

Optimierung von Rohr/Rohr-Mischverbindungen für den Einsatz unter thermischer Wechsellastbeanspruchung

Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen

Leiter des Instituts für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der RWTH Aachen
reisgen@isf.rwth-aachen.de

Rahul Sharma, M.Sc.

Oberingenieur am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der RWTH Aachen
sharma@isf.rwth-aachen.de

Pascal Österreich, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der RWTH Aachen
oesterreich@isf.rwth-aachen.de

Zusammenfassung

Im Bereich der Schwarz-Weiß-Mischverbindungen herrscht ein grundsätzlicher Mangel an Verständnis hinsichtlich des Verhaltens der Schweißverbindungen unter thermischer Wechsellastbeanspruchung. Dies ist auf fehlende Empfehlungen in Bezug auf die Herstellung dieser Schweißverbindungen, sowie auf eine mangelnde Vergleichbarkeit in der realen Einsatzumgebung zurückzuführen. Insbesondere vor dem Hintergrund eines steigenden Anteils volatiler Energieeinspeisung in die Stromnetze und einem damit einhergehenden wachsenden Bedarf an Lastwechseln innerhalb der thermischen Kraftwerke nimmt die Kritikalität der thermischen Wechsellastbeanspruchung deutlich zu. In diesem Projekt wurden Herstellparameter für Schwarz-Weiß-Rohrmischverbindungen auf ihre Einflüsse hinsichtlich der Spannungsrelaxationsrissanfälligkeit betrachtet. Hierzu wurde ein Prüfstand entwickelt, welcher die isolierte thermische Wechsellastbeanspruchung von Schweißverbindungen abbilden kann und eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Herstellparametern ermöglicht. Mittels Schallemissionsanalyse wurde die Rissbildung während der thermischen Wechsellastbeanspruchung aufgezeichnet und bewertet. Aus den Beobachtungen werden Empfehlungen zur Herstellung von Schwarz-Weiß-Mischverbindungen abgeleitet.

1. Problemstellung und Lösungsansatz

Mischverbindungen sind Kombinationen zwischen artverschiedenen Werkstoffen des gleichen Basismetalls oder unterschiedlicher Basismetalle. Ein typisches Beispiel hierfür sind die sogenannten Schwarz-Weiß-Verbindungen (S/W-Verbindungen), bei denen es sich um Werkstoffkombinationen aus ferritischen oder martensitischen mit austenitischen Stählen handeln kann. [1]

Das Problem bei dieser Art von Schweißverbindungen ist, dass sich an der Fugestelle zusätzlich zu den durch Schmelzschweißprozesse grundsätzlich hervorgerufenen Gefügeveränderungen eine noch schärfer ausgeprägte metallurgische Kerbe ausbildet, da beide Werkstoffe Unterschiede bezüglich Gitterstruktur und chemischer Zusammensetzung aufweisen. So treten unterschiedliche chemische Aktivitäten bestimmter Legierungselemente im jeweiligen Metallgitter der Fügepartner auf, wobei

insbesondere die Diffusion von Kohlenstoff und Chrom zu nennen ist. Dadurch kann es unter Betriebsbeanspruchung bei hohen Temperaturen zu unerwünschten metallurgischen Effekten kommen. Zugleich bilden sich an der Fügestelle zusätzliche Schubspannungen aus, da sich die Wärmeausdehnungskoeffizienten der Fügepartner stark unterscheiden [2]. In der Fertigung ist allgemein dafür Sorge zu tragen, dass das Schweißgut und insbesondere auch die Wärmeeinflusszonen (WEZ) nicht verspröden. S/W-Verbindungen werden in verschiedenen Hochtemperaturanwendungen eingesetzt. Dabei werden die kostenintensiveren, austenitischen Werkstoffe nur an Stellen verbaut, an denen sie aufgrund der thermischen oder korrosiven Beanspruchung erforderlich sind. Weniger belastete Komponenten werden aus ferritischem oder martensitischem Material gefertigt [3].

Die Verbindungen sind im Einsatz nicht nur konstant hohen Temperaturen, sondern häufig auch thermischen Wechsellasten ausgesetzt, wodurch sich insbesondere bei dickwandigen Rohren thermische Gradienten Optimierung von Rohr/Rohr-Mischverbindungen für den Einsatz unter thermischer Wechsellastbeanspruchung über den Rohrwänden aufbauen. Wegen der Überlagerung der genannten Problematiken in Bezug auf die unterschiedlichen Materialeigenschaften sind S/W-Verbindungen unter Einfluss thermischer Wechsellasten besonders anfällig für thermische Ermüdung, wobei sich insbesondere die WEZ des ferritischen Fügepartners einer zeitstandbeanspruchten Schweißung empfindlich gegenüber Rissbildung zeigt [4].

Insgesamt ist es als problematisch zu bewerten, dass es bislang keine systematische Rückführung des Langzeitverhaltens von S/W-Verbindungen unter dem Aspekt einer definierten thermischen Wechsellast auf die Herstellungsparameter gibt. Unterschiedliche Herstellungsbedingungen, Konstruktionen, Betriebsbelastungen und Untersuchungsmethoden erschweren dabei die Vergleichbarkeit der in der Literatur verfügbaren Beschreibungen. Zudem beziehen sich viele Quellen auf diskrete Schadensfälle und nicht auf Fertigungsempfehlungen mit allgemein gültigem Charakter zur Vermeidung der Schäden.

In dieser Studie wurde daher zur Prüfung der geschweißten Proben ein thermischer Wechsellastprüfstand (TWP) aufgebaut. Dieser bildet die wechselnden thermischen Belastungen beim Hoch- und Herunterfahren eines Kraftwerks ab. Hierbei bleiben mechanische Quer- und Längsspannungen, welche im realen Einsatzfall durch die Rohrleitung, sowie durch den Innendruck des durchfließenden Mediums induziert werden, unberücksichtigt. Dies ist notwendig, um eine separate Bewertung der thermischen Beanspruchung der Schweißverbindung zu realisieren.

Zur zeitlichen Auflösung der Risseffekte im Prüfkörper werden die Prüfversuche mittels Schallemissionsanalyse (SEA) begleitet.

2. Herstellung der Prüfkörper

Alle Proben wurden vor den Schweißungen im Ofen gleichmäßig auf 220 °C erwärmt. In der WIG-Schweißanlage wurden die Rohrproben auf 200 °C an der Umgebungsluft abgekühlt und bei Erreichen der 200 °C die Schweißungen gestartet. Dies wurde für jede Parametervariante und für jede Lage wiederholt.

Im Anschluss an die Schweißungen war eine weitere mechanische Bearbeitung notwendig, um die finale Prüfkörpergeometrie zu erhalten. Hierzu wurde der Innendurchmesser der Rohrproben auf 20 mm aufgeweitet. Hierdurch wurde die Wurzellage der Schweißung entfernt. Mit diesem Schritt sollten einheitliche Prüfbedingungen im thermischen Wechsellastprüfstand erzeugt werden. Da die Ausbildung der Wurzel ohne Badsicherung nicht definiert durch Prozessparameter einstellbar ist, führen unterschiedliche Wurzelprägungen zu unterschiedlichen thermischen Konditionen bei gleichen Prozessparametern während der Abkühlphase im thermischen Wechsellastprüfstand.

Ein weiterer Vorteil ist die Isolierung der tatsächlichen Schweißverbindung von möglichen Kerbwirkungen, welche negative Einflüsse auf das Verhalten der Prüfkörper unter thermischer Wechsellast haben können. Aus demselben Grund wird analog die Decklage der Schweißverbindungen entfernt.

Nach der mechanischen Bearbeitung der Prüfkörper wurden diese entsprechend dem Versuchsplan in Abbildung 2 wärmenachbehandelt.

Der letzte Schritt zur Vorbereitung der Prüfkörper für den Wechsellastversuch stellte die Applikation des Thermoelements dar. Diese wurden in 10 mm tiefe Bohrungen auf der Stirnseite des martensitischen Fügepartners eingelassen und mittels Widerstandspunktschweißung angeheftet. Um das Risiko eines möglichen Versagens der Verbindung zu reduzieren, wurden die Thermoelemente zusätzlich mit Hochtemperaturklebstoff in den Löchern verklebt. Abbildung 1 veranschaulicht den Herstellungsprozess der Prüfkörper.



Abbildung 1: Ablauf der Fertigung der Prüfkörper

Die Fertigung der Prüfkörper mittels WIG-Kaltdrahtverfahren bietet eine Reihe möglicher Verfahrenseinstellungen. Aufgrund der aufwändigen Verarbeitung der geschweißten Proben und den damit einhergehenden limitierten Möglichkeiten hinsichtlich der zu untersuchenden Stückzahl an Proben, wurde eine Auswahl der relevanten Einflussparameter getroffen. Das Prozessfenster hinsichtlich der Prozessparameter ist für mehrlagige Schweißverbindungen recht begrenzt und erlaubt keine große Variation.

Generell wird die Entstehung von Spannungsrelaxationsrissen auf die kritische Überlagerung dreier Faktoren zurückgeführt. Diese sind entweder mechanischer, metallurgischer oder thermischer Natur.

Um jede der Ursachentypen abzudecken, wurden daher folgende Fügeparameter für die Untersuchungen definiert:

- Mechanisch: Nahtvorbereitung
- Metallurgisch: Schweißzusatz/Pufferung
- Thermisch: Wärmenachbehandlung der Schweißverbindungen

Bei den untersuchten Parametern wurde drauf geachtet, dass sich diese stets innerhalb der geltenden Normen und Empfehlungen für die verwendeten Werkstoffe und Geometrien bewegen. Dies ist notwendig, um anwendungsnahe Ergebnisse zu erzielen. Abbildung 2 zeigt den sich hieraus ergebenden Versuchsplan.

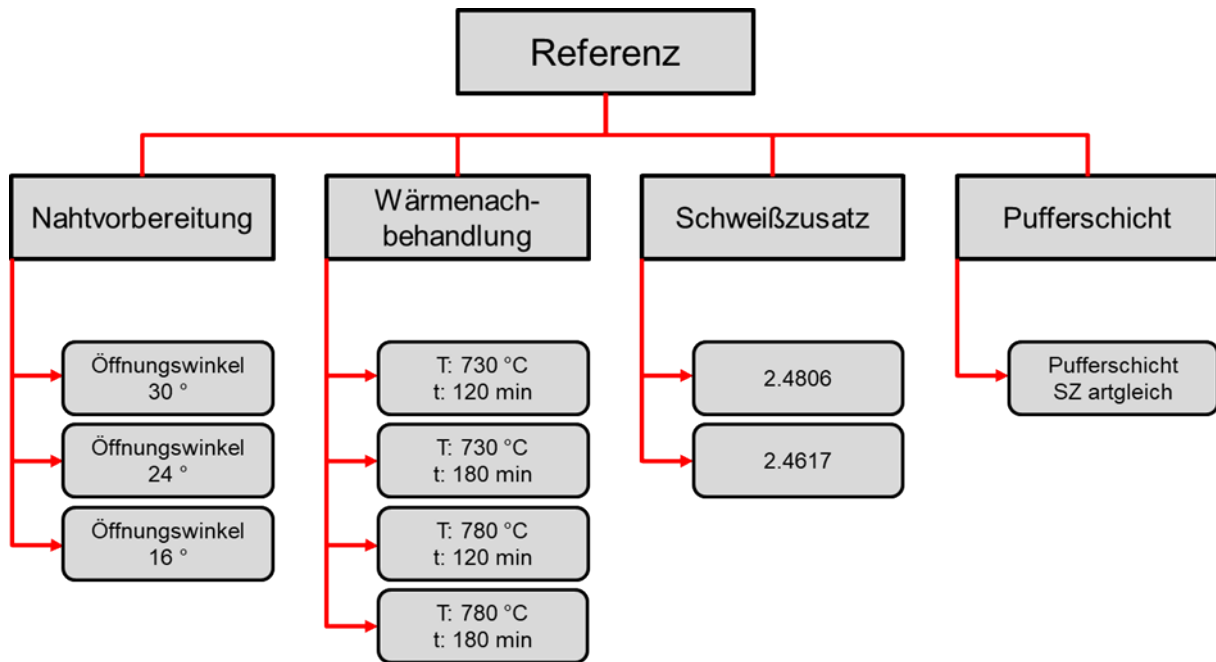


Abbildung 2: Übersicht der definierten Fügeparameter

3. Thermischer Wechsellastprüfstand (TWP)

Der Fokus bei der Umsetzung des thermischen Wechsellastprüfstands (TWP) lag einerseits auf der Abbildung eines möglichst realitätsnahen Lastfalls und auf der anderen Seite auf der Erzielung eines möglichst hohen thermischen Gradienten im Prüfkörper. Abgeleitet aus der Anwendung der Mischverbindungen im Bereich von Kesselrohren wurde daher von einem durchfließenden Medium ausgegangen, welches von außen durch die Rohrwand erwärmt wird. Somit liegt die Wärmequelle des Prüfstands an der Außenseite der Rohre an. Beim Herunterfahren eines Kraftwerks kühlt der nachströmende Fluss des Mediums das Rohr innenseitig ab. Dieses Szenario ist in Form einer durch das Rohrinne geleiteten Luftkühlung auf den Prüfstand übertragen worden. Hierbei unberücksichtigt bleibt jedoch die zusätzliche Innendruckspannung, welche im realen Anwendungsfall vorliegt. Auf die Berücksichtigung dieser, wurde ebenso, wie auf die, durch ein angeschlossenes Rohrsystem induzierten Quer- und Längsspannungen, im Rahmen dieses Projektes verzichtet, um den isolierten Einfluss von Schweißnahtfehlern sowie ungünstiger Gefügestände auf die Versagensmechanismen unter thermischer Wechsellast zu untersuchen.

Die Wahl der Wärmequelle folgt der zweiten Anforderung zur Erzielung eines maximalen thermischen Gradienten im Prüfkörper. Unter Verwendung von dem Rohr umschließenden Heizmatten konnte eine lokale Erwärmung des Prüfkörpers an der Außenseite erzielt werden. Die thermische Leitfähigkeit der Schwarz-Weiß-Verbindung sorgt für eine langsam fortschreitende Aufwärmung des gesamten Prüfkörpers. Eine induktive Erwärmung hätte den Nachteil einer deutlich homogeneren Wärmeverteilung und somit eine Ausbildung eines deutlichen geringeren thermischen Gradienten zwischen Rohrrinnen- und Außenseite.

Für die Kühlung der Rohrprobe wird Druckluft in Raumtemperatur in die Bohrung eingeströmt.

Die Temperaturregelung wird mittels einer LabView-Steuerung umgesetzt. Hierbei lassen sich Zyklenzahl sowie Temperaturverlauf individuell anpassen. Der Heiz-Abkühlzyklus wurde auf eine Temperaturspanne von 400°C (Tiefpunkt) und 600°C (Höhepunkt) festgelegt. Dies entspricht den Temperaturbereichen, in welchen moderne Dampfkraftwerke zwischen Teillast (Tiefpunkt) und Höchstlast (Höhepunkt) variieren. Zudem ist mit der Höchsttemperatur die Grenze des

martensitischen Fügepartners hinsichtlich der Zeitstandfestigkeit (100 MPa, 100.000 h, 610°C) fast ausgeschöpft.

Aufgrund des sich ausbildenden hohen thermischen Gradienten von Rohrrinnen- zur Außenseite, ist der Messpunkt der Bauteiltemperatur entscheidend. Um das Erreichen der Minimal- sowie der Maximaltemperatur im gesamten Bauteil vor dem Umschalten in die nächste Phase zu erzielen, wird die Temperaturbestimmung des Bauteils für Heiz- und Kühlphase an unterschiedlichen Positionen ermittelt. Der Umschaltpunkt von Heiz- und Kühlphase wird mittels Thermoelements möglichst nah an der Rohrrinnenseite definiert. Somit wird die Zieltemperatur am Umschaltpunkt auch an der Rohrrinnenseite erreicht. Umgekehrt wird der Umschaltpunkt zwischen Kühl- und Heizphase anhand einer Temperaturmessung möglichst nah an der Rohraußenseite realisiert. Im Sinne einer möglichst genauen Temperaturbestimmung im Prüfkörper wird diese zudem nicht an der Probenoberfläche, sondern in 10 mm tiefen Bohrungen aufgezeichnet. Dies reduziert Messfehler aufgrund von Einflüssen aus der Umgebungsluft sowie das Ausfallen von Thermoelementen durch äußere Einflussgrößen. Das Funktionsschema des Prüfstands ist in Abbildung 3 dargestellt.

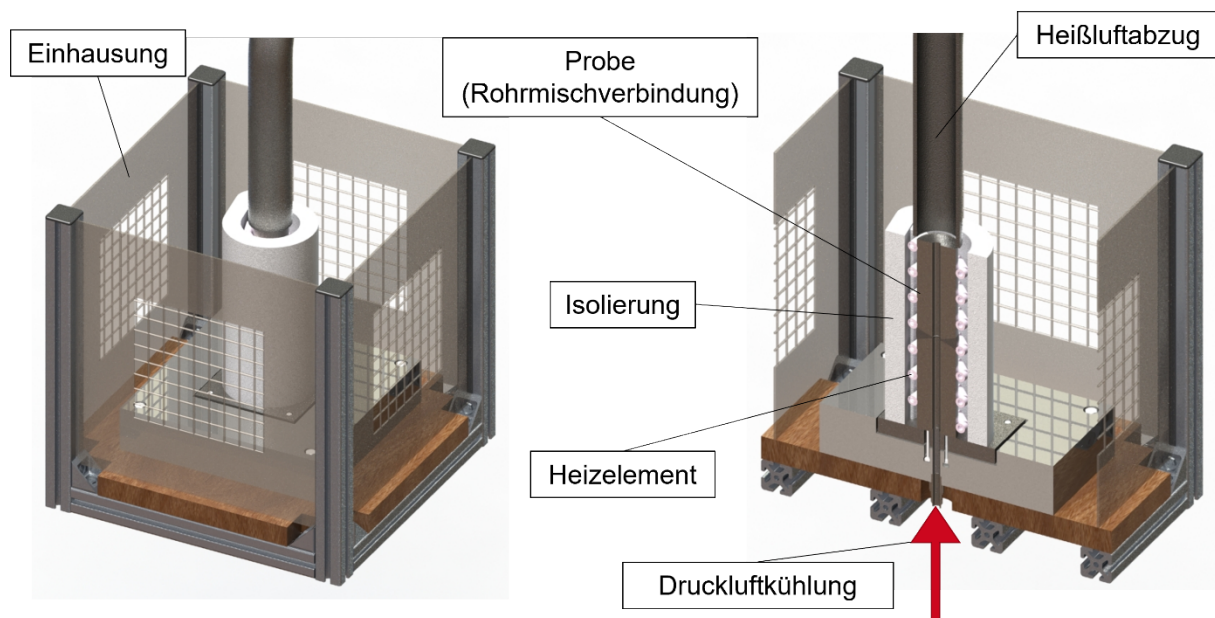


Abbildung 3: Aufbau des thermischen Wechsellastprüfstandes (TWP)

Zur funktionalen und auch zeitlichen Abschätzung des Prüfablaufs wurde eine thermische Simulation des Aufheiz- und Abkühlvorgangs mithilfe der numerischen Simulationssoftware ANSYS durchgeführt. Entscheidend für die Dauer der Heizphase des Temperaturzyklus ist jeweils die Wärmeleitfähigkeit λ der eingesetzten Werkstoffe. Hier zeigt sich bei dem austenitischen Fügepartner (15 W/(m*K)) ein deutlich niedrigeres λ als beim martensitischen Fügepartner (25.8 W/(m*K)) [5, 6]. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit sorgt für einen schnellen Abtransport der Wärme von Rohraußenseite zur Innenseite und führt hier wiederum zu einem Wärmeverlust an der Oberfläche. Für den Abkühlvorgang spielt die spezifische Wärmekapazität eine übergeordnete Rolle. Da bei den verwendeten Werkstoffen keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen spezifischen Wärmekapazitäten vorliegen, ist für den austenitischen Fügepartner 1.4550 mit einer schnellen Erwärmung bei einer vergleichsweise langsameren Abkühlgeschwindigkeit zu rechnen, während für den martensitischen Fügepartner ein ausgeglichenes Aufheiz- zu Abkühldauer Verhältnis zu erwarten ist.

Die Berechnungen der thermischen Simulation bestätigen dieses Ergebnis. Weiterführend zeigt die Berechnung die Temperaturverteilung in der Rohrprobe während des Aufheiz- und Abkühlvorgangs.

Die Berechnungen zeigen, dass eine maximale Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenseite für P92 zum Zeitpunkt des Abschlusses der Kühlphase auftritt. Der thermische Gradient, welcher sich im P-92-Fügepartner ausbildet, ist aufgrund einer schnelleren Abkühlgeschwindigkeit höher als auf der austenitischen Seite der Rohrprobe. Ausgehend von diesen Ergebnissen wird für die Durchführung die Positionierung der Rohrprobe dermaßen festgelegt, dass der austenitische Fügepartner unten in Kontakt zur Probenaufnahme steht, während der martensitische Fügepartner nach oben ausgerichtet wird. Dies erlaubt zum einen die Temperaturregelung anhand der Ist-Temperatur in dem kritischen Fügepartner (hoher Gradient, Rissanfälligkeit) und gleichzeitig eine vereinfachte Aufzeichnung der Schallemissionen mittels Schallemissionsanalyse.

4. Rissdetektion mittels Schallemissionsanalyse

Die Prüfung der Rohrproben wurde durchgehend mittels Schallemissionsanalyse begleitet. Rissereignisse sind gekennzeichnet durch einen Signalverlauf kurzer Dauer mit hoher Energie. Die erste Herausforderung war es somit, die Ereignisse aus den Aufzeichnungen herauszufiltern, welche diesem Kriterium entsprechen. Hierzu wurden die einzelnen Treffer anhand der Referenzmessung der Probe P2 separat untersucht. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Treffer ab einem Energieniveau von 1000 eu (10^{-12} Joule) gehäuft einen charakteristischen Signalverlauf für Risse aufweisen. Unter dieser Schwelle sind kaum bis keine Rissignale aufzufinden. Diese Signale können beispielsweise durch plastische Verformungen in Folge der im Laufe des Prüfzyklus durchgeführten thermischen Behandlung der Prüfkörper entstehen und zeichnen sich durch einen undefinierten Signalverlauf mit geringer Signalstärke aus. Auch eine Überlagerung multipler, simultan ablaufender Ereignisse kann zu einem nicht klar zu definierenden Messsignal führen. Dieses Vorgehen wurde an zwei weiteren Proben durchgeführt, um den Befund zu prüfen. Abbildung 4 zeigt beispielhafte Signalverläufe eines Rissereignisses und eines nicht eindeutig zu definierenden Ereignisses.

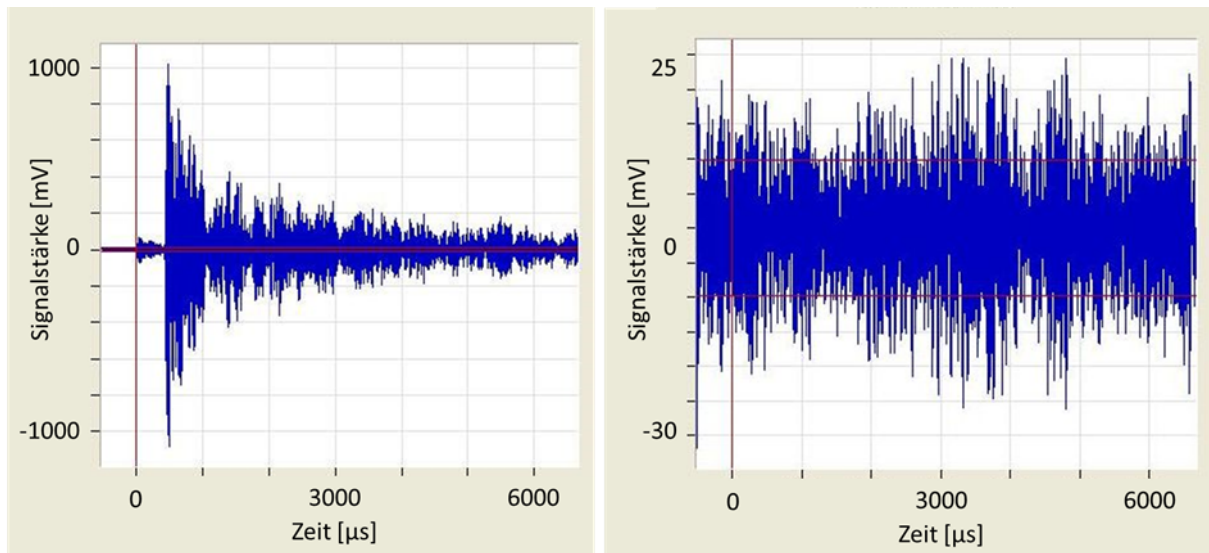


Abbildung 4: Signalverlauf einer Rissanzeige (links) und eines undefinierten Ereignisses (rechts)

Für die Quantifizierung des Rissauftritts anhand der SEA-Messschriebe werden folglich alle Aufzeichnungen auf Hits oberhalb der Schwelle von 1000 eu (10^{-12} Joule) gefiltert. Aufgrund der deutlich reduzierten Anzahl ist es nun möglich die verbleibenden Hits manuell zu prüfen und erneut nach der Charakteristik des Signalverlaufs zu filtern.

Eine besondere Herausforderung stellt das Auffinden der im Rahmen der Schallemissionsanalyse aufgetretenen Rissereignisse durch zerstörende Prüfung dar. Aufgrund fehlender Information bezüglich der Position des Rissereignisses in den SEA-Daten, ist eine lichtmikroskopische Analyse von

Schliffbildern nur bedingt geeignet, da aufgrund mangelnder örtlicher Informationen aus der Schallemissionsanalyse das Herausarbeiten einer definierten Ebene mit sichtbarer Risschädigung nicht gewährleistet werden kann. Neben den klar sichtbaren Anlasseffekten im Gefüge der Wärmeeinflusszone des P92 lassen sich keine Hinweise auf Risse oder eine besondere gefügebedingte Rissanfälligkeit identifizieren, unabhängig von den gewählten Fügeparametern. Hieraus, und aus der Tatsache, dass unterschiedliche Wärmenachbehandlungszustände große Unterschiede hinsichtlich der Rissereignisse im Rahmen der Schallemissionsanalyse ergeben, lässt sich schließen, dass sich vornehmlich der Eigenspannungsabbau durch die Wärmebehandlung auf die Rissanfälligkeit auswirkt.

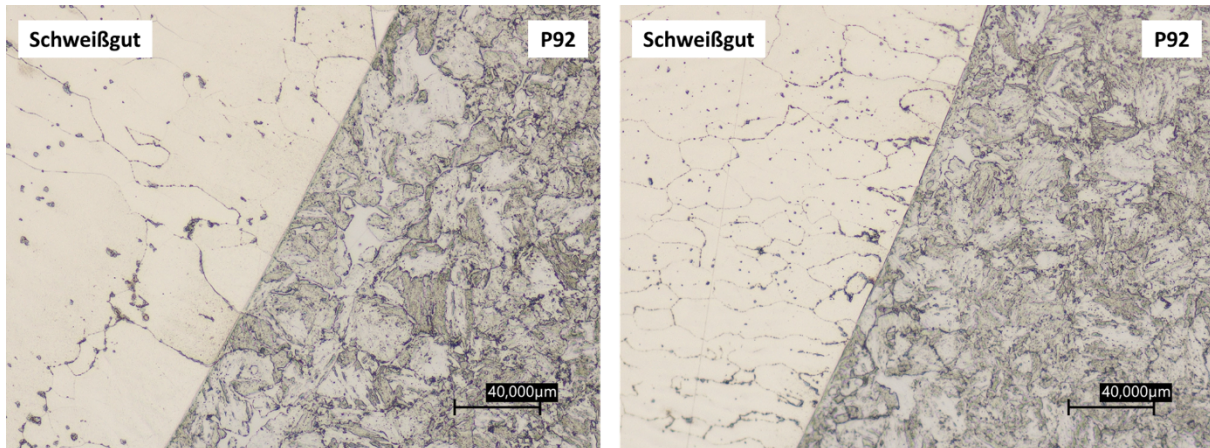


Abbildung 5: Mikroskopische Aufnahmen im Bereich der Schmelzlinie mit niedriger Wärmenachbehandlungstemperatur (links, 720 °C) und hoher Wärmenachbehandlungstemperatur (rechts, 780 °C)

Durch REM-Aufnahmen der Wärmeeinflusszone konnten auf vereinzelt Schlifffbildern Furchen identifiziert werden, welche Hinweise auf eine Mikrorissbildung nahelegen. Abbildung 5 zeigt hier die Wärmeeinflusszone eines Prüfkörpers. Dieser zeigte nach Anwendung der Wärmenachbehandlung von 720 °C im Rahmen der SEA Analyse mehrere deutliche Rissanzeigen in der Schallemissionsanalyse. In der REM-Aufnahme sind deutliche Vertiefungen entlang der Korngrenzen zu sehen. Diese Vertiefungen weisen auf eine Werkstofftrennung in diesem Bereich hin. Diese Mikrorisse befinden sich somit exakt an den Stellen, an welchen sich Schädigungen aufgrund von Spannungsrelaxationsversprödungen zeigen.

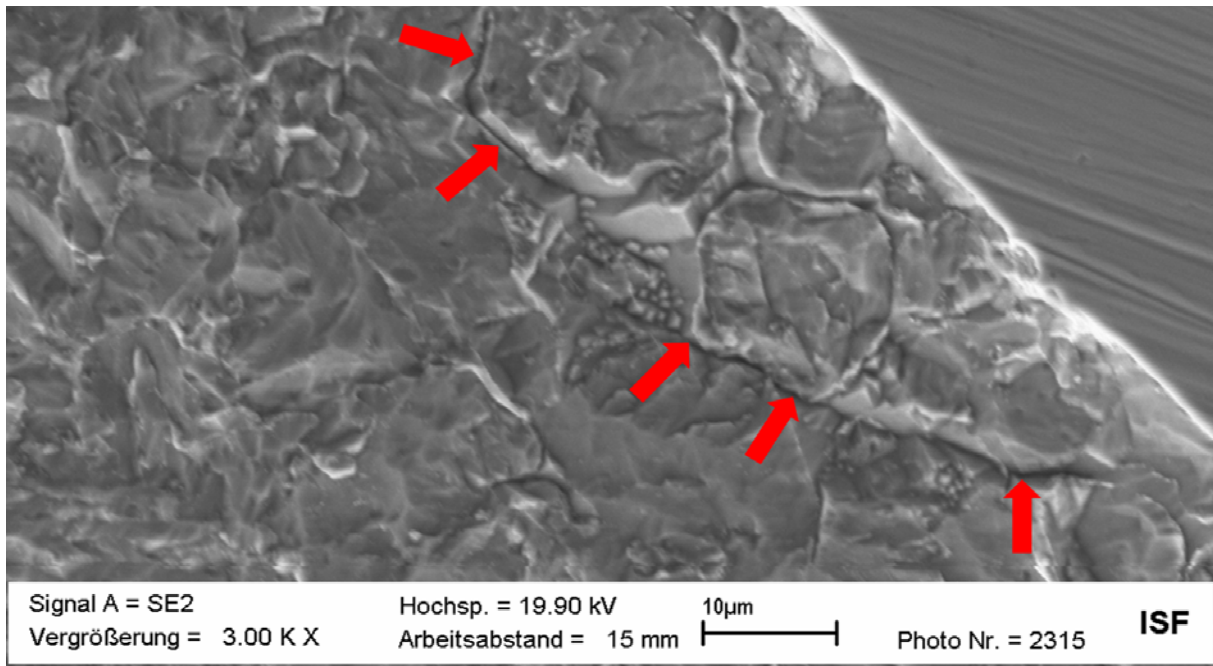


Abbildung 6: REM-Aufnahme der Wärmeinflusszone einer rissbehafteten Probe entsprechend der Schallemissionsanalyse

5. Diskussion und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Schwarz-Weiß-Rohrverbindungen bezüglich ihrer Spannungsrelaxationsrissanfälligkeit unter thermischer Wechsellastbeanspruchung untersucht. Hierbei stellten sich zwei zentrale Forschungsfragen: Zum einen besteht ein mangelndes Verständnis zwischen den Zusammenhängen von Herstellparametern und thermischer Belastung. Insbesondere aufgrund stark abweichender Einsatzgebiete und damit verbundenen variierenden Lastfällen stellte sich eine Korrelation als schwierig zu erzielen dar. Zum anderen ist eine Empfehlung zur Verarbeitung der Schwarz-Weiß-Verbindung vor dem Hintergrund der Spannungsrelaxationsrissempfindlichkeit aufgrund eines steigenden Anteils volatiler Energieversorgung und damit einhergehender zunehmender Häufigkeit von An- und Abfahrvorgängen in modernen thermischen Kraftwerken relevant.

Zur Erreichung einer Vergleichbarkeit des Belastungsfalls als Grundvoraussetzung für eine Korrelation hinsichtlich der Herstellbedingungen, wurde im ersten Schritt ein Prüfstand zur gezielten thermischen Wechsellastbeanspruchung entwickelt. Dieser grenzt bewusst zusätzliche Lastfälle wie durch Rohranbindungen induzierte Längsspannungen oder Druckspannungen durch eingeschlossene Medien aus. Der Versuchsstand ermöglicht somit eine separate Betrachtung der thermischen Lastkomponente.

Die untersuchten Parametervariationen orientierten sich nah an den anwendungsnahen Normen und Verarbeitungsrichtlinien der verwendeten Werkstoffe und Bauteilgeometrien. Dies ist notwendig, um praxisrelevante Erkenntnisse aus den Bauteilprüfungen zu erlangen.

Die Auswertung der Schallemissionsanalyse zeigte teilweise klare Zusammenhänge zwischen den definierten Fügeparametern und der Rissanfälligkeit der Prüfkörper.

Die vorgegebene Empfehlung zur Wärmenachbehandlung des martensitischen Fügepartners gibt eine Spanne hinsichtlich Haltetemperatur und Haltedauer an. Während gezeigt werden konnte, dass die Dauer der Wärmenachbehandlung lediglich einen geringen Einfluss auf die Rissanfälligkeit aufweist, zeigten die minimale und maximale Haltetemperatur jeweils deutliche Abweichungen. Bei

einer Haltetemperatur von 780 °C konnten keine Rissvorkommen während der thermischen Wechsellastbeanspruchung festgestellt werden. Bei 720 °C hingegen zeigte die Schallemissionsanalyse deutliche Rissanzeigen an. Da beide Werte innerhalb der Verarbeitungsempfehlung für den martensitischen Fügepartner liegen, kann hier eine Tendenz zur Nutzung höherer Haltetemperaturen in der Wärmenachbehandlung abgeleitet werden.

Die Applikation alternativer Schweißzusätze zeigt, dass auch hier ein Potential zur Rissneigung vorliegt. Unter Anwendung der bereits beschriebenen geeigneten Wärmenachbehandlung (780 °C) zeigen die drei untersuchten Schweißzusätze unterschiedliche Ergebnisse. Die deutlichste Verschlechterung hinsichtlich der Rissanfälligkeit zeigte hier der einseitig artgleich geschweißte Prüfkörper unter Verwendung einer Pufferung. Generell ist hier jedoch auch auf eine deutlich anspruchsvollere Verarbeitbarkeit im Vergleich zum Schweißzusatz 2.4806 (NiCr20Mn3Nb) hinzuweisen. Da keine Verbesserung, viel mehr eine Verschlechterung der Rissanfälligkeit mit den alternativen Schweißzusätzen, bei gleichzeitiger Verkomplizierung der Fügeigenschaften, festgestellt werden konnte, lässt sich auch hier eine klare Empfehlung in Richtung des Schweißzusatzes 2.4806 (NiCr20Mn3Nb) ableiten.

Die Untersuchung bezüglich der unterschiedlichen Nahtvorbereitungen ergab keinen Einfluss auf die Rissempfindlichkeit der Fügeverbindung. Für eine Empfehlung zur Einstellung dieser kann sich aus wirtschaftlicher Sicht jedoch die Referenznahtvorbereitung (Öffnungswinkel 30°) ableiten lassen, da diese die geringste Lagenanzahl aufweist.

Die Erkenntnisse aus diesem Forschungsvorhaben limitieren sich auf die isolierte Betrachtung der thermischen Wechsellastbeanspruchung der Schweißverbindungen. Die bei entsprechender Wärmenachbehandlung positiven Ergebnisse hinsichtlich der Rissanfälligkeit zeigen auf, dass die Prüfkriterien für weitere Betrachtungen verschärft werden müssen. Hierbei können einerseits die Längs- und Querspannungen, welche durch den Anschluss an ein starres Rohrsystem induziert werden mitberücksichtigt werden. Speziell die untersuchten Nahtvorbereitungen, welche im Rahmen dieser Untersuchungen keinen merklichen Einfluss auf die Rissanfälligkeit aufweisen, könnten in diesem Zusammenhang an Relevanz gewinnen. Zum anderen kann auch der in der Anwendung im Rohr herrschende Druck mitberücksichtigt werden. Dies verschärft die Belastung der Fügeverbindung und könnte die Rissanfälligkeit steigern.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Kritikalität stellen Parameterkombinationen dar, welche außerhalb der vorgegebenen Empfehlungen und Normungen liegen. Mit dem Versuch ohne Wärmenachbehandlung konnte gezeigt werden, wie stark sich eine Abweichung auf die Rissanfälligkeit auswirken kann. In diesem speziellen Fall eignet sich im Besonderen eine Variation des Wärmenachbehandlungsablaufs. Dies gilt sowohl hinsichtlich der Temperatur als auch hinsichtlich der Zeitkomponente.

DANKSAGUNG

Das IGF-Vorhaben Nummer 19.731 N/DVS Nummer 01.098 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- [1] Schulze, G.: Die Metallurgie des Schweißens. 4. Auflage, Springer-Verlag, 2010
- [2] Friedmann, V.: Versagensverhalten von Austenit-Martensit Rohrmisch-verbindungen für 600°C-Dampfkraftwerke unter Kriechermüdigkeitsbelastung. Schriftenreihe Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik, Nr. 074, Shaker Verlag GmbH, 2011
- [3] Richarz, B.: Grenzflächensegregation und Mikrostrukturveränderungen in 9-12%Cr-Stählen unter langzeitiger thermischer Beanspruchung. Fortschrittberichte VDI, Reihe 5: Grund- und Werkstoffe, Nr. 413, 1995
- [4] Hahn, B.; Weber, J.; Weber, H.: Analyse des Betriebsverhaltens von Austenit-Ferrit-Schweißverbindungen im Temperaturbereich oberhalb 550°C. VGB Kraftwerkstechnik, Band 78 Heft 3, 1998
- [5] www.stahlportal.com/lagervorrat/14550-x6crninb18-10/ zuletzt geprüft am 02.07.19
- [6] Yaghi, A.H., Tanner, D. W. J., Hyde, T. H., Becker, A. A., Sun, W.: Finite element thermal analysis of the fusion welding of a P92 steel pipe. Materials, Mechanics and Structures Research Division, Faculty of Engineering, University of Nottingham, 2012