Um höhere Magnetfelder zu erreichen wurde für weitere Versuche ein starker Permanentmagnet ($H = 0,5 \text{ T}$) eingesetzt. Um im Bereich der flüssigen Schmelze annähernd $0,1 \text{ T}$ zu erreichen wurde der Permanentmagnet in entsprechendem Abstand unter der Schweißnaht platziert und mitgeführt (Abbildung 4). Die Magnetlängsachse war hierbei vertikal orientiert. Bei horizontaler Magnetachse konnte kein stabiler Lichtbogen aufgebaut werden, da die Wechselwirkung mit dem Permanentmagnet zu stark waren. In einem Abstand von 20 mm zwischen Magnet und Schweißnahtunterseite (erodierte Wurzelgeometrie) konnte ein stabiler Lichtbogen zum Schweißen aufgebaut werden und eine Schweißung war gerade noch möglich. Die stark erschwerten Bedingungen führten jedoch zu Bindefehlern in der Schweißnaht (Abbildung 5).

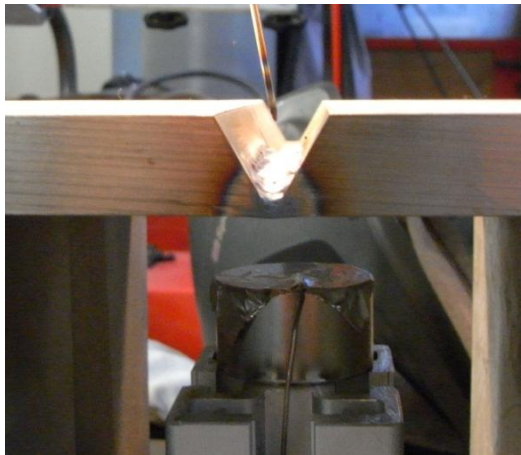


Abbildung 4: Anordnung des Permanentmagnetes unter der Schweißnahtunterseite (Luftspalt 20 mm), die Nachführung erfolgte mit der Bahnsteuerung parallel zum Schweißbrenner.

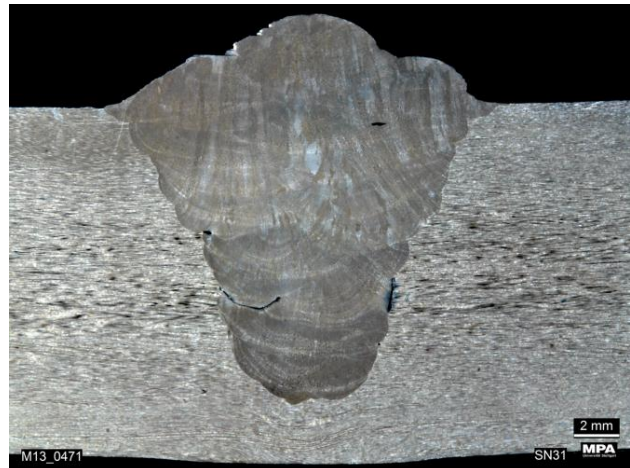


Abbildung 5: Schweißnaht unter Einfluss eines Permanentmagnetes ($H = 80 \text{ mT}$ in der Naht) geschweißt, Schweißfehler durch erschwerte Schweißbedingungen aufgrund des starken Magnetfelds.

Versuche mit gepulstem WIG-Lichtbogen: Erfahrungen und Erkenntnisse aus der Literaturstudie deuten auf einen reduzierten Temperatureintrag des gepulsten Lichtbogens hin. Zur Untersuchung dieses Effektes auf die Ausbildung der Kornstruktur in der Schweißnaht wurden Versuche mit 500 Hz, 100 Hz und 50 Hz Lichtbogen-Pulsfrequenz durchgeführt (Abbildung 6).



Abbildung 6: Schweißnähte mit gepulstem WIG-Lichtbogen geschweißt (li) 50 Hz (Mitte) 100 Hz (re) 500 Hz

Versuche bei unterschiedlichen Zwischenlagen-Temperaturen: Um den Einfluss verschiedener Temperaturführungen auf das Kornwachstum darzustellen wurden Versuche mit der für den Werkstoff geforderten Zwischenlagen-Temperatur $T_{ip} = 150 \text{ °C}$ [19], stark überhöhter Zwischenlagen-Temperatur $T_{ip} = 210\text{-}245 \text{ °C}$ (Abbildung 7) sowie bei $T_{ip} = \text{Raumtemperatur (RT)}$ durchgeführt.

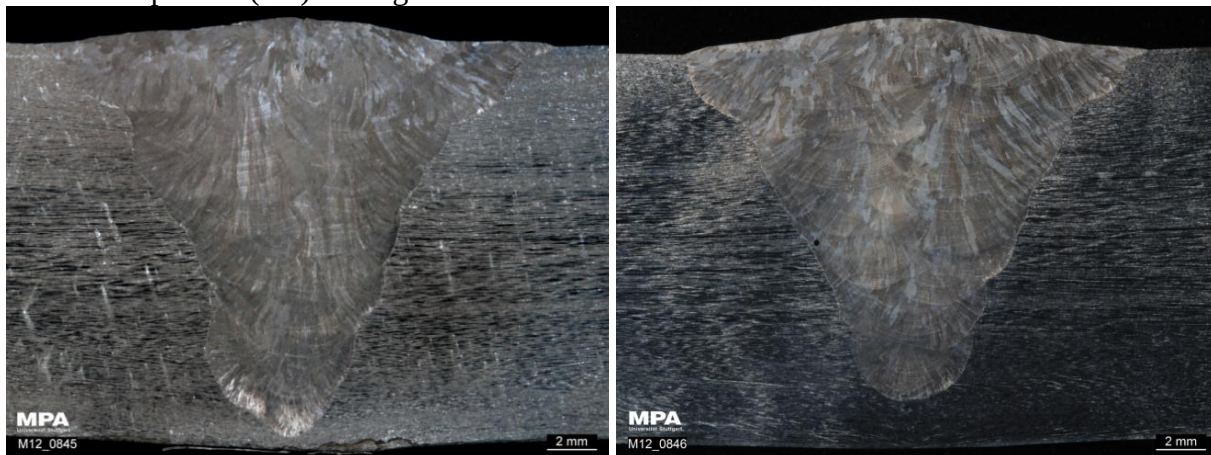


Abbildung 7: Schweißnähte mit unterschiedlichen Zwischenlagen-Temperaturen (li) $T_{ip} = \text{RT}$ (re) $T_{ip} = 245 \text{ °C}$

Mechanische Vibrationen beim Schweißen: In Untersuchungen von [20], [21] [22] konnten verbesserte mechanisch-technologische Eigenschaften durch gezieltes Einbringen von mechanischen Vibrationen in die Schmelze erreicht werden. Für die Versuche dieser Studie wurde die zu schweißende Grundwerkstoffplatte mit entsprechender Nahtvorbereitung auf einem Shaker platziert (Abbildung 8). Während des Schweißens wurden die Vibrationen ($f = 100$ Hz, Amplitude = 0,5 mm) direkt auf das Schmelzbad übertragen. Es konnte sofort eine veränderte Erstarrung der Schweißraupen beobachtet werden. Die Makroskopische Aufnahme zeigt die Abbildung 9.

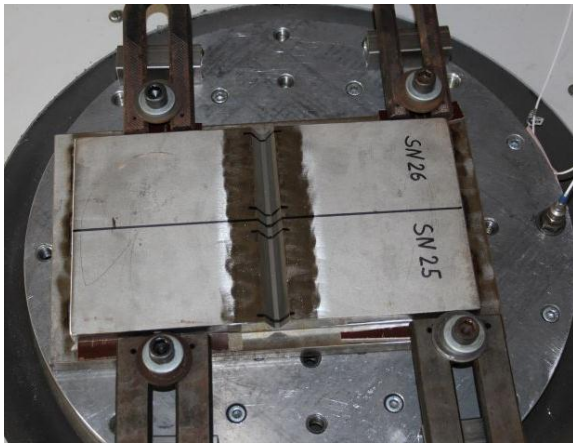


Abbildung 8: Grundwerkstoffplatte mit erodierter Nahtvorbereitung, festgespannt auf dem Shaker



Abbildung 9: Gefüge unter mechanischen Vibrationen, induziert durch einen Shaker ($f = 100$ Hz, Amplitude = 0,5 mm) erstarrt.

Kombinierte Parameter: Um den Effekt auf die Ausbildungen des veränderten Gefüges zu verstärken, wurden die Parameter WIG-Lichtbogenpuls und gepulster Elektromagnet kombiniert: 100 Hz WIG-Puls kombiniert mit 100 Hz Elektromagnet-Puls, 100 Hz WIG-Puls kombiniert mit 55 Hz Elektromagnet-Puls (Abbildung 10).

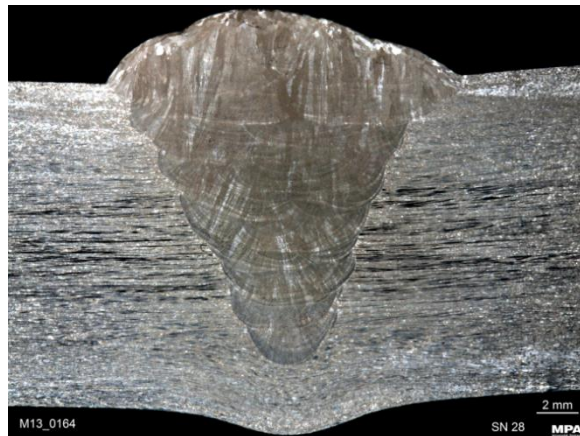
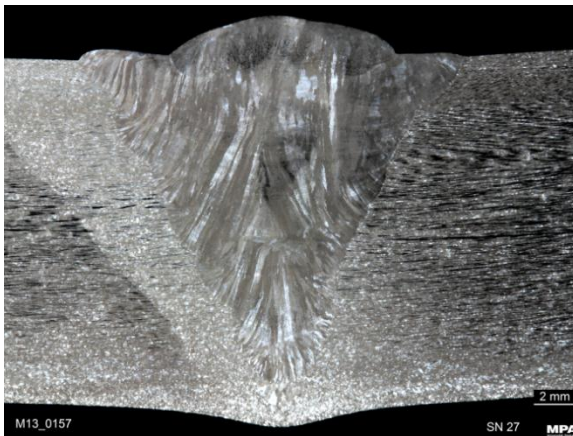


Abbildung 10: Kombinierte Beeinflussungsparameter:
(li) 100 Hz WIG-Puls + 100 Hz E-Magnet-Puls (re) 100 Hz WIG-Puls + 55 Hz E-Magnet-Puls

2.2. Beeinflussung der erstarrten Schweißnaht

Ein weiterer Versuch zur Feinung von stängeligen Strukturen ist, die mechanische Bearbeitung des Gefüges nach dem Erstarren. Für diese Versuche wurde nach jeder geschweißten Raupe ein Pressluftmeißel mit definierter Geometrie (runder Meißel) und Frequenz (30 Hz) über die erstarrte Naht ($T = 100^\circ\text{C}$) geführt (Abbildung 11). Die Makroskopische Aufnahme zeigt die Abbildung 12.

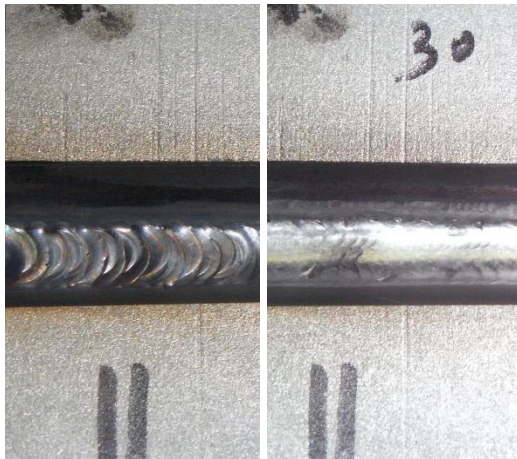


Abbildung 11: Schweißraupe nach Erstarren (li) und nach der mechanischen Bearbeitung der erstarrten Raupe mit dem Pressluftmeißel (re)

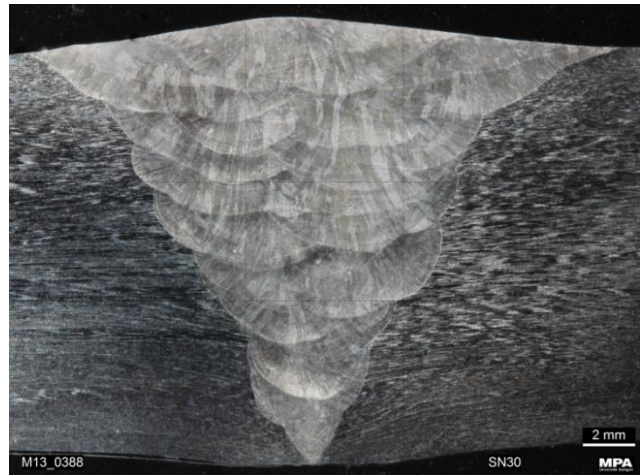


Abbildung 12: Schweißnaht mit mechanischer Behandlung nach dem Erstarren jeder einzelnen geschweißten Raupe mit Hilfe eines Pressluftmeißels

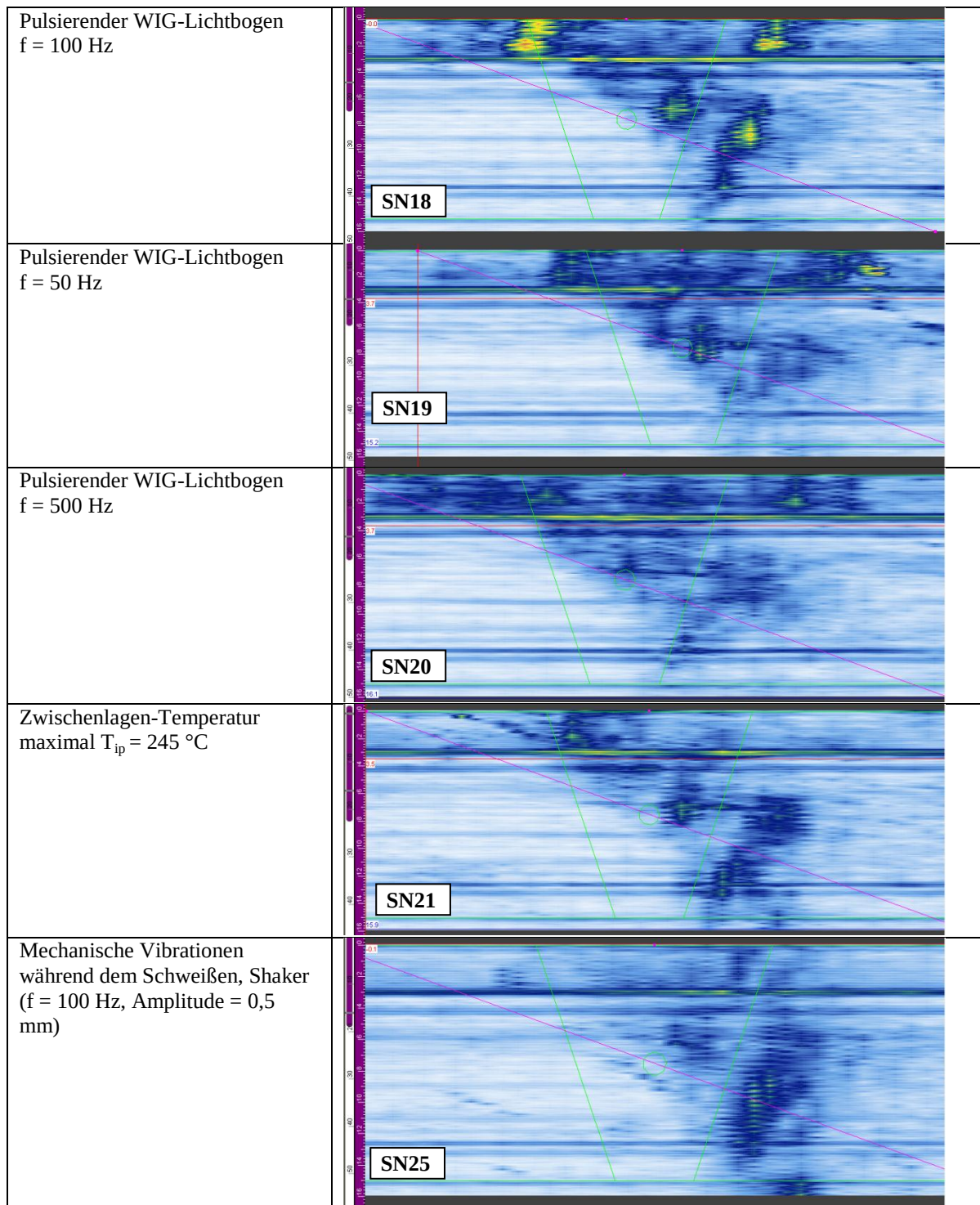
3. Ultraschall-Prüfungen – Durchführung und Bewertung

Die hergestellten Testkörper wurden mechanisiert mit Ultraschall-Phased-Array Prüftechnik mit dem kommerziellen Prüfgerät Olympus Omniscan geprüft. Als Testreflektor diente jeweils die 1,5 mm Zylinderbohrung in Schweißnahtmitte (Abbildung 2). Es wurden mehrere mechanisierte Prüfungen für jeden Testkörper durchgeführt, mit jeweils erneutem Einbau und Justierung in der Prüfanlage, um die Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse zu demonstrieren. Die Prüfung erfolgte als Linienscan quer zur Schweißnaht, mit Fließwasser-Ankopplung. Um möglichst ungünstige Bedingungen für die Ultraschallausbreitung zu realisieren, wurde die Prüfung mit Transversalwelle bei einer Prüffrequenz von $f = 2,25$ MHz bei verschiedenen Einschallwinkeln durchgeführt. Für die Analyse der Durchschallbarkeit wurde der 70° Einschallwinkel im B-Bild dargestellt, Tabelle 1. Die Lage von Schweißnaht und Bohrung sind im B-Bild ergänzt (grüne Linien), um die Interpretation der Ultraschallsignale zu erleichtern.

Ziel dieser Prüfungen war es, diejenige Schweißnaht herauszufinden, die unter den Prüfbedingungen die größtmögliche Übereinstimmung mit der tatsächlichen Lage der Bohrung zeigt. Nach den ersten Scans wurde festgestellt, dass ein stark verändertes Gefüge in der makroskopischen Aufnahme nicht zwingend eine bessere Durchschallbarkeit oder Lokalisierung der Bohrung mit sich bringt.

Tabelle 1: Übersicht der Ultraschall-Scans

Parameter	B-Bild aus Phased Array Prüfung für 70° Einschallwinkel Prüfkopf Olympus 2L16(PA), Transversalwelle, $f = 2,25$ MHz, Kennzeichnung der Nahgeometrie und Lage der Bohrung (grüne Linien)
Referenztestkörper ohne Beeinflussung unter üblichen Bedingungen geschweißt	



Die Zusammenstellung der B-Scans zeigt, dass es deutliche Auswirkungen auf die Ultraschall-Signale durch die beeinflussten Gefüge gibt. Bei den Nähten SN17-19 kann ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis für das Signal der Bohrung erreicht werden.

Bei SN17 handelt es sich um eine Referenzschweißung ohne jegliche Beeinflussung. Das Signal der Bohrung wird mit gutem Signal-Rausch-Abstand dargestellt, aber stimmt nicht mit der Lage überein. Ein starkes Rauschen aus dem Gefüge ist ebenfalls zu erkennen.

Die Schweißnähte SN18-20 repräsentieren die Versuche mit verschiedenen Pulsraten des WIG-Lichtbogens. SN19 zeigt, dass bei kleinster Pulsrate für den Ultraschall die besten Ergebnisse erzielt werden können: das Rauschen aus dem Gefüge ist gering, bei gleichzeitiger guter Übereinstimmung des Signals der Bohrung mit der tatsächlichen

Position. Im Schliffbild (Abbildung 6, Mitte) erscheinen die Körner auch stärker abgelenkt in jeder Schweißlage sowie kürzer in der Ausdehnung. Die im B-Bild für SN18 an der Oberfläche des Testkörpers erkennbaren Signale stammen von Schlagzahlen, die sehr nah an der Schweißnaht angebracht wurden. Für SN20 können keine Verbesserungen hinsichtlich der Durchschallbarkeit gefunden werden. Ein diffuses Rauschen aus dem Gefüge ist über den gesamten zu analysierenden Bereich verteilt. Die Bohrung ist nicht mit ausreichendem Signal-Rausch-Abstand nachweisbar. Das Gefügebild zeigte auch eine eher starke Ausprägung der stängeligen Strukturen (Abbildung 6, rechts).

Für die Versuche mit erhöhter Temperatur (SN21) wurden stärkere Ausprägungen erwartet als im Schliffbild tatsächlich zu sehen sind (Abbildung 7, rechts). Der Ultraschall-B-Scan zeigt ein starkes Rauschen aus dem Gefüge, das Signal der Bohrung ist gut erkennbar, stimmt jedoch nicht mit der tatsächlichen Position überein.

Für die Versuche unter mechanischen Vibrationen (SN25) wurden hinsichtlich der Gefügestruktur starke Veränderungen erwartet, aufgrund der deutlich veränderten Erstarrung der Raupen beim Schweißen. Eine starke Schuppenstruktur mit sehr kurzen Erstarrungszeiten wurde beobachtet, was auf eine schnelle Abkühlung des Schmelzbades schließen lässt. Das Gefüge zeigt veränderte Orientierungen, aber noch immer ausgeprägtes Wachstum der stängeligen Kristallite (Abbildung 9). Der B-Scan zeigt ein starkes Rauschen aus dem Gefüge. Die Bohrung konnte nicht erfasst werden.

4. Zusammenfassung

Die Möglichkeit der Beeinflussung der Erstarrung austenitischer Schweißnähte beim Schweißen durch Anwendung verschiedener Einflussparameter wurde untersucht. Das Ziel war es eine Verbesserung der Ultraschallprüfbarkeit zu erreichen. Eine Literaturstudie lieferte erste Anhaltspunkte, wie eine austenitische Schmelze im flüssigen oder erstarrten Zustand beeinflusst werden kann. Die durchgeführten Experimente ergaben für alle angewandten Parameter eine Veränderung der Kornstruktur. Es konnte eine Ablenkung bei der Orientierung der stängeligen Strukturen erzeugt werden. Das Wachstum durch mehrere Schweißlagen hindurch wurde auch erfolgreich unterbrochen. Es zeigte sich jedoch auch, dass die Erfahrungen mit volumenhaften Schmelztiegeln aus der Literatur nicht ohne weiteres auf Schmelzbäder mit realistischer Schweißnahtgeometrie und kleinem Volumen übertragen werden können. Eine deutliche Kornfeinung, wie aus den Erfahrungen von großvolumigen Schmelzen zu erwarten gewesen wäre, trat nicht ein. Die an den Testkörpern mit den beeinflussten Schweißnähten durchgeführten Ultraschallprüfungen zeigten deutliche Unterschiede in der Durchschallbarkeit bzw. beim Nachweisvermögen des Testreflektors. Als weiteres Ergebnis ergab sich, dass eine stark veränderte Kornstruktur nicht zwangsläufig eine starke Veränderung in den Ultraschall-Signalen zur Folge hat. Bei der Ultraschallprüfung konnte für die Schweißung mit dem Parameter WIG-Lichtbogen-Pulsfrequenz $f = 50 \text{ Hz}$ die deutlichste Verbesserung im Signal erreicht werden. Die Bohrungsposition konnte für diese Schweißnaht am genauesten bestimmt werden.

Förderhinweis

Dieses Projekt wurde unterstützt und gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, unter der Fördernummer 1501384.

Referenzen

- [1] F. Schubert, M. Barth, B. Köhler, S. Dugan und S. Wagner, „Vermessung und Simulation der Ultraschall-Wellenausbreitung in Schweißnähten mit magnetisch beeinflusster Kornstruktur,“

Berichtsband DGZfP-Jahrestagung, Dresden, 2013.

- [2] P. Williams, Ultrasonic testing of austenitic steels (a selectiv bibliography 1958-1975)., Bibliography 252, London: Central Electricity Generating Board, 1976.
- [3] E. Neumann et.al., Ultraschallprüfung von austenitischen Plattierungen, Mischnähten und austenitischen Schweißnähten, Kontakt & Studium Hrsg., Bd. 377, Expert-Verlag, 1995.
- [4] K. Matthies et.al., Ultraschallprüfungen von austenitischen Werkstoffen, Berlin: DVS Media GmbH, 2009.
- [5] R. Schmid, „Ultraschallprüfung von austenitischen Plattierungen, Mischnähten und austenitischen Schweißnähten,“ in *Kontakt und Studium*, Bd. 377, Expert-Verlag, 1995.
- [6] S. Dugan, U. Völz und F. Walte, „Ultraschallprüfung an Schweißnähten aus Nickellegierung mit realistischen Testfehlern,“ *MPA Seminar*, Stuttgart, 2011.
- [7] S. Kou und Y. Le, „Welding Parameter and the Grain Structure of Weld Material - A thermodynamic Consideration,“ *Metallurgical Transaction A*, Volume 19A, pp. 1075-1082, 1988.
- [8] A. Hellawell, S. Liu und S. Lu, „Dendrite Fragmentation and the Effect of Fluid Flow in Castings,“ *JOM*, March, pp. 18-20, 1997.
- [9] J. Gu, C. Berckermann und A. Giamei, „Motion and Remelting of Dendrite Fragments during Directional Solidification of Nickel-Base Superalloy,“ *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volumen 28A, pp. 1533-1542, 1997.
- [10] D. Lu, „Refinement of primary Si in hypereutectic Al-Si alloy by electromagnetic stirring,“ *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 13 - 18, 2007.
- [11] Y.-L. Gao, „Comparative study on structural transformation of low-melting pure Al and high-melting stainless steel under external pulsed magnetic field,“ *Materialwissenschaft und Werkstofftechnologie*, pp. 385 - 395, 2004.
- [12] X. D. Wang, „Two kinds of magnetic fields induced by one pair of rotating permanent magnets and their application in stirring and controlling molten metal flows,“ *Journal of Crystal Growth*, pp. e1473 - e1479, 2005.
- [13] W. Jin, „Grain refinement of superalloy IN100 under the action of rotary magnetic fields and inoculants,“ *Materials Letters*, pp. 1585 - 1588, 2008.
- [14] J. Cheng, „Effect of electromagnetic stirring on the microstructure and wear behavior of iron-based composite coatings,“ *Journal of University of Science and Technology Beijing*, Number 4, p. 451, August 2008.
- [15] P. Berger und T. Graf, Gestaltung und Kontrolle des Nahtdurchhangs beim Schweißen, IGF-Vorhaben 14.959 N, 2008.
- [16] D. Lindenau, Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen, Dissertation IFSW Universität Stuttgart: Herbert Utz Verlag GmbH München, 2006.
- [17] Z. Zhang, „influence of high-intensity ultrasonic treatment on the phase morphology of Mg-9.0wt%Al binary alloy,“ *Rare Metals*, p. 86, Feb. 2009.
- [18] W. Gust, „ultrasonic shock treatment of welded joints,“ *Materials Science*, pp. 678 - 683, 1999.
- [19] Böhler Schweißtechnik Austria GmbH, Wissenswertes für den Schweißer, 2010.
- [20] S. Wu et.al., „Formation of non-dendritic microstructure of semi-solid aluminum alloy under vibration,“ *Scripta Materialia* 58, pp. 556 - 559, 2008.
- [21] T.-L. Teng et.al., „A study of residual stresses in multi-pass grith-butt welded pipes,“ *Int. J. Pres. Ves. & Piping* 74, pp. 59 - 70, 1997.
- [22] L. Qinghua et.al., „Effect of vibratory weld conditioning on welded valve properties,“ *Mechanics of Materials* 40, pp. 565 - 574, 2008.