



vgbe-Positionspapier

# Erfahrungen bei der Verarbeitung des Werkstoffs 7CrMoVTiB10-10 (T/P/F 24, Werkstoff-Nr.: 1.7378)

November 2021

## Vorwort

Der Werkstoff 7CrMoVTiB10-10 (T24) wurde nach seiner Qualifizierung als Rohrwerkstoff eingesetzt. In mehreren neu errichteten kohlegefeuerten Dampferzeugern kam es ab dem Jahr 2010 zu massiven Schäden der Rohrrundschweißnähte in Membranrohrwänden während der Inbetriebnahme. Während des folgenden Betriebs wurden an verschiedenen Anlagen vermehrte Schäden an Rohr-Steg-Ver-schweißungen festgestellt.

Neben projektspezifischen Einflussgrößen wie Konstruktion oder die Einhaltung der Qualitätsanforderung bei der Herstellung der Membranrohrwände in der Fertigung, bei der Montage und bei Reparaturen haben insbesondere die werkstoff-, schweiß- und prüftechnischen Verarbeitungsvorgaben einen hohen Einfluss auf das Auftreten der beschriebenen Schäden. Der Vorgabe und Überwachung der geeigneten technischen Verarbeitungsanweisungen wird ein hoher Stellenwert zu Erreichung einer zufriedenstellenden Produktqualität zugemessen.

Dieses Positionspapier beschreibt die Erfahrungen der Betreiber im Zusammenhang mit der Verarbeitung und Reparaturen von Komponenten aus dem Werkstoff 7CrMoVTiB10-10 in Form von z.B. Rohren, Stegmaterial, Füllstücke, u.a. aus Stegmaterial und Gesenkschmiedeteilen mit angearbeiteten Enden für Rohrschlüsse.

Der Werkstoff ist standardisiert z.B. in DIN EN 10216-2 und ASTM A213/ ASME SA-213. Werkstoffanforderungen an die Halbzeuge enthält die VGB-Richtlinie VGB-S-109. Weitere Herstell-, Verwendungs- und Prüfhinweise zu diesem Werkstoff finden sich u.a. im VGB-Standard VGB-S-013, siehe Kapitel 6.

Positionspapier: „Erfahrungen bei der Verarbeitung des Werkstoffs  
7CrMoVTiB10-10 (T/P/F 24, Werkstoff-Nr.: 1.7378)“

## Autoren

Dieses Positionspapier wurde erarbeitet von der VGB-Arbeitsgruppe „T24/HR3C“. Mitglieder dieser Projektgruppe sind:

Dr. Bader, Mirko, Uniper Kraftwerke GmbH, Düsseldorf

Dr. Bareiß, Jörg, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Stuttgart

Florisson, Maurice, Uniper Benelux N.V., Maasvlakte/NL

Gaida, Alfred, STEAG GmbH, Essen

Ganswind-Eyberg, Jens, VGB PowerTech e.V., Essen

Götte, Christoph, RWE Power AG, Essen

Haarke, Olaf, Vattenfall Heizkraftwerk Moorburg GmbH, Hamburg

Hauke, Thomas, Lausitz Energie Kraftwerke AG, Cottbus

Dr. Heckmann, Simon, RWE Power AG, Essen

Prof. Huysmans, Staf, Laborelec S.A., Linkebeek/B

Kather, Philipp, Vattenfall Heizkraftwerk Moorburg GmbH, Hamburg

Dr. Kinger, Gerald, EVN AG, Maria Enzersdorf/AU

Kozlowski, Patrick, Lausitz Energie Kraftwerke AG, Peitz

Dr. Metzger, Klaus, Grosskraftwerk Mannheim AG, Mannheim

Dr. Ullrich, Christian, VGB PowerTech Service GmbH, Essen

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>2</b>
<b>Autoren</b>	<b>3</b>
<b>1 Allgemeine Anforderungen an die Verarbeitung</b>	<b>5</b>
<b>2 Empfehlungen für die schweißtechnische Verarbeitung</b>	<b>8</b>
2.1 UP-Schweißen Rohr-Steg-Verbindung	8
2.2 Füllstück/ Füllschweißung-Membranwand	10
2.3 WIG-Schweißen Rohr-Rohr-Verbindung	12
2.4 Hinweise zur Reparatur durch Einsetzen von Membranwandsegmenten	14
<b>3 Allgemeine Hinweise zu Prüfungen</b>	<b>15</b>
<b>4 Zusätzlich Anforderungen an die Dokumentation</b>	<b>18</b>
<b>5 Empfehlungen</b>	<b>18</b>
5.1 Wärmebehandlung des errichteten Kessels (Boiler heating)	18
5.2 Wärmebehandlung einzelner Rundnähte in der Membranrohrwand	18
5.3 Transport-/ Montagehilfen	18
<b>6 Mitgeltende Dokumente</b>	<b>19</b>
<b>7 Literaturhinweise</b>	<b>21</b>
<b>8 Begriffe und Abkürzungen</b>	<b>22</b>
<b>9 Anhänge</b>	<b>24</b>
9.1 Wärmebehandlung des errichteten Kessels (Boiler heating)	24
9.2 Wärmebehandlung einzelner Rundnähte in der Membranrohrwand	26
9.3 Transport-/ Montagehilfen	28
<b>Über vgbe energy</b>	<b>30</b>

## 1 Allgemeine Anforderungen an die Verarbeitung

Für die schweißtechnische Verarbeitung sollten Hersteller mit einer Zertifizierung nach DIN EN ISO 3834-2 zugelassen sein und eine Befähigungserklärung gemäß DIN EN 12952-5 Anhang F vorlegen können.

Es wird empfohlen, den VGB-Standard VGB-S-013 für die Qualitätssicherung heranzuziehen und zu vereinbaren.

Ein wesentliches Qualitätsmerkmal besteht in der fach- und sachgerechten Konstruktion und Fertigung. Bereits in diesen Prozessschritten ist auf eine spannungsarme Gestaltung und geeignete Schweißfolge zu achten.

Es dürfen nur eignungsgeprüfte Schweißzusätze (SZ) auf Basis des VdTÜV-Merkblatts 1153 verwendet werden. Die Schweißzusätze dürfen nur unter Beachtung der Angaben des SZ-Herstellers und innerhalb ihrer Zulassung verarbeitet werden.

Bei Schweißnahtanhäufungen und Steifigkeitsänderungen, wie sie z.B. bei Schmiedestücken (Übergangsstücke, Teilungswechsel, Ein- und Austritte der Membranrohrwand) und Ausbiegungen (Brenneröffnungen, Rauchgasrücksauge-Öffnungen, Wanddurchtritte, etc.) vorliegen, sollte eine Wärmebehandlung (Spannungsarmglühen nach dem Schweißen gemäß Vereinigung der Technischen Überwachungsvereine Werkstoffblatt (VdTÜV-Wbl.) 533/2 bzw. DIN EN 12952-5, Tab. 10.4-2) der Bauteile auch für Wanddicken kleiner 10 mm während der Fertigung beim Hersteller durchgeführt werden.

Jede Schweißverbindung muss in einem übergeordneten Schweißplan, Schweißfolgeplan und unter Rückverfolgbarkeit der Schweißer und Zuordnung der Schweißverfahrensprüfung erfasst und gelistet werden.

Die Schweißnahtvorbereitung hat nach DIN EN ISO 9692-1 zu erfolgen. Ausnahmen (z.B. beim Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG) – Orbitalschweißen) bedürfen der Zustimmung des Bestellers/ Betreibers und der benannten Stelle.

Die Schweißanweisung (WPS) ist nach DIN EN ISO 15609-1 mit Angabe der Schweißfolge für spannungsarmes Schweißen zu erstellen. Die wesentlichen Informationen sind aus den gültigen Schweißverfahrensprüfungen zu entnehmen. Diese sind mit den Angaben in der WPS abzugleichen.

Die Durchführung der Verfahrensprüfung erfolgt nach DIN EN ISO 15614-1 (Stufe 2). Zusätzliche Prüfungen (z.B. Mikroschliffuntersuchungen auf Riss-

bildungen, Kleinsthärteprüfungen nach Vickers HV1 zur Feststellung von lokalen Aufhärtungen) werden empfohlen und sind zu vereinbaren.

Die Verfahrensprüfung zum Unterpulverschweißen (UP) (einschließlich Schweißtraktoren) ist maschinenabhängig und bezogen auf die Brenneranzahl durchzuführen. Neben den typischen Schweißparametern sind die Angaben zur Schweißgeschwindigkeit (Vorschub) und - sofern möglich - zur Winkeleinstellung der Brenner zu kontrollieren und zu dokumentieren. Das gleiche gilt für die Vorwärmung und die kontrollierte Abkühlung.

Es wird empfohlen, eine ständig vor Ort tätige Schweißaufsicht mit Erfahrungen in der Fertigung und Montage von Komponenten aus dem Werkstoff 7CrMoVTiB10-10 mit schwerpunktmäßiger Überprüfung der folgenden Vorgaben zu gewährleisten:

- Schweißnahtvorbereitung (Form, Gestaltung, Symmetrie, Abstand etc.)
- Sicherstellung von Formierungen, (Benennung der Formier-Methode, Kontrolle O<sub>2</sub>-Gehalt etc.)
- SZW-Behandlung (Anlieferungs- und Anwendungszustand),
- Temperaturführung (Vorwärmung, Zwischenlagentemperatur, Nachwärmen), Streckenenergie (Eine kontinuierliche Kontrolle - 24 h - ist wichtig)
- Schweißfolge, Nahtgeometrie, Schweißnahtbewertung (Sichtprüfung (VT))
- Spannungsbetrachtung vor dem Einbau, ggf. Anwendung des Pilgerschritt-Verfahrens; Spannungsreduzierung durch entsprechende Schlitzlängen, etc.

Ein thermisches Trennen ist beim Werkstoff 7CrMoVTiB10-10 wegen der entstehenden Aufhärtung im wärmebeeinflussten Bereich des Trennschnitts ohne weitere Nachbearbeitung nicht zulässig. Generell muss beachtet werden, dass Trennschnitte jeglicher Art den angrenzenden Grundwerkstoff beeinflussen. Ein Indiz für die Beeinflussung bei mechanischen Trennschnitten sind Anlauffarben. Beeinflusste Zonen müssen vor einer weiteren Verarbeitung abgearbeitet werden.

Eine Schulung von Vorrichtern hinsichtlich der Schweißnahtvorbereitung und Minimierung von Spannungen bei Vorricht- bzw. Anpassungsarbeiten sollte vereinbart werden und muss dann nachvollziehbar dokumentiert sein. Zur Minimierung von „Fehlern“ sind vereinbarte Schulungsprozesse kontinuierlich zum Herstell- und Verarbeitungsprozess aufrechtzuerhalten.

Es sind ausschließlich Schweißer nach DIN EN ISO 9606-1 bzw. Bediener nach DIN EN ISO 14732 mit Prüfungen am Werkstoff 7CrMoVTiB10-10 einsetzbar. Für Heftschweißungen gelten die gleichen Anforderungen an die Schweißer.

Jeder Schweißer hat Handfertigkeitstests vor Beginn der Fertigung/ Montage am 7CrMoVTiB10-10, vorzugsweise an der Rohrcharge mit dem höchstem Kohlenstoff-Gehalt, anzufertigen. (Ein Dokumentenabgleich der Materialzeugnisse ist zuvor sicherzustellen). Ab einer Schweißunterbrechung am Werkstoff 7CrMoVTiB10-10 von 6 Monaten durch den Schweißer selbst und bei neu eingesetzten Schweißern ist eine Handfertigkeitstestprüfung erforderlich. Die Handfertigkeitstestprüfung hat unter baustellenähnlichen Bedingungen und Schweißpositionen sowie unter Anwesenheit des Auftraggebers bzw. gegenseitig vereinbarten BÜ zu erfolgen.

Folgende Prüfungen an den Handfertigkeitstests für Rundnähte werden empfohlen und sollten vereinbart werden:

- Sichtprüfung (VT) inklusive der Bewertung der Wurzel,
- Durchstrahlungsprüfung (RT),
- Magnetpulverprüfung (MT),
- Härtemessung (HT) nach DIN EN ISO 9015-1 am Querschliff; zu prüfen sind zwei Messreihen (decklagen- und wurzelseitig, jeweils in 1 mm Abstand zur Innen- und Außenoberfläche) mit den Zonen Grundwerkstoff (GW1), Wärmeinflusszone (WEZ1), Schweißgut (SG), WEZ2, GW2. Für jede Zone sind mindestens drei Einzelmesswerte erforderlich.

Des Weiteren ist die folgende Prüfung empfohlen:

- Mikroschliff mit 500-facher Auflösung; die Ausbildung der Lagen und der WEZ ist zu überprüfen. In der Schweißnaht muss mit Ausnahme der Decklage eine angelassene martensitische oder eine bainitische Gefügestruktur vorliegen.

Die Bewertung der Schweißnaht erfolgt entsprechend DIN EN ISO 5817, Bewertungsgruppe B. Mikrorisse (Ordnungs-Nr. 1001) sind nicht zulässig.

Je nach Prüfvereinbarung zwischen Betreiber und Hersteller wird empfohlen, bei neu qualifizierten Schweißern die ersten Schweißverbindungen konsequent auf die geforderten, vereinbarten Qualitätsmerkmale zu überprüfen. Weitere Schweißnahtprüfungen basieren auf dem vereinbarten Prüfkonzept, Prüfumfang, Ausbesserungsquote, etc..

In der Fertigung und Montage ist die Schweißnaht-Kennzeichnung (Nahtnummer, Nummer des Schweißers) an den Proben und am Bauteil durch den Schweißer unmittelbar nach Fertigstellung der Schweißnaht anzubringen. Die Kennzeichnung ist durch das Bauaufsichtspersonal zu kontrollieren und zu protokollieren.

## 2 Empfehlungen für die schweißtechnische Verarbeitung

Bei der Verarbeitung des Werkstoffs 7CrMoVTiB10-10 sind die Anforderungen der DIN EN 12952-5 und der VdTÜV-Wbl. 533/2 und 3 als Mindestanforderungen zu beachten.

Weiterführende Verarbeitungshinweise werden für das UP-Schweißen der Rohr-Steg-Verbindung, für das WIG-Schweißen der Füllstück-/Füllschweißung der Membranrohrwand und das WIG-Schweißen der Rohr-Rohr-Rundnaht gegeben. Auf Erläuterungen für das Lichtbogenhandschweißen bei der Herstellung der Steg-Steg-Nähte bei der Montage wird verzichtet, da sich dieses Vorgehen nicht durchgesetzt hat.

Weitere QS-Anforderungen sind individuell zwischen dem Betreiber (Besteller) und dem Hersteller zu vereinbaren. An dieser Stelle wird u.a. auf die Anwendung der Vereinigung der Großkesselbesitzer (VGB) Richtlinien verwiesen.

### 2.1 UP-Schweißen Rohr-Steg-Verbindung

Nachfolgende Verarbeitungshinweise in Tabelle 1 werden für das UP-Schweißen (121) der Rohr-Steg-Verbindung empfohlen.

Tabelle 1: Verarbeitungshinweise UP-Schweißen Rohr-Steg-Verbindung

Fertigungsschritt	Vorgabe	Bemerkung
Vorwärmung	- $s_{\text{Rohr}} \leq 15 \text{ mm}: > 100 \text{ °C}$	- Die Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur, Luftfeuchte) sind parallel dazu zu hinterfragen. Ggf. müssen die schweißtechnischen Vorgaben daraufhin angepasst werden.
Zwischenlagentemperatur	- keine, da einlagiges Schweißen	
a-Maß der Schweißnaht	- $a_1 + a_2 \geq 1,25 \cdot s_{\text{Steg}}$	- Bei diesen Kehlnähten muss zusätzlich ausgeschlossen werden, dass die WEZ bis an die Innenoberfläche geht wegen Grobkornzonenbildung an der Innenoberfläche.

Positionspapier: „Erfahrungen bei der Verarbeitung des Werkstoffs  
7CrMoVTiB10-10 (T/P/F 24, Werkstoff-Nr.: 1.7378)“

Fertigungsschritt	Vorgabe	Bemerkung
Schweißrestspalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\leq 0,3 \cdot s_{\text{Steg}}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eine spaltfreie Verschweißung durch geeignete Schweißnahtvorbereitung des Steges ist anzustreben.</li> <li>- Eine kontinuierliche Überwachung mit Probenahme und zeitnahe Auswertung wird empfohlen (Vgl. VGB-S-013)</li> </ul>
UP-Schweißen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- gleichschenklige UP-Schweißnähte</li> <li>- beheizter Pulverbehälter</li> <li>- Pulverrücktrocknung</li> <li>- An- und Auslaufbereiche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einhaltung der Vorgaben des SZW-Herstellers.</li> <li>- Der Trocknungszustand (Feuchtegehalt) des Pulvers ist zu kontrollieren.</li> </ul>
verzögerte Abkühlung zur Vermeidung der Kaltrissbildung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flammenwärmen mit Brennerdusche oder Abdeckung der Schweißnaht unmittelbar nach dem Schweißen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Das gewählte Verfahren ist in der WPS anzugeben.</li> </ul>
WIG-Reparatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- anzeigenfreies Ausschleifen inkl. Oberflächenrissprüfung (gilt auch bei einer UP-Reparaturschweißung)</li> <li>- Vorwärmung &gt; 100 °C</li> <li>- Ausführung ohne Restspalt</li> <li>- Strichraupen</li> <li>- mehrlagig Schweißen (Lagendicke <math>\leq 2</math> mm)</li> <li>- Zwischenlagentemperatur max. 250 °C</li> <li>- Je nach Restwanddicke ist der Wärmeeintrag (Streckenenergie) ggf. zu reduzieren, z.B. durch Ausweisung der min. Stromstärke, entsprechend der Schweißanweisung (WPQR).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reparaturkonzept ist zu erstellen.</li> <li>- Gefahren durch systematische Fehler sind zu beseitigen.</li> <li>- Die Reparaturschweißung ist durch eine Verfahrensprüfung zu belegen.</li> <li>- Beim Ausschleifen der Anzeigen darf die rechnerische Mindestwanddicke des Rohres nicht unterschritten werden.</li> <li>- Sollte die Anzeige weiterhin vorhanden sein bei gleichzeitiger Unterschreitung der Mindestwand, so muss das Bauteil, Rohrelement ausgetauscht werden.</li> <li>- Anzeigenfreiheit muss mittels MT nach dem Ausschleifen und nach der Reparatur überprüft werden.</li> <li>- Wanddickenmessung und Härteprüfungen sind im ausgeschliffenen Bereich durchzuführen.</li> <li>- Die Lage der Reparaturstellen ist zu dokumentieren und ist Bestandteil der Enddokumentation.</li> <li>- Wiederholt durchgeführte Reparaturen an gleicher bzw. angrenzender Stelle sind unzulässig.</li> <li>- Alternativ ist ein Passstück einzusetzen.</li> </ul>

Positionspapier: „Erfahrungen bei der Verarbeitung des Werkstoffs  
7CrMoVTiB10-10 (T/P/F 24, Werkstoff-Nr.: 1.7378)“

Bei einzelnen Projekten wurden abweichend höhere Zwischenlagentemperaturen bei der WIG-Reparatur verwendet.

Für zukünftige Neufertigungen und Ersatzteilerfertigungen ist folgende Empfehlung in Betracht zu ziehen:

Rohr-Steg-Brettern bzw. ausgearbeiteten Membranrohrwand-Elemente, wie z.B. Durchtritte, Mannlöcher, sind in der Fertigung möglichst einer Spannungsarmglühung nach dem Schweißen im Glühofen zu unterziehen.

Hinweis: Der Nachweis von ausreichenden Zeitstandkennwerten unter Berücksichtigung des Abminderungsfaktors zum Grundwerkstoff ist beim Einsatz geglühter Schweißverbindungen im Zeitstandbereich erforderlich.

## 2.2 Füllstück/ Füllschweißung-Membranwand

Nachfolgende Verarbeitungshinweise in Tabelle 2 werden für die Füllstück-/Füllschweißung der Membranwand empfohlen. Tabelle 2 gilt für Schweißungen am Werkstoff 7CrMoVTiB10-10 artgleich.

Tabelle 2: Verarbeitungshinweise Füllstück-/Füllschweißung Membranwand

Fertigungsschritt	Vorgabe	Bemerkung
Vorwärmung	- $s_{\text{Rohr}} \leq 15 \text{ mm}$ : $> 100 \text{ °C}$	
Zwischenlagentemperatur	- $\leq 250 \text{ °C}$	
Luftspalt	- $b \leq 2 \text{ mm}$	- Die Spaltbreite ist so klein wie möglich zu halten, um die Schrumpfspannungen zu minimieren.
Schweißrestspalt	- ohne	

Positionspapier: „Erfahrungen bei der Verarbeitung des Werkstoffs  
7CrMoVTiB10-10 (T/P/F 24, Werkstoff-Nr.: 1.7378)“

Fertigungsschritt	Vorgabe	Bemerkung
WIG-Schweißen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Füllstücke und Gegenseite (Steg, Flossen) Anfasen</li> <li>- Strichraupen</li> <li>- mehrlagig (Lagendicke <math>\leq 2</math> mm); Ansatzstellen Beschleifen</li> <li>- spannungsarme Schweißfolge ist festzulegen</li> <li>- Schweißansätze sind außerhalb der Ecken zu wählen. Die Ecken sind ohne Unterbrechung in der Schweißfolge zu Umschweißen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bei Reparaturen im Stegbereich wird empfohlen, die Ecken des Steges mit <math>\varnothing_{\min} = S_{\text{Steg}}</math> und <math>\varnothing_{\min} \geq 6</math> mm anzubohren.</li> </ul>
Nachwärmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nicht erforderlich</li> </ul>	

Bei einzelnen Projekten wurden abweichend höhere Zwischenlagentemperaturen verwendet.

Eine spannungsarme Schweißfolge für die Füllstückschweißung berücksichtigt das freie Schrumpfen quer zum Rohr.

Eine Füllstücklänge von min. 50 mm ist anzustreben, um die Schweißnahtanhäufung bzw. Wärmekonzentration im Bereich der angrenzenden Rundnaht zu minimieren.

Für zukünftige Neufertigungen und Ersatzteilerfertigungen ist folgende Empfehlung in Betracht zu ziehen: Füllstückschweißungen aus der Fertigung an Rohr-Steg-Brettern bzw. ausgearbeiteten Membranrohrwand-Elemente, wie z.B. Durchtritte, Mannlöcher, sind in der Fertigung möglichst einem Spannungsarmglühen nach dem Schweißen im Glühofen zu unterziehen. Die Bedingungen nach VdTÜV-Wbl. 533/2 sind umzusetzen. Die Spannungsarmglühtemperatur darf die tatsächliche Anlasstemperatur aus dem Vergütungsprozess der jeweiligen Komponenten nicht übersteigen.

### 2.3 WIG-Schweißen Rohr-Rohr-Verbindung

Nachfolgende Verarbeitungshinweise in Tabelle 3 werden für das WIG-Schweißen (141) der Rohr-Rohr-Verbindung empfohlen.

Tabelle 3: Verarbeitungshinweise WIG-Schweißen Rohr-Rohr-Verbindung

Fertigungsschritt	Vorgabe	Bemerkung
Vorwärmung	- $s_{\text{Rohr}} \leq 15 \text{ mm}$ : $> 100 \text{ °C}$	- Bei Anschluss an Schmiedestücken $> 150 \text{ °C}$
Zwischenlagentemperatur	- $\leq 250 \text{ °C}$	
Schweißnahtvorbereitung	- V-Naht EN ISO 9692-1 (1.3) abweichend Luftspalt $b \leq 3 \text{ mm}$	
wurzelseitige Formierung	- Formiergas: EN ISO 14175 - I1 (Argon), N2, N3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wasserlösliches Formierpapier, Maisbällchen, Formierschaum oder die Spaltformierung können je nach Vereinbarung eingesetzt werden.</li> <li>- Wichtig ist die Kontrolle des Sauerstoffgehaltes. Dieser darf nicht über 6 ppm steigen.</li> <li>- Es ist auf ausreichende Formiergas-Versorgung und Bevorratung zu achten.</li> <li>- Die Formierung sollte durch die verantwortliche Schweißaufsicht kontrolliert werden.</li> </ul>

Positionspapier: „Erfahrungen bei der Verarbeitung des Werkstoffs  
7CrMoVTiB10-10 (T/P/F 24, Werkstoff-Nr.: 1.7378)“

Fertigungsschritt	Vorgabe	Bemerkung
WIG-Schweißen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wurzelschweißnähte zur Vermeidung von Heißrissen mit ausreichend hohem Slope-Down-Strom und ausreichender Verweilzeit sowie im Flankenbereich der Schweißnaht beenden</li> <li>- Strichraupen, keine Pendelraupen</li> <li>- mehrlagig Schweißen (Lagendicke <math>\leq 2</math> mm), d.h. <math>\geq 3</math> Lagen, um ausreichenden Anlasseffekt im Bereich der Wurzel und WEZ sicherzustellen. Dies kann für die Decklage mit einer 4. Lage als Temperlage ohne SZW erreicht werden</li> <li>- Ansatzstellen (vorheriger Endkrater) beschleifen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hinweise des SZW-Herstellers sind zu beachten.</li> <li>- Für Membranrohrwände sind mindestens drei Lagen erforderlich, jedoch nicht mehr als 4 Lagen.</li> <li>- Die Raupenzahl (Decklage) ist dabei <math>&gt; 3</math>.</li> <li>- Raupenzahl <math>\neq</math> Lagenzahl)</li> </ul>
Nachwärmen	- nicht erforderlich	
Spannungsarmglühen	- $s_{\text{Rohr}} > 10$ mm <sup>1), 2)</sup>	- Nach DIN EN 12952-5 bzw. VdTÜV-Wbl. 533/2 und /3.
Reparatur		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eine Reparaturkonzept, basierend auf eine reproduzierbare, spannungsarme Vorgehensweise, muss vor Beginn der Reparaturschweißung vorliegen.</li> <li>- Die Reparaturschweißung ist durch eine Verfahrensprüfung zu belegen.</li> <li>- Beim Ausschleifen von Anzeigen ist darauf zu achten, dass der zur Beseitigung der Anzeige ausgeschliffene Luftspalt durch die WPS abgedeckt ist.</li> <li>- Rissfreiheit (MT) ist sicherzustellen.</li> <li>- Die Mindestwandstärke darf nicht unterschritten werden.</li> <li>- Die Lage der Reparaturstellen ist zu dokumentieren.</li> <li>- Wiederholt durchgeführte Reparaturen an gleicher bzw. angrenzender Stelle sind unzulässig.</li> <li>- Alternativ ist ein Passstück einzusetzen.</li> </ul>

Positionspapier: „Erfahrungen bei der Verarbeitung des Werkstoffs  
7CrMoVTiB10-10 (T/P/F 24, Werkstoff-Nr.: 1.7378)“

- 1) Voraussetzung für Glühverzicht bei sRohr  $\leq 10$  mm gemäß VdTÜV-Wbl. 533/2
- 2) In einigen Projekten wurden Übergangstücke (Schräg-Senkrecht) in der Membranrohrwand sowie Rauchgasrücksaugeschachtöffnungen in der Fertigung einer Wärmebehandlung (Spannungsarmglühen nach dem Schweißen gemäß VdTÜV-Wbl. 533/2 bzw. DIN EN 12952-5, Tab. 10.4-2) auch für Wanddicken kleiner 10 mm unterzogen.

Beim Anschluss an Schmiedestücke mit Anschweißende mit Wandstärkensprung zum Rohr sollte möglichst eine Wärmebehandlung erfolgen.

Für zukünftige Neufertigungen und Ersatzteilerfertigungen ist folgende Empfehlung in Betracht zu ziehen:

Rohr-Rundnähten sind in der Fertigung einer Spannungsarmglühung nach dem Schweißen im Glühofen zu unterziehen. Falls eine Ofenglühung nicht möglich ist, ist eine lokale Wärmebehandlung der Rohr-Rundnähte durchzuführen und speziell zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer zu vereinbaren.

Für Rohr-Rundnähte bei der Montage bzw. Vormontage von neuen Komponenten ist ein lokales Spannungsarmglühen nach dem Schweißen durchzuführen. Bei der Montage von Ersatzteilen/ Neufertigungen an Altanlagen ist eine lokale Wärmebehandlung von Rohr-Rundnähten unter Berücksichtigung des Zustands der Altkomponenten zu prüfen.

Hinweis: Der Nachweis von ausreichenden Zeitstandkennwerten unter Berücksichtigung des Abminderungsfaktors zum Grundwerkstoff ist beim Einsatz geglühter Schweißverbindungen im Zeitstandbereich erforderlich.

#### 2.4 Hinweise zur Reparatur durch Einsetzen von Membranwandsegmenten

Reparaturen an Membranrohrwänden mit Membranwandsegmenten sind durch das Einsetzen von Membranwandsegmenten mit 1 bis 4 Rohren (Mindestlänge 200 mm) mit halben Stegen durchzuführen. Es gelten die Anforderungen an schweißtechnische Verarbeitung (s. dieser Abschnitt 2) mit folgenden Ergänzungen:

- Die Steg-Stegverbindung wird mit einem Luftspalt  $b \leq 1$  mm ausgeführt.
- Für die gesamte Reparatur ist eine spannungsarme Schweißfolge vorzusehen.
- Es wird empfohlen, eine Auswahl von Membranwandsegmenten in den passenden Abmessungen und Teilungen für den Reparaturfall auf Lager zu halten.

### 3 Allgemeine Hinweise zu Prüfungen

Bei den Prüfungen sind je Prüfverfahren alle Schweißer zu erfassen. Entsprechend den zwischen Betreiber und Hersteller festgelegten Prüfaufgaben und eingesetzte Prüfverfahren sind die Prüfumfänge und Prüfumfangssteigerungen (auf der Basis der Ausbesserungsquote) vorab zu vereinbaren.

Beim UP-Schweißen hat die Oberflächenrissprüfung erst nach 48 Stunden zu erfolgen.

Die Bewertung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten erfolgt nach DIN EN ISO 5817. Die Bewertungsgruppe B ist für Rundnähte, Steg-Stegnähte und Rohr-Stegnähte zu erfüllen. Für Prüfungen an artgleichen Schweißverbindungen ist Tabelle 4 als Mindestumfang einzuhalten.

Alle Nähte sind zu 100 % VT zu prüfen. Alle Bedarfsnähte und Reparaturstellen sind mit den dort aufgeführten Prüfverfahren 100 % zu prüfen.

Tabelle 4: Prüfungen mit Prüfumfang an artgleichen Schweißverbindungen

Nahttyp	OFR- Prü- fung <sup>a</sup>	Volumenprüfung <sup>b</sup>		HT <sup>e</sup> nach WBH	PMI <sup>f</sup>
		UT <sup>c</sup>	RT <sup>d</sup>		
<b>Rundnähte</b>					
Rohr-Rohr	25 %	25 %		100 %	10 %
Spiegelnähte und nach dem Einbau nicht oder nur schwer zugängliche Nähte	100 %	100 %		100 %	5 %
Nähte außen am Kessel liegender Rohrleitungen, bis zur ersten Absper- rung	100 %	100 %		100 %	10 %
Nähte in verdämmten Räumen	100 %	100 %		100 %	5 %
<b>Nähte an Anschweißteilen</b>					
Lasttragend	100 %	100 % <sup>g</sup>	-	- <sup>k</sup>	5 %
Nicht lasttragend	10 %	-	-	-	5 %
<b>Nähte an Rohrwänden<sup>h</sup></b>					
Steg-Rohr-Verbindungen <sup>i</sup>	m	-	-	j	n.V.
Reparaturen an Steg-Rohr-Verbindungen <sup>i</sup>	100 %	-	100 %	-	-

Positionspapier: „Erfahrungen bei der Verarbeitung des Werkstoffs  
7CrMoVTiB10-10 (T/P/F 24, Werkstoff-Nr.: 1.7378)“

Steg-Steg-Verbindungen (Registerstöße)	100 %	-	10 % <sup>j</sup>	-	-
Füllstück-/ Füllschweißungen	100 % <sup>l</sup>	-	j	-	5 %
<p><sup>a</sup> Alle Nähte sind zu 100 % VT zu prüfen. Bei der Oberflächenrissprüfung ist die Magnetpulverprüfung nach EN ISO 9934-1 anzuwenden. Die Eindringprüfung nach EN ISO 3452-1 kann ersatzweise nach Absprache mit dem AG erfolgen.</p>					
<p><sup>b</sup> Bei der Volumenprüfung ist die Ultraschallprüfung ab einer Wandstärke von 15 mm der Durchstrahlungsprüfung vorzuziehen.</p>					
<p><sup>c</sup> Die Ultraschallprüfung erfolgt nach EN ISO 17640 Prüfklasse C. Für die Ultraschall-Querfehlerprüfung sind die Schweißnahtdecklagen kerbfrei und wandeben zu beschleifen. <i>Hinweis: UT Phased-Array wurde in einem Projekt zusätzlich zu RT zur Auffindung von Endkratterrissen eingesetzt; RT in Einzelprojekten bis 50%</i></p>					
<p><sup>d</sup> Die Durchstrahlungsprüfung erfolgt nach EN ISO 17636-1 Prüfklasse B. Die Durchstrahlungsprüfung ist vorzugsweise bei Wandstärken bis ≤ 15 mm durchzuführen oder nach Absprache mit dem AG an den Schweißverbindungen, wo eine Ultraschallprüfung nicht möglich ist.</p>					
<p><sup>e</sup> Die Härteprüfung ist nach einer erfolgten Wärmebehandlung durchzuführen.  Der festgelegte Prüfumfang gilt für wärmebehandelte Nähte.  Für Ofenglühlung ist generell ein Prüfumfang von 10 % einzuhalten.  Zulässige Härtewerte sind dem VGB-Standard VGB-S-013 zu entnehmen</p>					
<p><sup>f</sup> Verwechslungsprüfung</p>					
<p><sup>g</sup> Die UT-Prüfung erfolgt bei Vollanschluss.</p>					
<p><sup>h</sup> Der Prüfumfang ist bezogen auf die Schweißnahtlänge.</p>					
<p><sup>i</sup> Bei Reparaturen, sind im Umfeld (ca. 500 mm) der Reparaturstelle alle Schweißverbindungen 100% VT und MT/PT zu prüfen.</p>					
<p><sup>j</sup> Für die Fertigung von Rohrwandelementen gilt, dass je Maschine und Schicht mind. eine Brille zerstörend zu prüfen ist, je Rohrwandelement an einer Steg-Steg-Naht eine RT-Prüfung erfolgt und je Rohrwandelement an einem Füllstück eine RT-Prüfung erfolgt.</p>					
<p><sup>k</sup> <i>Hinweis: HT wurde in Einzelprojekten als Mobilprüfung mit 5% eingesetzt</i></p>					
<p><sup>l</sup> Die Eindringprüfung nach EN ISO 3452-1 bzw. die Magnetpulverprüfung nach EN ISO 9934-1 sind nach Geometrie und Oberflächenzustand nach Absprache mit dem AG auszuwählen.</p>					
<p><sup>m</sup> Je 2 m<sup>2</sup> je Rohr-Wandelement (beidseitig), ein Rohr-Wandelement besteht aus ca. 12 Rohren mit einer Länge von ca. 6 m</p>					

Positionspapier: „Erfahrungen bei der Verarbeitung des Werkstoffs  
7CrMoVTiB10-10 (T/P/F 24, Werkstoff-Nr.: 1.7378)“

Bei Kaltbiegungen sind die Anforderungen gemäß VGB-R 508 zu beachten.

Bei Richtarbeiten mittels Warmrichten sind alle Anwärmstellen hinsichtlich ihrer Lage zu dokumentieren und zu 100% folgenden Prüfungen zu unterziehen:

- VT
- MT
- HT

Bei der Härteprüfung nach Richtarbeiten müssen Rohr- und Stegmaterial erfasst werden und mit drei Einzelwerten je in der Spitze, der Mitte und der Basis des Wärmekeils liegenden Messreihen bzw. bei lokaler punktförmiger Wärmeeinbringung mit einer Messreihe mit drei Einzelwerten belegt werden. Härtewerte dürfen zum Istwert des unbehandelten Grundwerkstoffs um  $\pm 30$  HV10 abweichen, wobei die zulässigen Grenzwerte (siehe VGB-S-013) einzuhalten sind.

Der Umfang der Kugeldurchlaufprobe in der Fertigung für Rohre und Rohrschlangen hat bei

$$20 \text{ mm} \leq \varnothing_{\text{innen}} \leq 49 \text{ mm zu } 100 \%$$

nach VGB-S-013 zu erfolgen.

#### **4            Zusätzlich Anforderungen an die Dokumentation**

Die Lage von:

- Bedarfsnähten, Reparaturschweißungen,
- Filmlagen für Schweißungen und Reparaturschweißungen,
- Wärmekeilen für das Warmrichten

sowie die Ergebnisse der zugehörigen VT und zerstörungsfreien Prüfungen sind in den Fertigungs- bzw. Montagedokumentationen (z.B. Zeichnungen) zu erfassen.

#### **5            Empfehlungen**

##### **5.1            Wärmebehandlung des errichteten Kessels (Boiler heating)**

Verschiedene Kraftwerke haben vor Beginn der warmen Inbetriebnahme eine Wärmebehandlung des errichteten Dampferzeugers bei niedrigen Temperaturen von ca. 500 °C durchgeführt. Details und betrachtete Risiken sind im Anhang anhand der Daten einer Beispielanlage beschrieben.

##### **5.2            Wärmebehandlung einzelner Rundnähte in der Membranrohrwand**

Verschiedene Kraftwerke haben während der Errichtung oder bei Reparaturen Versuche zur Wärmenachbehandlung von Schweißnähten durchgeführt. Details und betrachtete Risiken sind im Anhang anhand einer Versuchsaufstellung und der Umsetzung in einer Beispielanlage beschrieben.

##### **5.3            Transport-/ Montagehilfen**

Er wird empfohlen, ein Konzept für die Handhabung der Membranrohrwand-Elemente für die Werksvorfertigungen, den Transport und die Montage festzulegen.

Verschiedene Kraftwerke haben für den Transport zur Anlieferung und bei der Handhabung während der Montage besondere Maßnahmen ergriffen. Details sind im Anhang anhand der Umsetzung einer Beispielanlage beschrieben.

## 6 Mitgeltende Dokumente

- ASTM A213 Standard specification for seamless ferritic and austenitic alloy-steel boiler, superheater, and heat exchanger tubes
- ASME SA-213 Specification for seamless ferritic and austenitic alloy-steel boiler, superheater, and heat exchanger tubes
- DIN EN 10216-2 Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 2: Rohre aus unlegierten und legierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen, Ausgabe 04/2020
- DIN EN 12952-5 Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten - Teil 5: Verarbeitung und Bauausführung für drucktragende Kesselteil, Ausgabe 01/2012
- DIN EN ISO 3834-2 Qualitätsanforderungen für das Schmelzschiessen von metallischen Werkstoffen – Teil 2: Umfassende Qualitätsanforderungen, Ausgabe 03/2006
- DIN EN ISO 5817 Schweißen - Schmelzschiessverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschiessen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten, Ausgabe 06/2014
- DIN EN ISO 9015-1 Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Härteprüfung - Teil 1: Härteprüfung für Lichtbogenschiessverbindungen, Ausgabe 05/2011
- DIN EN ISO 9606-1 Prüfung von Schweißern – Schmelzschiessen – Teil 1: Stähle, Ausgabe 12/2017
- DIN EN ISO 9692-1 Schweißen und verwandte Prozesse - Arten der Schweißnahtvorbereitung – Teil 1: Lichtbogenhandschiessen, Schutzgasschiessen, Gasschiessen, WIG-Schiessen und Strahlschiessen von Stählen, Ausgabe 12/2013
- DIN EN ISO 14175 Schweißzusätze - Gase und Mischgase für das Lichtbogenschiessen und verwandte Prozesse, Ausgabe 06/2008
- DIN EN ISO 14732 Schweißpersonal - Prüfung von Bedienern und Einrichtern zum mechanischen und automatischen Schweißen von metallischen Werkstoffen, Ausgabe 12/2013
- DIN EN ISO 15609-1 Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißanweisung – Teil 1: Lichtbogenschiessen, Ausgabe 12/2019
- DIN EN ISO 15614-1 Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung – Teil 1: Lichtbogen- und Gasschiessen von Stählen und Lichtbogenschiessen von Nickel und Nickellegierungen, Ausgabe 05/2020

Positionspapier: „Erfahrungen bei der Verarbeitung des Werkstoffs  
7CrMoVTiB10-10 (T/P/F 24, Werkstoff-Nr.: 1.7378)“

- VdTÜV-Wbl. 533/2 Warmfester Stahl 7CrMoVTiB10-10, Werkstoff-Nr. 1.7378, Nahtloser Hohlkörper, nahtloses Rohr, Ausgabe 12/2013
- VdTÜV-Wbl. 533/3 Warmfester Stahl 7CrMoVTiB10-10, Werkstoff-Nr. 1.7378, Stabstahl, Schmiedestück, Ausgabe 12/2013
- VGB-R 508 Herstellung und Bauüberwachung von Rohrleitungsanlagen in Wärmekraftwerken, Ausgabe 1999
- VGB-S-013 Bau- und Montageüberwachung bei der Herstellung und Errichtung von Wasserrohrkesseln und zugehörigen Anlagen in Wärmekraftwerken, 2. Ausgabe 2017
- VGB-S-109 Werkstoffspezifikation für drucktragende Komponenten in fossil befeuerten Kraftwerken, 3. Ausgabe 2012

## 7 Literaturhinweise

- (1) K. Metzger, K. Maile: Erfahrungen mit dem Einsatz des Stahls T24 im GKM, Block 9 nach 5-jähriger Betriebszeit, VGB PowerTech 4/2020, Essen
- (2) C. Ullrich: Untersuchung zur Spannungsrisskorrosion im Schweißnahtbereich des Werkstoffs 7CrMoVTiB10-10 (T24), Werkstofftechnologische Schriftenreihe, Band 18, 2019. Vulkan-Verlag
- (3) C. Ulrich, H.-G. Rademacher; G. Gevelmann, W. Tillmann, R. Zielke, P. Körner: Investigation on the operational influences on the observed stress corrosion cracking of T24 material, Proceedings 42nd MPA Seminar, 2018
- (4) T. Böllinghaus, J. C. Lippold and C. E. Cross: Cracking Phenomena in Welds IV, Springer Verlag 2016
- (5) A. Helmrich, A. Kopp, F. Rödiger, J. Böse, A. Klenk, K. Metzger: Damage Mechanisms in T24 Tubes of Membrane Walls and Experience with Fabrication, Assembly and Operation, MPA Seminar 2016
- (6) K. Metzger: Einsatz des warmfesten Stahles 7CrMoVTiB10-10 (T24) als Rohrwerkstoff im 600-Grad-Kraftwerk - Besondere Qualitätssicherungsmaßnahmen zur Vermeidung der Bildung von Spannungsrissen, Dissertation MPA Universität Stuttgart 2015
- (7) RFCS Project CRAMUFAT24: Crack Mechanism Understanding and Failure Avoidance Treatment of T24 Tube Material in Advanced Super Critical Coal Fired Steam Generators, RFCR-CT-2013-00011, Final Report
- (8) R. Nowack, C. Götte, S. Heckmann: Qualitätsmanagement bei RWE am Beispiel des Kesselwerkstoffs T24, VGB PowerTech 11/2011
- (9) The T23/T24 Book; New Grades for Waterwalls and Superheaters; Vallourec & Mannesmann Tubes, 2nd Edition, October 2000

## 8 Begriffe und Abkürzungen

a	a-Maß der Kehlnaht
b	Luftspalt
BÜ	Bauüberwacher
HT	Hardness Test ⇔ Härtemessung
HV	Härte nach Vickers
GW	Grundwerkstoff
MT	Magnetic Test ⇔ Magnetpulverprüfung
n.V.	nach Vereinbarung
OFRP	Oberflächenrissprüfung
PMI	positive Materialidentifikation
PT	Penetration Test ⇔ Farbeindringprüfung
RT	Radiographic Test ⇔ Durchstrahlungsprüfung
s	Dicke des Werkstücks
SG	Schweißgut
s <sub>Rohr</sub>	Wanddicke des drucktragenden Rohres oder Schmiedeteils
s <sub>Steg</sub>	Stegdicke
SZ	Schweißzusätze
SZW	Schweißzusatzwerkstoffe
UP	Unterpulverschweißen
UT	Ultrasonic Test, Ultraschallprüfung
VdTÜV	Vereinigung der Technischen Überwachungsvereine
VT	Visual Test ⇔ Sichtprüfung/ visuelle Prüfung
VGB	Technischer Fachverband VGB PowerTech
vgbe	vgbe Energy: Markenauftritt des VGB PowerTech ab September 2021
Wbl.	Werkstoffblatt
WEZ	Wärmeeinflusszone

Positionspapier: „Erfahrungen bei der Verarbeitung des Werkstoffs  
7CrMoVTiB10-10 (T/P/F 24, Werkstoff-Nr.: 1.7378)“

WIG	Wolfram-Inertgas-Schweißen
WPQR	Welding Procedure Qualification Record ⇔ Schweißverfahrensprüfung
WPS	Welding Procedure Specification ⇔ Schweißanweisung

## 9 Anhänge

### 9.1 Wärmebehandlung des errichteten Kessels (Boiler heating)

Verschiedene Kraftwerke habe vor Beginn der warmen Inbetriebnahme eine Wärmebehandlung des errichteten Dampferzeugers bei niedrigen Temperaturen durchgeführt. Die hier folgenden Angaben beziehen sich auf eine Beispielanlage.

Das Boiler Heating ( $\vartheta \geq 480 \text{ °C}$  und  $t \geq 48 \text{ h}$ ) wurde für Membranwände aus dem Werkstoff 7CrMoVTiB10-10 zur Verminderung von Spannungen in Schweißverbindungen angewandt. Es ist als einmaliges, zeitlich begrenztes Wärmebehandlungsverfahren mit lokal positionierten, externen Brennern zu werten.

Die wesentliche Aufgabe des Boiler Heatings besteht in der Reduzierung von Spannungen in der Schweißverbindung (Schweißeigenstressungen, Zugspannungen etc.).

Zur Reduzierung kritischer Spannungen wurde eine Wärmebehandlung des gesamten Kessels z.B. mit externen Öl- oder Gasbrennern bei  $450 \text{ °C}$  bis  $520 \text{ °C}$  mit einer Haltezeit von bis zu 48 h durchgeführt. Diese hatte eine Relaxation der Spannungen in den Schweißverbindungen der Membranrohrwänden zum Ziel. Dazu wurden die Druckteile zur Vereinheitlichung der Wärmedehnung mit Luft durchströmt. Die Luft erhitze sich in den Rohren infolge des externen Wärmeeintrags und umspülte somit die Schweißverbindungen des Werkstoffs 7CrMoVTiB10-10 von der Wurzelseite aus.

Anlagenbezogene Varianten unterschieden sich durch verschiedene Haltetemperaturen und - Zeiten. Dabei sind maximal zulässige Dehnungen zu berücksichtigen. In einem Einzelfall wurden Ober- und Unterteil der Membranrohrwand getrennt behandelt. Es ist auch zu beachten, dass Bauteile aus niedriger legierten Werkstoffen durch diese WB nicht überbeansprucht werden.

Zur Wärmebehandlung der Membranrohrwände wurden i.d.R. externe Öl- oder Gasbrenner an Öffnungen des Feuerraums positioniert, bzw. es wurden weitere prov. Öffnungen eingebaut. Die Öffnungen wurden soweit möglich luftdicht verschlossen, um das Eindringen von Falschluff zu vermeiden.

Mit Verdichtern wurde eine Durchströmung mit Luft des Rohrleitungssystems und der Membranrohrwände eingerichtet, die eine gleichmäßige Wärmeverteilung und insbesondere einen maximalen Temperaturunterschied zwischen den Membranrohrwänden und den externen Rohrleitungen von ca.  $100 \text{ °C}$  sicherstellen sollten.

Stationär wurde die Zirkulationsluft von der Einspeisung über Speisewasserleitung, ECO, Verdampfer, Überhitzer, HDU, Zwischenüberhitzer und ZÜ-Sicherheitsventil geleitet.

Aus der zurückliegenden Erfahrung wird empfohlen, darauf zu achten, dass getrocknete Luft verwendet wird, um Kondensatbildung auszuschließen. Ein Eintrag von korrosionsfördernden Stoffen, wie z.B. Salze, Sulfate, Chloride, ist zu vermeiden.

Die ZÜ-Sicherheitsventile wurden während der Zirkulation auf Druck geregelt, um so den Zirkulationsluftstrom zu steuern. Die HDU stand dabei offen, alle anderen Armaturen waren geschlossen (auch HZÜ-Schnellschlussventil und KZÜ-Rückschlagklappe).

In die undurchströmte Kesseldecke wurden Austrittsöffnungen für temporäre Abgaskanäle bis zum Kesselhausdach eingebracht. Die Kanäle waren in Isolierblech gefertigt. Einige Kanäle waren mit manuellen Schiebern an den Klappen ausgerüstet, um die Wärme im Feuerraum gezielt zu stauen. Der Kesseltrichter wurde verschlossen.

Während des Boiler Heatings waren jeweils die ersten Klappen im Luftsystem (z.B. Sekundärluft-, Abbrandluftkanäle) geschlossen, um den Eintrag von Falschluff bzw. Rückströmungen in das Luftsystem zu vermeiden.

Im Übergang vom 1. Zug in den 2. Zug wurden temporäre Abschottungen eingebaut.

Die Temperaturverteilung im Kessel wurde vorwiegend im Feuerraum und an verbindenden Rohrleitungen erfasst. Während des Aufheizens wurde eine regelmäßige Kontrolle der Ausdehnung des Kessels durchgeführt.

Die Temperatursteigerung erfolgte durch stufenweise Inbetriebnahme der externen Brenner, mit dem Anfahren von Haltepunkten in Schritten von ca. 50 °K unter Berücksichtigung der Aufwärmung außenliegender Leitungen und unbeheizter Komponenten, wobei eine Temperaturdifferenz von  $\Delta T \leq 100^\circ\text{C}$  eingehalten werden sollte. Der gesamte Prozess der Wärmefahrt beträgt mit Vorbereitungs- und Nachbearbeitungszeit ca. 6 Tage.

Allgemein diskutierte Risiken bei der Umsetzung dieser Maßnahme sind:

- örtliche Plastifizierungen, die zu Verzug und zur Erhöhung der Eigenspannungen in bestimmten Bereichen nach dem Abkühlen führen können,
- Sekundärhärteeffekte mit der Möglichkeit der Relaxationsrissbildung und Herabsetzung der Zähigkeit in besonderen Gefüge-Zonen (grobkörnige Martensitstrukturen),

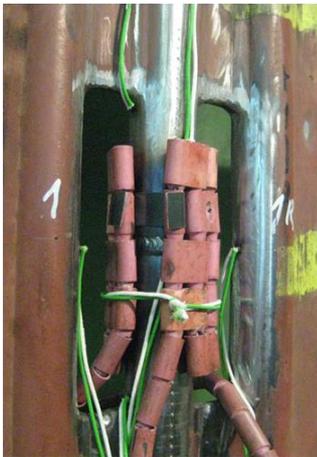
örtliche Überhitzung, wenn keine kontinuierliche Temperaturüberwachung vorliegt.

## 9.2 Wärmebehandlung einzelner Rundnähte in der Membranrohrwand

Verschiedene Kraftwerke haben während der Errichtung oder bei Reparaturen Versuche zur Wärmenachbehandlung von Schweißnähten durchgeführt. Die hier beschriebenen Details geben Informationen einer Versuchsaufstellung und aus der Umsetzung einer Beispielanlage wieder.

Es wurden praxisnahe Simulationen und Untersuchung der Möglichkeiten, Montage-Rundnähte in der Membranrohrwand wärmezubehandeln, durchgeführt.

Unter Verwendung einer Membranrohrwand wurde die Wärmebehandlung nach VdTÜV-Werkstoffblatt 533/2 bei 740 °C und 30 min Haltezeit einer frei zugänglichen Rohrrundnaht vor dem Einschweißen des Steg-Füllstückes mit widerstandbeheizten Wärmematten simuliert (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1: Lokale Erwärmung einer Rundnaht mit Heizmatte**

Zudem wurde die Wärmebehandlung bei 740 °C und 30 min Haltezeit von Rohrrundnähten nach dem Einschweißen des Steg-Füllstückes mittels widerstandbeheizten Wärmematten mit beidseitiger und einseitiger Beheizung durchgeführt (Abbildung 2).

Die Versuchsnahte waren mit Thermo-Elementen zur Temperaturregelung und -kontrolle ausgerüstet.



**Abbildung 2: Lokale Erwärmung einer gasdichten Membranrohrwand mit Heizmatte**

Die wärmebehandelten Rohrrundnähte wurden hinsichtlich der Härteverläufe untersucht und das Gefüge beurteilt.

Es wurde ein FE-Modell zur Simulation der Temperatur- und Spannungsverteilungen aufgestellt. Das Berechnungsmodell der Temperaturverteilung wurde anhand der im Versuch ermittelten Temperaturverläufe angepasst. Das Berechnungsmodell der Spannungsverteilung wurde durch Eingabe von Fließkurven optimiert.

Im Rahmen der Untersuchung sind fünf frei zugängliche Rohrrundnähte vor dem Einschweißen des Steg-Füllstückes mit widerstandbeheizten Wärmematten wärmebehandelt und untersucht worden.

Der Einfluss Steg-Füllstück-Einschweißung auf die bereits wärmebehandelte Rundnaht wurde an einer dieser Rundnähte bewertet.

Im Rahmen der Wärmebehandlung von Montagenähten sind nach dem Einschweißen des Steg-Füllstückes zwei Bereiche mit beidseitiger Beheizung und ein Bereich mit einseitiger Beheizung (mit widerstandbeheizten Wärmematten) untersucht worden.

Die Bewertung ergab, dass die o.g. Wärmebehandlungsverfahren technisch umsetzbar sind.

- Für diese Verfahren wurde in den mittig liegenden Rundnähten die Zieltemperatur erreicht.
- Es wurden weder durch die Wärmebehandlung Risse verursacht noch Verformungen der Wand festgestellt.
- Die Berechnung ergab nach Abkühlung Zugspannungen in Höhe der Streckgrenze (bei Raumtemperatur).
- Die Härten in Schweißgut und Wärmeeinflusszone sind gesunken.

Bei Anwendung eines Wärmebehandlungsverfahrens für mehrere Nähte einer gasdichten Membranwand besteht noch Optimierungspotenzial zur Erreichung einer gleichmäßigen Temperaturverteilung.

Erste praktische Erfahrungen liegen für Induktiv-Glühung an Rohrschweißnähten vor (Abbildung 3).



**Abbildung 3: Induktiv-Glühung an einer Rohrschweißnaht**

Allgemein diskutierte Risiken bei der Umsetzung dieser Maßnahme sind:

- Örtliche Wärmeeinbringung (Fläche) → Plastische Verformungen und resultierende lokale Spannungen erhöhen die Gefahr der Rissbildung an metallurgischen und geometrischen Kerben.
- In Bereichen, die nicht direkt unterhalb der Heizmatte sind (Kesselinnen-seite), werden keine ausreichenden Temperaturen erreicht.
- Gefahr der Überhitzung für Bereiche direkt unter der Heizmatte → Verschlechterung der Zeitstandeigenschaften.
- Beeinflussung des Grundwerkstoffes (GW) durch 2. Spannungsarmglühungen → Verschlechterung der Zeitstandeigenschaften, Sekundärhärteneffekt bei  $T < 700 \text{ °C}$ .

### 9.3 Transport-/ Montagehilfen

Verschiedene Kraftwerke haben für den Transport und bei der Handhabung auf der Montage besondere Maßnahmen ergriffen, Details der Umsetzung einer Beispielanlage sind im Folgenden beschrieben.

Bauteile sind für Transport, Lagerung und Montage zu konservieren. Rohre sind zur Vermeidung der Bildung von Schwitzwasser bzw. innere Verunreinigungen mit

Endkappen zu versehen. Ein erschütterungsarmer Transport und Montage der Bauteile sind anzustreben.

Durchbiegungen beim Transport, Lagerung und Montage sind z.B. durch Traversen, Gestelle, Abstandselemente aus nichtmetallischen Werkstoffen zu vermeiden. Ansonsten sind die Biegeradien für die Membranwandsegmente vorzugeben und einzuhalten. Abbildung 4 zeigt beispielhaft den Einsatz von Traversen während der Montage von Membranwandsegmenten.



**Abbildung 4: Einsatz einer Traverse während der Montage auf der Baustelle**

## Über vgbe energy

**VGB PowerTech e.V.\*** ist der internationale Fachverband für die Erzeugung und Speicherung von Strom und Wärme. Derzeit hat der Verband 436 Mitglieder; Betreiber, Hersteller und mit der Energietechnik verbundenen Institutionen. Die Mitglieder kommen aus 34 Ländern und repräsentieren eine installierte Erzeugungsleistung von 302.000 MW.

Die Aktivitäten von **vgbe energy** umfassen:

- Bereitstellung einer internationalen Plattform für die Systematisierung, den Austausch und den Transfer von technischem Know-how.
- Gatekeeper und Berater zu technischem Know-how für die Mitgliedsunternehmen und andere Verbände der Branche.
- Harmonisierung von technischen und betrieblichen Standards.
- Identifizierung und Organisation gemeinsamer F&E-Aktivitäten.
- Exklusiver Zugang der Mitglieder zu qualifiziertem Expertenwissen.
- Vertretung der Interessen der Mitglieder.

Die Ergebnisse der Arbeit des **vgbe energy** werden unter anderem in den vgbe-Standards und in der internationalen Fachzeitschrift **vgbe energy journal** veröffentlicht.



**energy** steht für „vision generation benefit“. Mit einem „e“ in der Abkürzung sowie mit dem Motto „Energy is us“ verdeutlicht der Verband sein Leitbild, Zukunftstechnologien für eine umweltschonende, sichere, wirtschaftliche und bezahlbare Energieversorgung zu entwickeln. Hinter der neuen Marke steht auch eine starke Aufforderung – „be“! Der vgbe energy versteht sich damit als aktiver Partner in der Energieversorgung: be energised, be inspired, be connected, be informed, d.h. der Verband will Kommunikator, Brücke und Plattform für seine Mitglieder sein.

\* vgbe energy ist seit September 2021 der neue Markenauftritt des VGB PowerTech.

**VGB PowerTech e.V.**  
Deilbachtal 173 | 45257 Essen  
Deutschland

**Vorsitzender**  
Dr. Georgios Stamatelopoulos

**Geschäftsführer**  
Dr. Oliver Then

**Kontakt**  
Jens Ganswind-Eyberg  
t +49 201 8128-295  
e jens.ganswind@vgbe.energy



**be** informed

[www.vgbe.energy](http://www.vgbe.energy)