

Schmidl, W.; Klotz, S.; Molitor, D.; Schneider, D. (2020)

**Praktische Qualitätsbestimmung
für Schweißplattierungen**

In: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P.; Gosten, A. (Hrsg.):
Energie aus Abfall, Band 17, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH,
Neuruppin 2020, S. 619-626

Praktische Qualitätsbestimmung für Schweißplattierungen

Werner Schmidl, Susanne Klotz, Dominik Molitor, Dominik Schneider

1. Randbedingungen durch Korrosion	1
2. Gefügemerkmale von Schweißplattierungen im Korrosionsszenario	3
3. Thermische Randbedingungen	4
4. Bewertungsmatrix zur praktischen Bestimmung der Qualität einer Schweißplattierung	6
5. Literatur	9

Die Korrosion in Kesselanlagen mit Abfall und Biomassen als Brennstoff stellt auf den Wärmetauscherflächen in den Strahlungszügen oberhalb der Feuerfestauskleidung und auf den Heizflächen im konvektiven Teil eine so hohe Belastung dar, dass häufig Schweißplattierungen aus Nickelbasislegierungen (vornehmlich Alloy 625 und 686) als Korrosionsschutz eingesetzt werden. Das Endergebnis einer Plattierung mit einer Nickelbasislegierung ist von vielen Parametern (Schweißverfahren, Schweißparametern, Schutzgas, Grundwerkstoff und dessen Vorbereitung, etc.) abhängig und kann demzufolge auch verschiedene Ausprägungen annehmen, ohne dass eine grundlegende Vorgabe, wie etwa eine vertraglich vereinbarte Sollschichtdicke von z.B. 2,0 mm, dabei unterschritten wird. Um demzufolge eine qualitätsbezogene Einstufung einer Plattierung vornehmen zu können, sollten andere bzw. weitere Kriterien erfasst und bewertet werden.

Der vorliegende Beitrag legt dar, dass – neben den Kriterien der 2019 überarbeiteten Richtlinie VdTÜV-Merkblatt 1166 [1] für Schweißplattierungen – ergänzende Merkmale für eine praxisnahe Qualitätsbestimmung genutzt werden können. Diese Merkmale werden zu einer Bewertungsmatrix zusammengeführt und können auf diesem Wege entsprechend der Anforderungen des Auftraggebers gewichtet werden. Es ergibt sich die Möglichkeit einer vergleichenden Beurteilung von Qualitätsmerkmalen verschiedener Schweißplattierungen. Dieses Vorgehen soll die Auftraggeber bei der Vergabe unterstützen und ihnen zusätzlich zu den kaufmännischen Kriterien auch technische Kriterien an die Hand geben.

Die Bewertungsmatrix und die einzelnen Qualitätsmerkmale werden in Kapitel 4 vorgestellt.

1. Randbedingungen durch Korrosion

Durch Hochtemperatur-Chlorkorrosion und durch Salzschnelzenkorrosion entsteht an den Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung, aber auch in Biomasseverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerken, ein großer wirtschaftlicher Schaden, der vor allem über Einbußen in der Verfügbarkeit wirkt. Seit vielen Jahren laufen die Bemühungen der Betreiber solcher Anlagen, durch vorausschauende Instandhaltung den Anforderungen zu begegnen. Neben Feuerfestsystemen spielen auch Schweißplattierungen und andere metallische Schutzschichten eine gewichtige Rolle im täglichen Kampf gegen Abzehrung durch Korrosion. Abbildung 1 gibt eine Erläuterung zu den ablaufenden Korrosionsmechanismen auf einem ungeschützten Wärmetauscherrohr.

Die passivierende Wirkung von typischen Eisenbegleitelementen (Chrom, Mangan, Molybdän, etc.) lässt bei einem chlorinduzierten Hochtemperaturkorrosionsangriff stark nach und das Element Nickel tritt in Kombination mit den genannten Vertretern, aber auch mit der Columbitgruppe (Nb, Ta und Cb etc.), als korrosionshemmend in den Vordergrund. Aus diesem Grund haben sich Nickelbasislegierungen im Korrosionsschutz der Wärmetauscherflächen von MVA und verwandten Anlagen durchgesetzt.

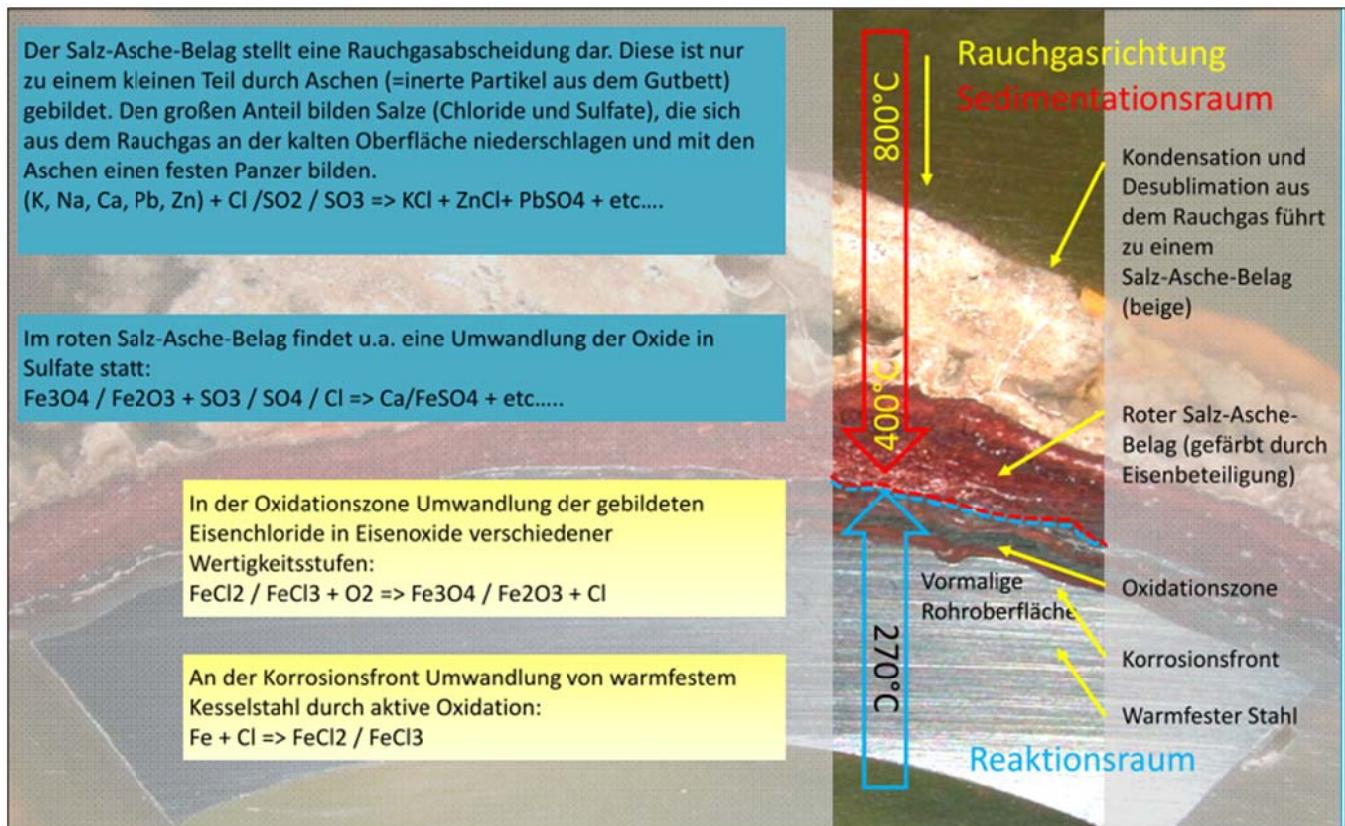


Abbildung 1: Dargestellt ist ein Querschnitt durch den Belag auf einem Wärmetauscherrohr einer Membranwand. Als Basis ist unten silberfarben der Kesselstahl zu erkennen. Darauf bauen sich eine Korrosionsschicht und darüber ein Salz-Asche-Belag auf. Beispielhaft sind einige Reaktionen in den Belagsschichten aufgeführt. Der Belag durchläuft eine komplexe Reifungsgeschichte vom ersten Aufbau einer dünnen Salzschicht beim Anfahren bis zu dem unten abgebildeten Zustand. Für ein besseres Verhältnis ist es sinnvoll die beschriebenen Reaktionen in der Reihenfolge von unten her zu lesen. Bemerkung: Alle Reaktionen sind nicht stöchiometrisch ausgeglichen und nur beispielhaft für die vielen möglichen Phasen genannt.

In der Frühzeit der Schweißplattierungen in MVA drehte sich viel um den Parameter „Eisenaufmischung“. Gemeint ist die Aufschmelzung und damit Aufnahme von Eisen aus dem zu plattierenden Grundwerkstoff. Durch Rückschläge im Kampf gegen die Korrosion angetrieben wurde dieser Parameter durch die fortschreitende Schweißtechnik immer besser gestaltet. Es zeigt sich anhand der Befunde in einigen Anlagen, dass die Eisenaufmischung allein zwar nicht der ausschlaggebende Grund für eine bessere oder schlechtere Korrosionsresistenz ist, da selbst Auftragsschweißungen mit einer geringen Eisenaufmischung (aktuelle Schweißplattierungen liegen oftmals bei 1 Gew.-% Eisengehalt) zum Teil stark korrodieren können. Dennoch hat die Messung der Eisenaufmischung nach wie vor ihre Berechtigung, da sie ein Hinweis auf das Ausmaß des Wärmeeintrags durch den Schweißpro-

zess ist. Ein hoher Wärmeeintrag kann zu einer hohen Segregation und damit zu einer verminderten Korrosionsresistenz führen.

2. Gefügemerkmale von Schweißplattierungen im Korrosionsszenario

Die dendritische Erstarrung einer Schweißlegierung beim Auftragsschweißen bedingt ein charakteristisches Gefüge und bestimmt auch die Segregation der verschiedenen Legierungspartner. Dabei hängt die chemische Zusammensetzung und Textur des dendritischen Gefüges von verschiedenen Faktoren ab (z. B. Vorbehandlung der Oberflächen, Wärmeeinbringung, Abkühlgeschwindigkeit, etc.). Das entstehende Gefüge untergliedert sich in Dendriten und interdendritische Phasen. In den dendritischen Phasen werden bevorzugt Nickel, Eisen und Chrom angereichert, während in den interdendritischen Phasen Kohlenstoff, Stickstoff, Silizium und Molybdän angereichert werden [2]. Bevorzugt werden die Dendriten durch den Mechanismus der Hochtemperatur-Chlorkorrosion angegriffen (Abbildung 2). Ein wichtiger Beitrag für einen optimalen Korrosionsschutz ist daher ein möglichst feines dendritisches Gefüge mit einer geringen Entmischung und damit homogenen Zusammensetzung zwischen dendritischer und interdendritischer Phase.

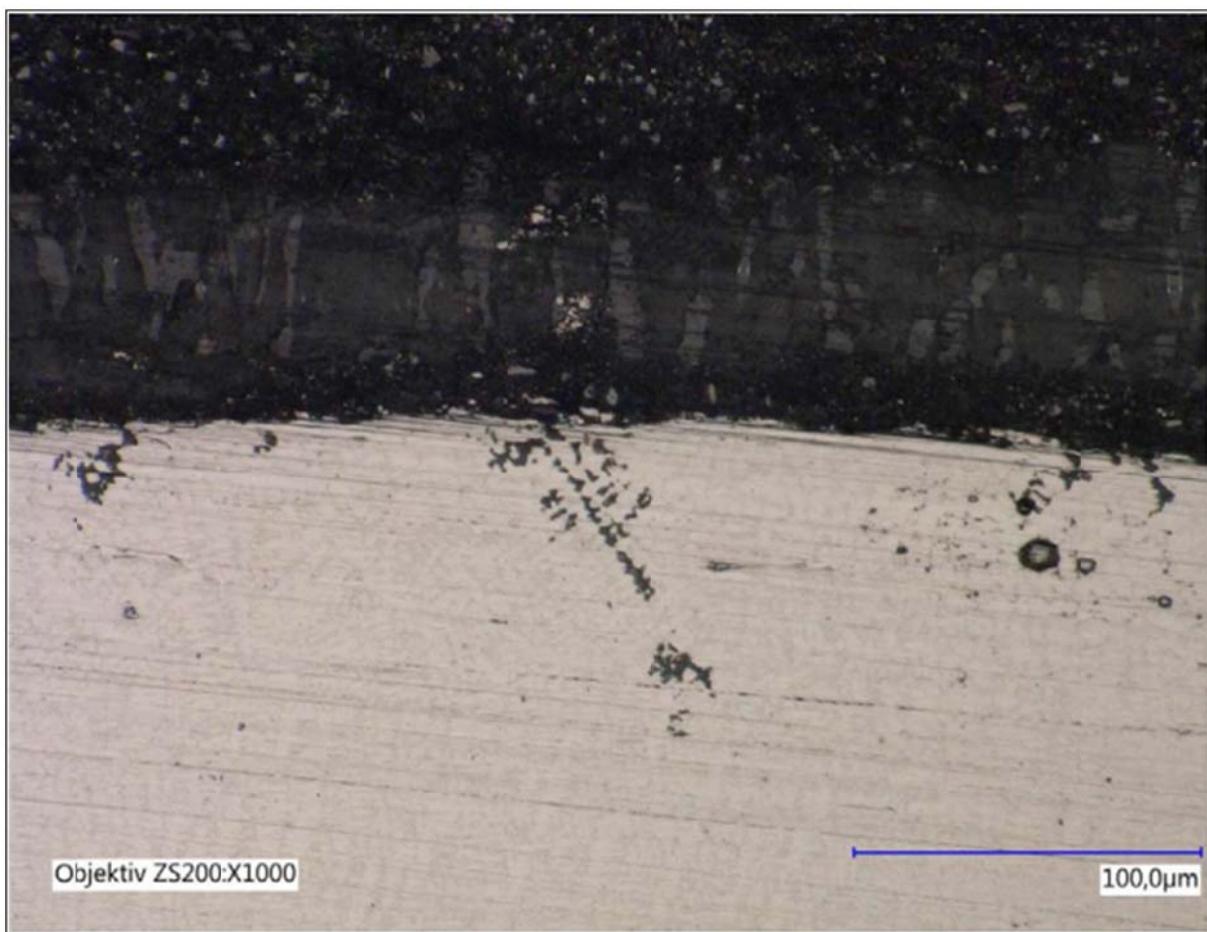


Abbildung 2: Der Korrosionsangriff erfolgt von der Belagsseite (oben) entlang der dendritischen Phase in die Schweißplattierung.

3. Thermochemische Randbedingungen

Die Schweißplattierung ist im Betrieb einer Beeinflussung durch Salzschmelzen und verschiedenen Partialdrücken von aggressiven Agenzien ausgesetzt. Als Reaktionsraum dafür steht zunächst, im unverschmutzten Zustand, die blanke Claddingoberfläche und im Laufe des Betriebes auch der sich darüber bildende Salz-Asche-Belag zur Verfügung, der unter wechselnden Bedingungen (Rauchgaszusammensetzung und Wärmestromdichte) in seinem lokalen Mikromilieu für die eigentliche Korrosion sorgt.

Die lokal aufgeprägte Wärmestromdichte als Konsequenz aus einem thermischen Gradienten vom heißen Rauchgas in das kühlende Medium (Wasser-Dampf-Gemisch im Wärmetauscherrohr) wird durch die lokalen Eigenschaften von Belag, Schutzschicht und Rohrwandgeometrie geprägt. Folgende Modellierungsergebnisse stellen beispielhaft die Bedeutung lokaler Merkmale der Oberflächenmorphologie vergleichend gegenüber: In der Abbildung 3a ist das Ergebnis einer Modellrechnung zu sehen, das die Wärmestromdichteverteilung in einem ebenmäßig ausgebildeten Cladding dargestellt (Schichtdicke konstant 2,0 mm). In Abbildung 3b ist das Ergebnis einer Modellrechnung zu sehen, das die Wärmestromdichteverteilung in einem unregelmäßig geschweißten Cladding darstellt. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass zum Teil Schichtdickenunterschiede von 1 bis 2 mm zwischen den einzelnen in Fallnaht geschweißten Schweißbraupen vorhanden sind. Im Vergleich beider Modellierungen ist ersichtlich, dass bei gleich hoher thermischer Last, das unregelmäßig geschweizte Cladding lokale Wärmestromdichtespitzen aufweist. Diese sind auf die unebene Oberflächenmorphologie zurückzuführen und stellen nach Ansicht der Autoren den Grund dafür dar, dass die Wahrscheinlichkeit für einen lokalen Korrosionsangriff (z.B. durch Salzschmelzen) ansteigt. Daraus ist zu folgern, dass ein möglichst gleichmäßig ausgeführtes Cladding gegenüber einem ungleichmäßig ausgeführten Cladding zu bevorzugen ist.

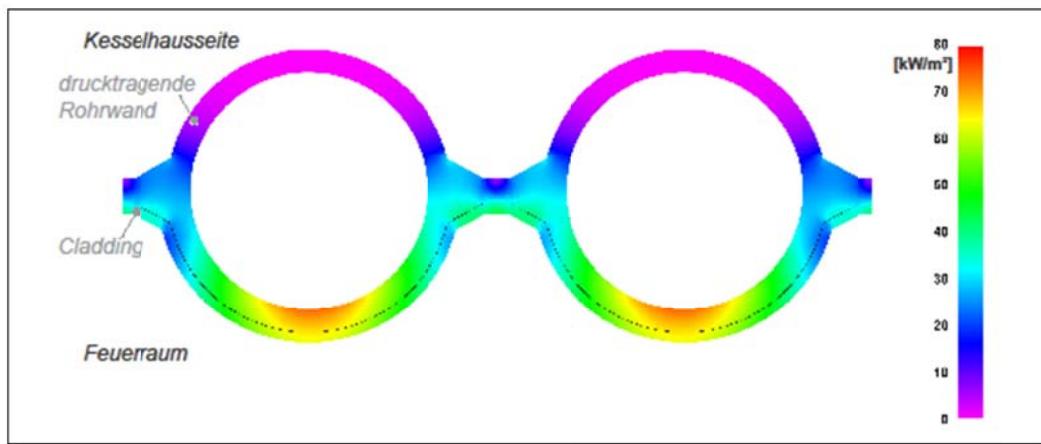


Abbildung 3a: Wärmestromdichteverteilung in einem gecladdeten Rohrwandsegment mit konstanter Schichtdicke von 2,0 mm

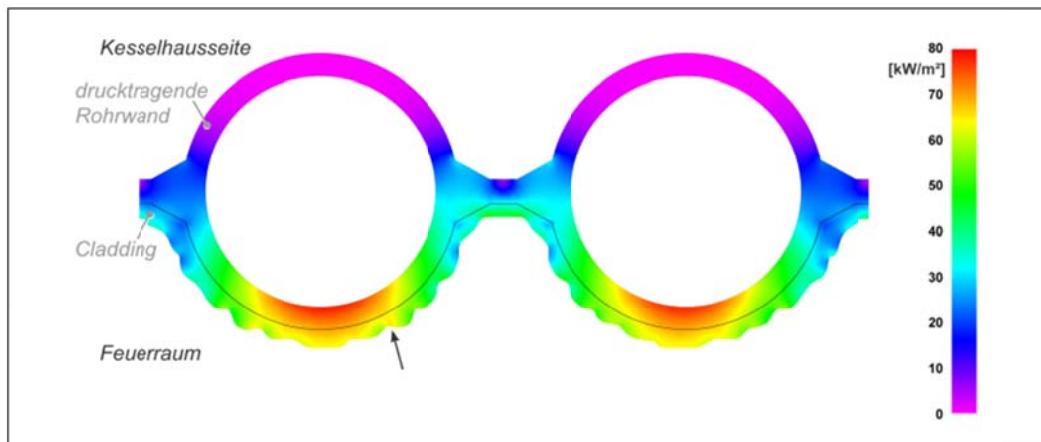


Abbildung 3b: Wärmestromdichteverteilung in einem gecladdeten Rohrwandsegment mit ungleichmäßig ausgeprägter Schichtdicke mit Schichtdickenunterschieden von ca. 1 bis 2 mm. In Abhängigkeit der Schichtdickenunterschiede kommt es zu lokalen Wärmestromdichtespitzen im Bereich einzelner Überlappungen (Pfeil)

4. Bewertungsmatrix zur praktischen Bestimmung der Qualität einer Schweißplattierung

Die praktische Qualitätsbestimmung von Schweißplattierungen erfolgt typischerweise im Vorfeld zu einer Auftragsvergabe. Werden diese Untersuchungen bei CheMin durchgeführt, durchläuft jede eingereichte Probe ein standardisiertes Untersuchungsprogramm. Hierfür wird vom Hersteller eine Arbeitsprobe von mindestens einem Rohrwandsegment aus zwei Rohren von mindestens 200 mm Länge zur Verfügung gestellt. Diese Arbeitsprobe wird in festgelegten Arbeitsschritten bearbeitet: Zunächst erfolgt eine photographische Dokumentation der Arbeitsprobe sowie zerstörungsfreie Messung von Schichtdicke und Eisengehalt. Anschließend wird eine sog. Zwillingsrohrbrille von der Arbeitsprobe abgetrennt. Dieses Teilstück wird an der Schnittfläche in einem mehrstufigen Prozess angeschliffen, poliert und geätzt. Im Anschluss können lichtmikroskopische Untersuchungen in Bezug auf Qualitätsmerkmale durchgeführt werden (siehe die nachfolgend beschriebenen Merkmale).

Alle so behandelten und untersuchten Proben einer Auftragsvergabe werden abschließend in eine Bewertungsmatrix eingebunden. Grundlage dieser Matrix ist die Summe aller – nach der gleichen Vorgehensweise – bisher untersuchten Claddingproben. Dies schließt ein, dass sich mit jeder neu hinzukommenden Probe die Bewertungsgrundlage mit den Veränderungen der Qualität von Schweißplattierungen im Markt mitentwickelt.

Folgende Qualitätsmerkmale werden an einem 200 mm langen, 2 Rohr breiten Abschnitt der Arbeitsprobe zerstörungsfrei bewertet:

- **Schichtdicke**
Die Schichtdicke wird durch ein magnetinduktives Messverfahren ermittelt. Die Messpunkte werden an die Stellen mit den geringsten Schichtdicken, die erfahrungsgemäß an den Überlappungen der Schweißraupen liegen, gesetzt. Das Ergebnis dieses Qualitätsmerkmals geht nicht in die Bewertungsmatrix ein. Die Schichtdicke gibt nach der Auffassung der Autoren und auch nach VdTÜV 1166 ein vertraglich vereinbartes absolutes Kriterium vor, das zwingend einzuhalten ist.
- **Eisenaufmischung**
Die Eisenaufmischung wird mittels Röntgenfluoreszenzanalyse an mehreren Positionen an definierten Punkten (Rohrflanken und dem Rohrscheitel) bestimmt. Der maximal gemessene Wert ist für die Bewertung führend. Dieser Wert geht ebenfalls nicht in die Bewertungsmatrix ein, sondern stellt, ebenso wie die geforderte Schichtdicke, eine Mindestanforderung dar. Liegt der maximale Wert also über einem (vertraglich) vereinbarten Wert, ist diese Anforderung nicht erreicht.
- **Homogenität der Schichtdicke**
Eine starke Inhomogenität der Schichtdicke kann die Wahrscheinlichkeit für den Beginn eines Korrosionsangriff anheben (vgl. Kapitel 3). Der Wärmefluss wird in Richtung des geringsten Widerstandes, sprich der geringsten Schichtdicke, geleitet. Je stärker die Reliefunterschiede sind, desto stärker ist dieser Effekt.

Die Messung erfolgt an den Überlappungen (Minima) und den danebenliegenden Raupen (Maxima). Aus dem Unterschied ergibt sich der Wert der Nahtüberhöhung.

Folgende Qualitätsmerkmale werden an einer geschliffenen und geätzten Zwillingsrohrbrille mikroskopisch erfasst, d.h. nicht zerstörungsfrei untersucht (Abbildung 4):

- **Homogenität der Einbrandtiefe**

Für die Bewertung der Homogenität der Einbrandtiefe werden die Wanddicken im Minimum und Maximum an mehreren definierten Punkten an den Rohrbrillen gemessen. Je geringer der Unterschied dieser Wertepaare, desto homogener ist der Prozess der Auftragsschweißung verlaufen.

- **Wärmeeinflusszone**

Beim Auftragsschweißen verändert / vergröbert sich das Gefüge des Grundwerkstoffes in Abhängigkeit der Wärmestromdichtebelastung. In diesem gefügeveränderten Bereich, der Wärmeeinflusszone (WEZ) verändern sich die Werkstoffeigenschaften (z.B. Abnahme der Zähigkeit und tendenziell auch der Korrosionsresistenz), weshalb diese Zone möglichst klein bleiben sollte.

- **Anbindung an den Grundwerkstoff**

Bei der Bewertung der „Anbindung“ des Claddings an den Grundwerkstoff werden die Anbindefehler über die gesamte Rohrbrille zwischen Cladding und Grundwerkstoff in ihrer Länge vermessen, aufaddiert und ins Verhältnis zur kompletten Anbindelinie gesetzt.

- **Poren**

Für die Bewertung des Qualitätsmerkmals „Poren“, wird die Anzahl der Poren innerhalb der Claddingschicht (aber ohne diejenigen mit direktem Kontakt zum Grundwerkstoff, vgl. Kriterium „Anbindung“) ausgezählt.

- **Dendritenbreite**

Für die Bewertung des Qualitätsmerkmals „Dendritenbreite“ werden die breitesten Dendriten bestimmt und vermessen. Wie unter Kapitel 2 ausgeführt zeigen die Erfahrungen aus dem Betrieb, dass der Korrosionsangriff im Fall des Mechanismus der Hochtemperatur-Chlorkorrosion entlang der Dendriten verläuft. Je breiter also die Dendriten sind, desto größer ist die Angriffsfläche und desto rascher der Korrosionsfortschritt in die Tiefe des Werkstoffgefüges.

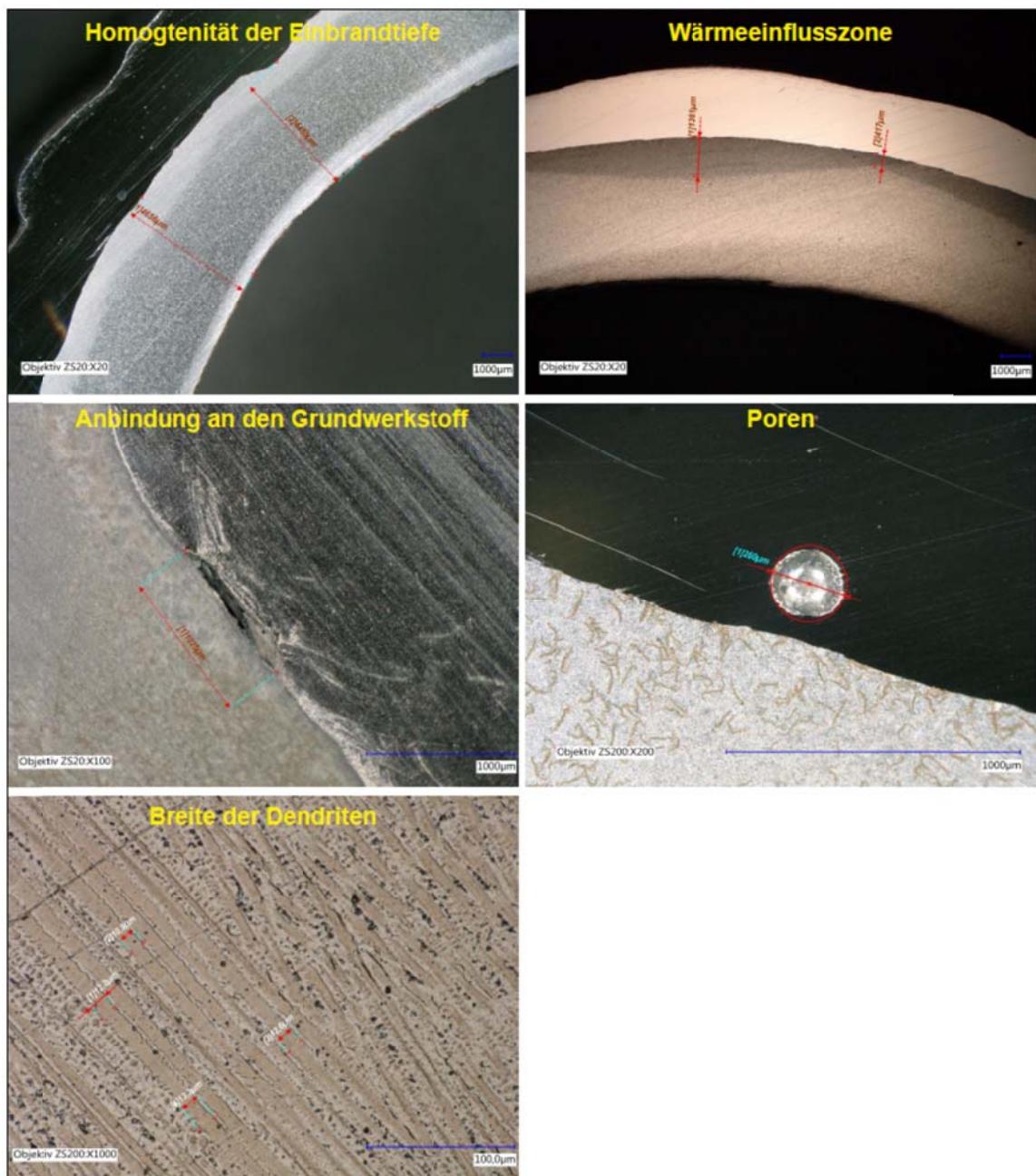


Abbildung 4: Messung verschiedener Gefügemerkmale nach Ätzung der Rohrbrille

In Abbildung 5 sind beispielhaft zwei Arbeitsproben dargestellt, links eine Probe mit geringerer Qualität, rechts mit höherer Qualität, gemäß der zugrunde gelegten Qualitätsmerkmale.

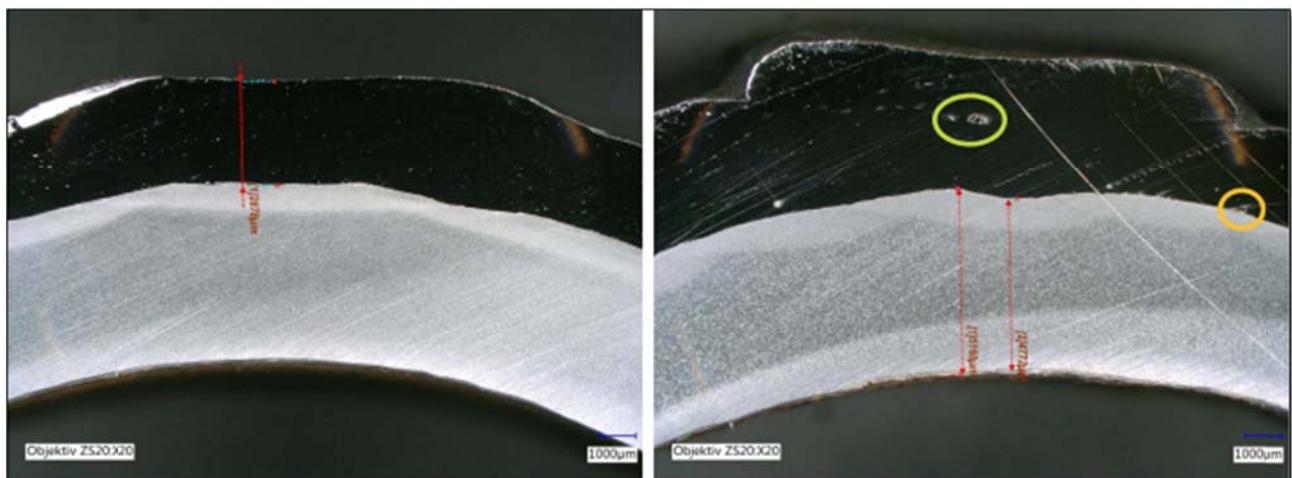


Abbildung 5: Links ein Cladding mit hoher Qualität. Das Cladding zeigt einen homogenen Einbrand in den Grundwerkstoff und eine dünne Wärmeeinflusszone. Die Schicht ist homogen ausgeführt ohne große Reliefunterschiede.

Rechts ein Cladding mit geringerer Qualität. Der Einbrand in den Grundwerkstoff ist lokal sehr unterschiedlich. Das Cladding zeigt deutliche Reliefunterschiede mit Kerben in der Überlappungszone. Bereits bei dieser geringen Vergrößerung sind Poren (grüne Markierung) und Anbindefehler (orange Markierung) zu sehen.

Werden Besonderheiten, wie Rissansätze, Reste von Strahlmitteln, Oxide in der Anbindungszone, Schlackeeinschlüsse etc. festgestellt, werden diese ebenfalls dokumentiert.

5. Literatur:

- [1] Herzog, T.; Molitor, D.; Spiegel, W.: "Einfluss von Wärmestromdichte und Eigenschaften des Schweißguts auf die Abzehrung von Schweißungen". Abgerufen 20.11.2019, von www.chemin.de/Publikationen/PDF/2011/Einfluss_von_Waermestromdichte.pdf
- [2] VdTÜV-Merkblatt Schweißtechnik 1166 Stand Mai 2019