Gemeinschaftskraftwerk
Schweinfurt GmbH
GKS • Hafenstraße 30 • 97424 Schweinfurt

Erfahrungen mit "neuen" Werkstoffen im GKS

Erstellt für:
VDI Wissensforum, 12./13.06.2012, Bremen

V. Müller / GKS GmbH, Schweinfurt
R. Warnecke / GKS GmbH, Schweinfurt

Inhalt

1 Einleitung 3
2 Stand des Korrosionsschutzes an MVA 4
2.1 Feuerfest im Hinblick auf Korrosionsschutz (Regulierung des Wärmehaushaltes ist hier unberücksichtigt) 4
2.2 Schweißplattierung Inconel 4
2.3 Thermisches Spritzen 7
2.4 Dickschichtvernickelung 12
3 Einbau von dickschichtvernickelten Rohren bei GKS 17
4 Betriebserfahrungen mit vernickelten Membranwänden 22
5 Zusammenfassung 28

1 Einleitung

„Booh ey, is´ das heiß – das hält ja keiner aus“ sagt ein junger Besucher im Rahmen einer Führung beim Blick durch die Schauluke an der Feuerraumrückwand.

Doch - dass muss „einer“ aushalten. Die Werkstoffe, die in der MVA im Einsatz sind, unterliegen höchsten thermischen und korrosiven Belastungen. Das wird einem erst wieder so richtig bewusst, wenn man solche Aussagen von völlig unvoreingenommenen Besuchern hört.

Die Maßnahmen, die durch Anlagenbauer und Betreiber getroffen werden, damit die Standzeit der eingesetzten Materialien bzw. die Anlagenverfügbarkeit gesteigert werden kann, unterlagen in den letzten Jahren einem langsamen aber dennoch ständigen Wandel.

Zwischenzeitlich haben „Vollcladding-Anlagen“ ihre Bewährungsprobe bestanden. Allerdings sind auch diese nicht zu 100 Prozent von Korrosion bzw. Verschleiß befreit. Wenn auch nur in untergeordneten Bereichen wie z.B. Futterbleche an Messstutzen. Aber Futterbleche in schlechtem Zustand sind nicht die Probleme, die einen im Zuge der Instandhaltung von Anlagen umtreiben. Viel relevanter sind die seit Beginn der Wärmenutzung an MVA bereits bekannten und „üblichen Verdächtigen“ wie die Verdampferwände des 1. und ggf. auch 2. Kesselzuges sowie die Konvektionsheizflächen im Überhitzerbereich und bei einigen Anlagen zwischenzeitlich auch die ECO-Heizflächen (MVA mit SNCR-Technologie, niedrigen Reingaswerten und keiner bzw. ungenügender NH_3- Schlupf-„Bremse“).

Jeder Betreiber hat Interesse, die Verfügbarkeit seiner Anlagen hoch und die Instandhaltungskosten niedrig – besser im optimalen Kosten-Nutzen-Bereich zu halten. Nicht immer stellt eine rein zustandsorientierte Instandhaltung das Optimum für den weiteren Anlagenbetrieb dar.

Die derzeit dem Stand der Technik entsprechenden sekundären Schutzmaßnahmen für die korrosionsfreudigen Bereiche unserer Kesselanlagen sind allseits bekannt:

- Feuerfest (geklebt, vergossen, hinterlüftet)
- Schweißplattierung (Werksfertigung, vor Ort)
- Thermisches Spritzen (HOVF, Plasma-Verfahren, mit / ohne therm. Nachbehandlung)
- Dickschichtvernickelung
- Nichtmetallische Schichten

Bei vorgenannter Aufzählung sind die beiden zuletzt gennannten Systeme (noch) nicht dem Stand der Technik zuzuordnen. Hier fehlen bislang die langfristigen Erfahrungen bzw. die Erfolgserlebnisse. – Aber hierzu - zumindest für die Dickschichtvernickelung - im Folgenden mehr.

2 Stand des Korrosionsschutzes an MVA

Nachfolgend ein kurzer Überblick über die einzelnen relevanten Schutzsysteme in MVA:

2.1 Feuerfest im Hinblick auf Korrosionsschutz (Regulierung des Wärmehaushaltes ist hier unberücksichtigt)

Die Zeiten der Stifte und Hütchen und der damit verbundene Einsatz von plastischen Massen oder auch der Einbau von Spritzmassen sind eindeutig vorbei (außer man hat unkritische Brennstoffe und/oder möchte kurzfristig Geld sparen). Wer heute im Feuerfestbau was auf sich hält, der setzt zumindest geformte Rohrwandplatten in geklebter-, hintergossener- oder hinterlüfteter Bauform ein.

Ein geklebtes Plattensystem ist nur so gut, wie die annähernd gleichmäßige Temperaturverteilung bzw. Wärmestromdichte im Wandbereich pro Meter Kesselhöhe. Liegt eine extreme Schieflage (bzw. zu kalte Bereiche) vor, so kann es zu offenen Fugen kommen, die dann eine verstärkte Schadstoffgängigkeit zulassen und nach ausreichender Verweilzeit zu Korrosionsangriff an der Rohrwand führen.

Bei einem vergossenen System sind gezielte Dehnfugen im Bereich der Platten installiert. Nur der Verguss hinter der Platte bildet abgesehen von den Verarbeitungsstößen eine durchgehende relativ dichte Schutzschicht.

Die hinterlüfteten Systeme stellen durch die aufgeprägte Spülluft eher ein „Verdrängungssystem“ als eine Schutzschicht dar – oder anders ausgedrückt: die Spülluft stellt die Schutzschicht dar. Somit ist sicherzustellen, dass alle Bereiche ausreichend durch- bzw. umspült werden, um den Anforderungen hinsichtlich Korrosionsschutz gerecht zu werden. Ein hinterlüftetes System verzeiht bei ausreichender Spülluftmenge und freier Umströmung der Halteteile ggf. auftretende Schieflagen im ersten Zug eher als die Vorgenannten. Die Standzeiten dieser Systeme (zumindest das welches die Markteinführung seit einigen kalten Wintern hinter sich hat) liegen für GKS gesprochen bei acht Betriebsjahren (rel. kleiner Querschnitt des 1. Zuges; einbahniges Rostsystem)

2.2 Schweißplattierung Inconel

Schweißplattierungen an Membranwänden sind im GKS seit Anfang 1996 im Einsatz. Begonnen hat die „Erfolgsstory“ der Verfügbarkeitssteigerung mit einer einlagigen Vor-Ort-Cladding- Maßnahme oberhalb des Feuerfestsystems. Diese Maßnahme war allerdings nicht lange mit Erfolg gekrönt. Nach ca. 4.700 Betriebsstunden ereignete sich ca. 300 mm oberhalb des Claddings ein kapitaler 2-F-Bruch an der Membranwand. Als Ursache kamen Wärmespannungen durch den vorausgegangenen Schweißprozess und/oder verstärkte Korrosion durch den lokalen Temperaturabfall („Kondensation“) in Frage.

Unabhängig hiervon wurde seit diesem Zeitpunkt bei GKS nur noch Werkstattcladding eingesetzt. Das Vor-Ort-Cladding stellt auf Grund der beengten Platzverhältnisse keine optimale Lösung für einen zeitoptimierten Revisionsbetrieb dar. Weiterhin bringt das Werkstattcladding die bereits hinlänglich bekannten Vorteile:

- Geringere thermische Spannung im Grundwerkstoff auf Grund Umlauf- / Zwangskühlung
- Ausgleich des Schrumpfungsprozesses durch entsprechende Vergrößerung der Rohrteilung
- Geringere Aufmischung des Grundwerkstoffes durch Fertigungsbegleitende QS
- Keine Schadstoffvorbelastung der Membranwände, die durch SSR und Glasperlenstrahlen sowieso nicht beseitigt werden können
- Keine Querbeeinflussung des Schweißprozesses durch Nachbargewerke

Abbildung 1: Verformung einer Membranwand durch Vor-Ort-Cladding (nicht GKS)

Die Montage der Wände erfolgt für unsere Belange somit schneller und effizienter, zumal mittlerweile Paneelstöße nicht mehr großflächig mit umfangreichem Hand-Cladding ausgeführt werden müssen.

Das Verfahren der Schweißplattierung unterlag in den Jahren seit Markteinführung in Deutschland einer kontinuierlichen Weiterentwicklung. Verbesserungen bzw. Mehraufwand bei der Oberflächenbeschaffenheit des Grundwerkstoffes, mehrfacher Schweißlagenaufbau und Weiterentwicklung des Schweißverfahrens an sich führen zu einer anderen Qualität der Schweißplattierung als vor 15 Jahren.

Inwieweit sich diese Verbesserungen positiv auf die Standzeit auswirken, kann man wahrscheinlich nur schwer nachvollziehen oder gar belegen, da sich über einen so langen Zeitraum auch unsere Brennstoffe und ggf. auch die Betriebsweise der Anlage geändert haben.

Mittlerweile wird bei Membranwänden auch eine Cladding „light“ Variante mit einem einlagigen Aufbau und ca. 1 mm Schichtstärke angeboten. Bei dieser Variante sei die Frage gestattet - warum macht man sich hinsichtlich Fe-Aufmischung und mehrlagigen Schweißplattieren Gedanken wenn´s mit einem mm auch getan sein sollte? Eventuell war es ja auch nur ein Kundenwunsch.

Ggf. findet sich ja mal ein Betreiber, der einen expliziten Vergleich zwischen den verschiedenen „Releases“ der Schweißplattierung durchführt und anschließend sagen kann

in der Anlage XYZ sind die und die Claddingvarianten verbaut und halten unter gleichwertigen Randbedingungen so und so lange.

Über die Lebensdauer die Schweißplattierung bedarf es unabhängig von Fe-Gehalt in der Decklage mit zunehmender Einsatzdauer einiges an Aufwand und Pflegemaßnahmen.

Diese setzen eine Reinigung der schweißplattierten Flächen mittels Sandstahlreinigung bzw. Glasperlenreinigung voraus. Beides entfernt die eigentlich gewünschte Oxidschicht und führt somit zu leichten Verlusten an der Schutzschicht. Anschließend werden die Flächen in der Hoffnung befeuchtet auf möglichst wenig Fe-Ausblühungen zu treffen.

Anschließend erfolgt das Ausschleifen der markanten Stellen mit nachfolgender WIG-Schweißung mit 2.4831.

Mit derartigen Pflegemaßnahmen haben bei uns die ältesten Schichten aus dem Jahre 1996 (einlagiger Aufbau, schweißen in Wannenlage) bis ins Jahr 2010 gehalten und damit fast 99.000 Bh erreicht.

2.3 Thermisches Spritzen

Unter dem Sammelbegriff thermisches Spritzen summieren sich mehrere Verfahren, die alle zur Aufgabe haben, eine Schutzschicht mehr oder weniger dicht auf das zu schützende Trägermaterial aufzubringen:

- Konventionelles Flammspritzen mit Draht oder Pulver,
- Hochgeschwindigkeitsflammspritzen,
- Lichtbogenspritzen,
- Plasmaspritzen.

Die verschiedenen Verfahren unterscheiden sich durch die Art und Weise der Applikation der Schutzschichten. Grundsätzlich können verschiedene Werkstoffe mit unterschiedlichen Schutzzielen appliziert werden. In MVA liegt der Schwerpunkt eindeutig beim Korrosionsschutz.

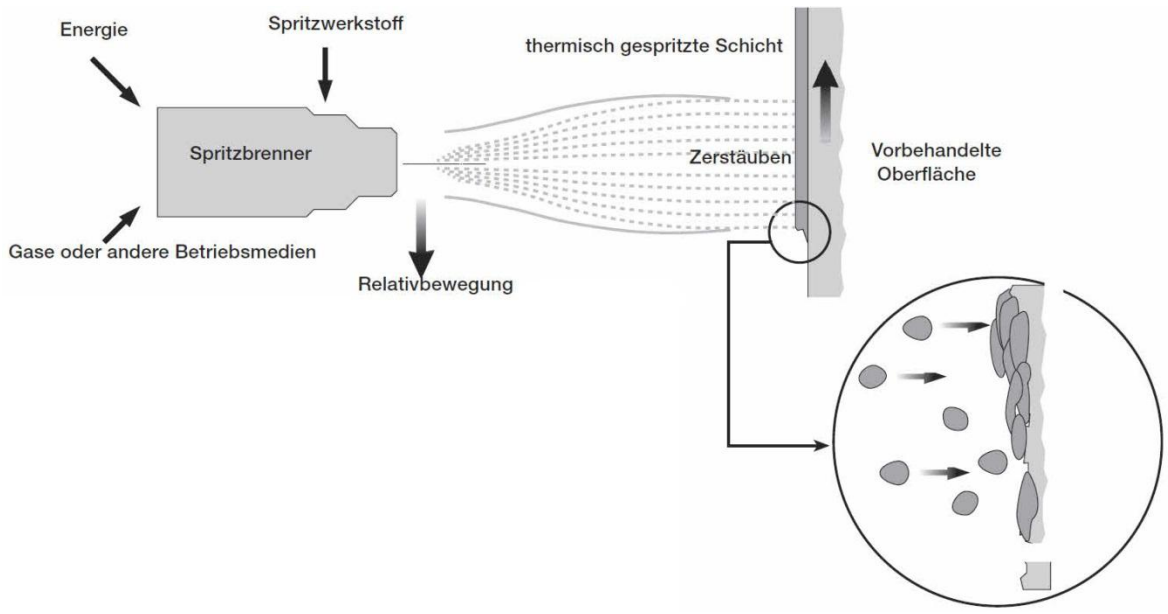
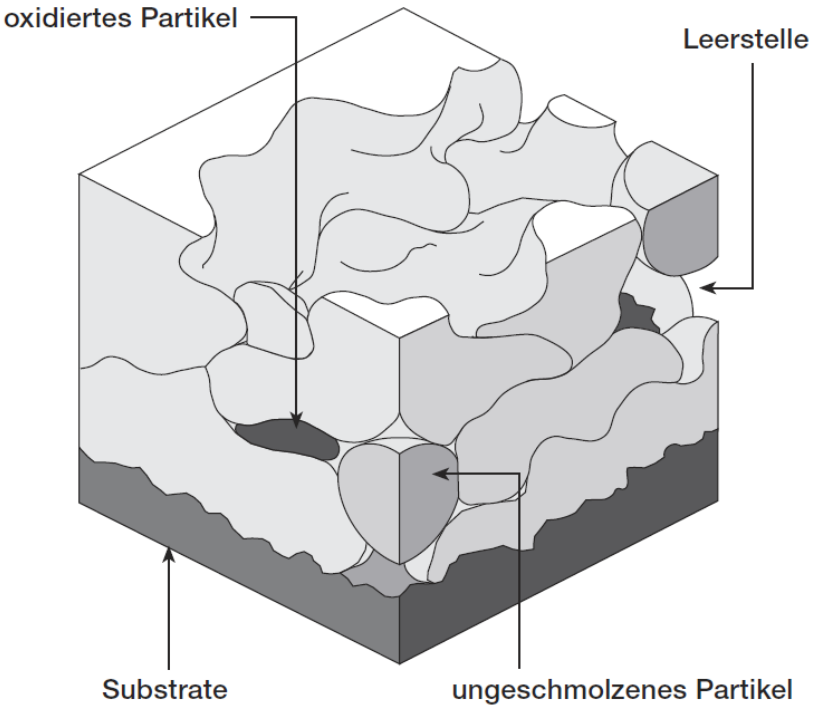


Abbildung 2: Grundprinzip therm. Spritzen [Quelle: Sulzer Metco]

Die Struktur der Spritzschicht wird wesentlich vom eingesetzten Verfahren beeinflusst. So lassen sich bei Einsatz von Legierungen als Spritzwerkstoff ohne weitergehende Nachbehandlung mit dem Hochgeschwindigkeitsflammspritzen und dem Plasmaspritzen die Schichten mit den geringsten Porositäten (< 2%; bzw. 2-5%) erreichen.

Sowohl Porosität als auch Oxidation der Partikel vor Auftreffen auf das Werkstück haben auf die Standzeit der Schutzschichten negative Auswirkungen. „Erschwerend“ kommt beim thermischen Spritzen hinzu, dass die übliche Schichtstärke gegenüber einer Schweißplattierung oder Dickschichtvernickelung deutlich niedriger liegt.



Weiterhin haben Spritzschichten die Eigenschaft, eine sehr spröde Schutzschicht auszubilden, die bei einer mechanischen Belastung (z.B. mechanisches Abrütteln von ÜH-Paketen bei rauchgasseitiger Reinigung) relativ leicht beschädigt werden können.

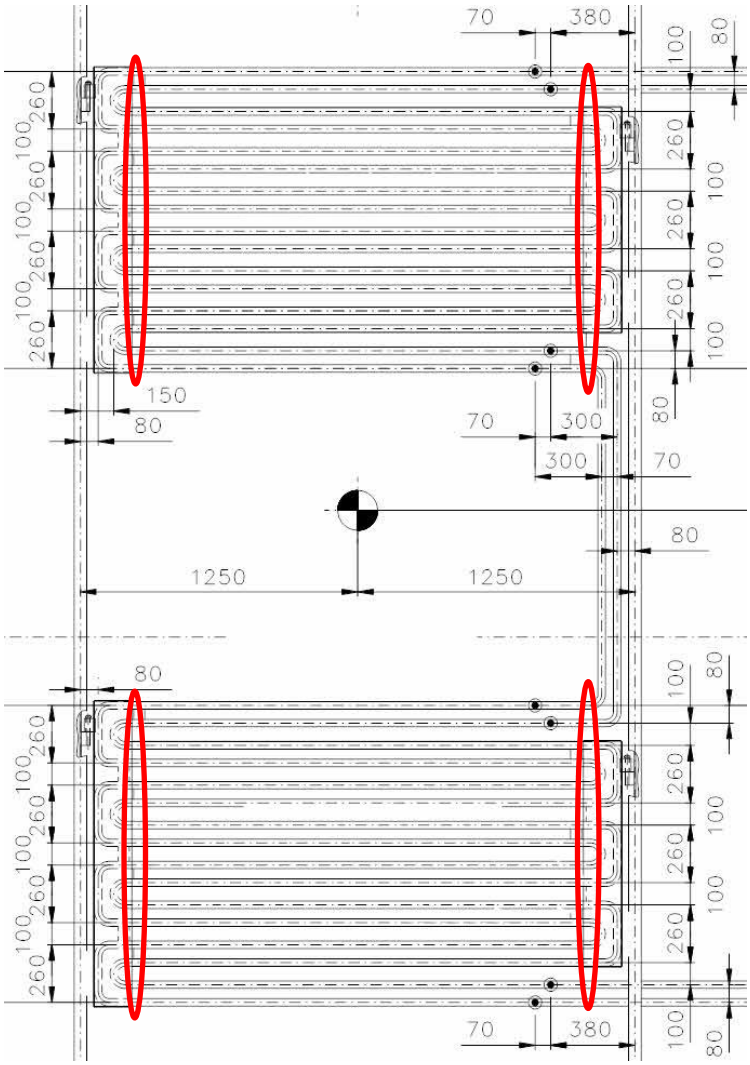
Abbildung 3: Schichtaufbau (unbehandelt) [Quelle: Sulzer Metco]

Zwischenzeitlich geht die Entwicklung beim thermischen Spritzen dahin, dass die Legierungen durch entsprechende Additive bzw. Legierungszuschläge weniger spröde gestaltet werden. Weiterhin werden nach dem Beschichten die Werkstücke einer thermischen Nachbehandlung unterzogen, um zum einen die Porosität der Schicht zu verringern und zum anderen die Bindung der Schicht auf dem Grundwerkstoff durch den Aufschmelzprozess zu verbessern.

Mit der thermischen Nachbehandlung handelt man sich allerdings für einige Anwendungsfälle Nebeneffekte ein, die bislang nur mit Mehraufwand bei der Komponentenfertigung zu beherrschen sind. Die Bauteile unterliegen wie bei thermischen Prozessen üblich einem gewissen Verzug, der ein Ausrichten erfordert.

Abbildung 4: Einbau einer ÜH-Scheibe (thermisches Spritzen mit nachträglichem Aufschmelzen)

Bei Einzelrohren oder Harfenheizflächen stellt dieses ja kein Problem da. Bei Konvektionsheizflächen in einem 4-Zugkessel jedoch, die einem Biegeprozess unterzogen werden müssen, gestaltet sich der Aufwand im Zuge der Fertigung des Bauteiles deutlich höher. Bei erforderlichen Rohrbiegungen müssen die Bereiche nachträglich beschichtet und nachbehandelt werden oder zusätzliche Schweißarbeiten in Kauf genommen werden.


70
380
100
80
260
100
260
100
260
100

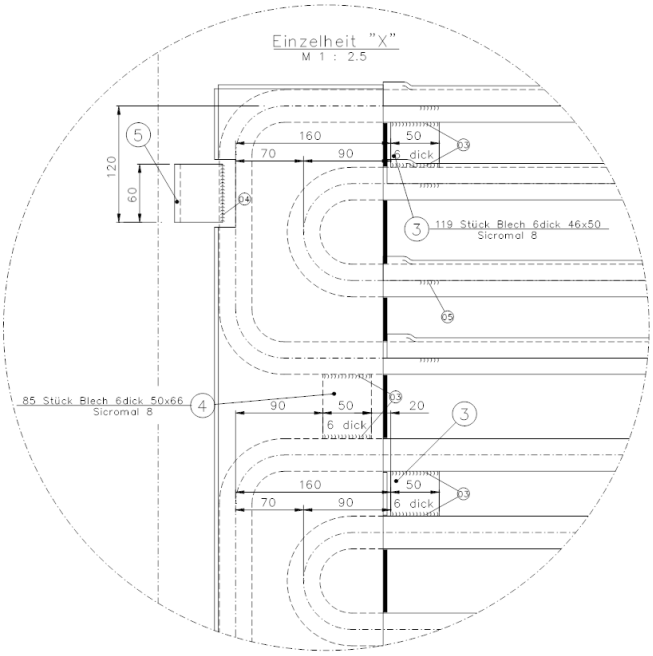


Abbildung 6: Detail "Bogenkasten"

Die Lage der Nähte für den Einsatz von Rohren mit thermischen Spritschichten sollte dann innerhalb des „Bogenkasten“ liegen.

Thermisches Spritzen wird relativ oft zur Standzeitverlängerung von vorgeschädigten Rohren bzw. Wandbereichen eingesetzt.

Dass ein System auf vorgeschädigtem Rohr nicht lange bzw. nur ungenügend lange hält, wird oft verdrängt.

2.4 Dickschichtvernickelung

Galvanisch vernickelte Kesselbauteile (Membranwand und Überhitzerrohre) wurden 2003 zum ersten Mal in der MVA Rugenberger Damm eingesetzt. Die vernickelten Rohre an den Überhitzern unterlagen dem unmittelbaren Einfluss der Rußbläser. Hier wurde die aufgebaute Nickeloxidschicht in regelmäßigen Abständen abgetragen und führte zu einem zu schnellen Abzehren der Schutzschicht.

Die im Bereich des ersten Zuges eingesetzten vernickelten Membranwände sind noch immer im Einsatz. Trotz dieser in Teilbereichen positiven Erfahrung wurde es geraume Zeit still um die Dickschichtvernickelung. Und das, obwohl theoretisch alle im Kesselbau vorkommenden geometrischen Formen dem Galvanisierungsprozess unterzogen werden können.

Vernickelungsprozess:

In dem Galvanisierungsbad wird zwischen Anode und Kathode eine entsprechende Spannung angelegt. Hiermit wird das Nickel aus dem Elektrolyt am zu beschichtenden Werkstück (Kathode) abgeschieden. Über die Stromstärke kann die Geschwindigkeit des Galvanisierungsprozesses eingestellt werden.

> Beim galvanischen Vernickeln werden die zu vernickelnden Gegenstände nach einer geeigneten Vorbehandlung in einen Nickelelektrolyten eingetaucht und durch das Anlegen einer elektrischen Spannung scheidet sich auf der Oberfläche des Gegenstands ein Nickelüberzug ab.
>
> Die Nickelabscheidung an der Kathode läuft vereinfacht nach folgendem Schema ab:
>
> $$Ni^{2+} + 2\,e^- \longrightarrow Ni$$
>
> Die Vorgänge sind in der Realität allerdings komplizierter, da die Nickelionen erst ihre Hydrathülle abstreifen müssen, ehe sie zu metallischem Nickel reduziert werden. [Wikipedia]

Neben dem aus dem privaten Bereich bekannten Glanzvernickeln (z.B. Modeschmuck) gibt es weitere Vernickelungsverfahren mit den unterschiedlichsten Einsatzgebieten.

Für den Korrosionsschutz an Dampferzeugern wird die Dickschichtvernickelung auf Reinstnickelbasis eingesetzt. Die bei diesem Verfahren üblicherweise erreichten Schichtdicken liegen zwischen 200 und 3.000 µm.

Die Schwierigkeit beim Vernickelungsprozess ist der Abstand zwischen Anode und Kathode (Werkstück) bei der Rohr-Steg-Rohr-Konstruktion. Ist der Abstand des Anodengitters nicht gleichmäßig, so erfolgt auch der Aufbau der Galvanikschicht ungleichmäßig, da der Gitterabstand ähnlich wie die Stromstärke unmittelbaren Einfluss auf die Beschichtungsstärke hat.

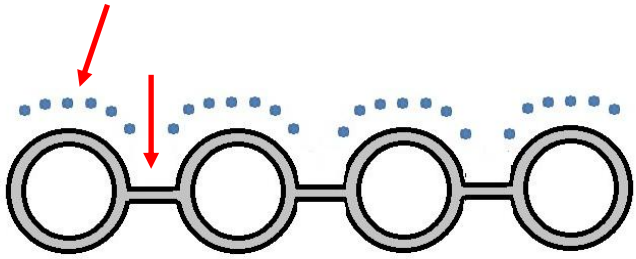


Abbildung 7: Skizze Paneele mit Anodengitter

Abbildung 7 macht den unterschiedlichen Anodengitterabstand und damit die unterschiedliche Nickelschichtdicke deutlich. In den Bereichen in denen sich kein Anodengitter befindet werden geringere Nickelschichten erreicht (s. auch Abbildung10). Es treten auf Grund der bisherigen Geometrie des Gitters verstärkte Schichtdicken zwischen der 10 und 02 Uhr-Position auf (s_{Nickel} ~ 2-4 mm). Dieses wird auch durch die Abbildungen 8 und 9 (Nullmessungen durch den Vernickler) deutlich.

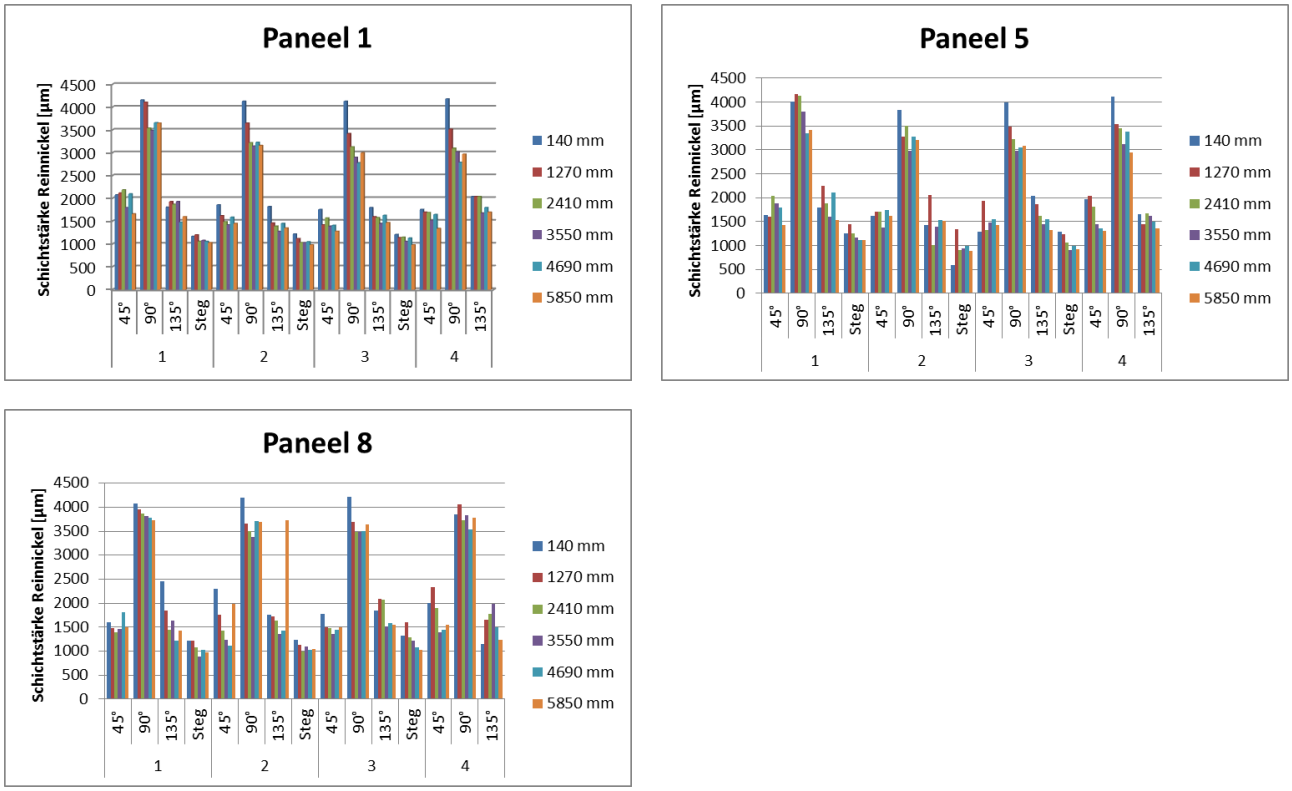
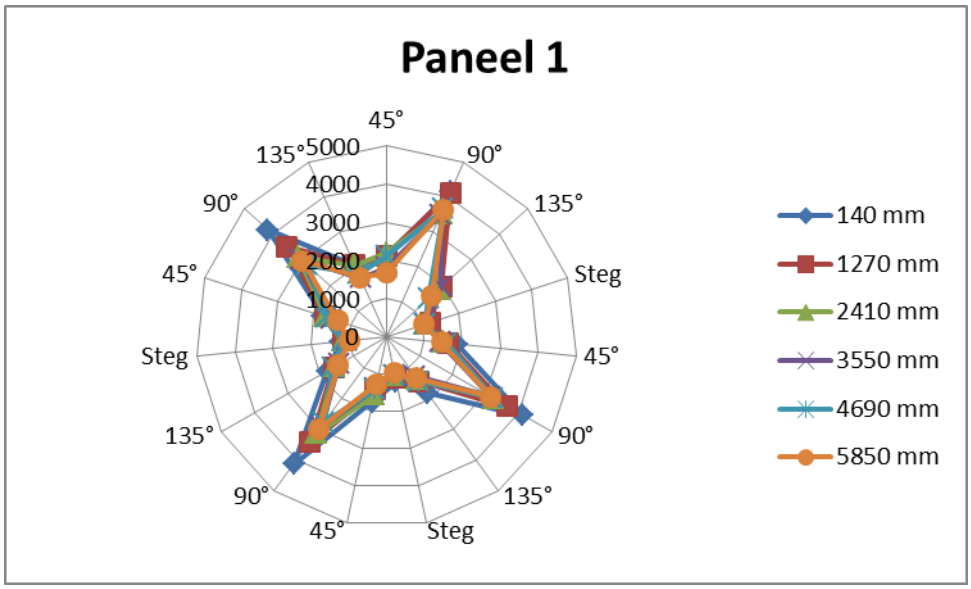
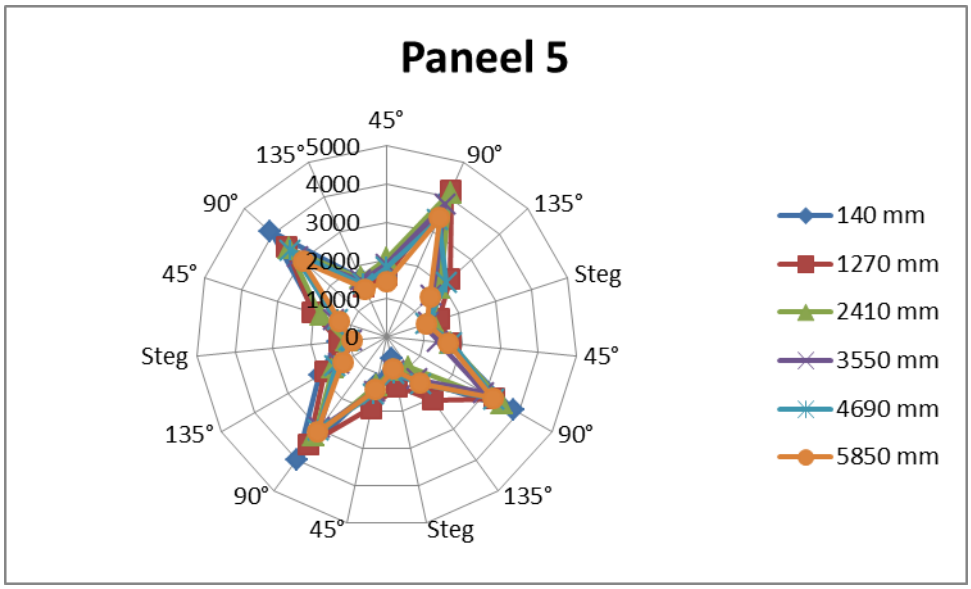


Abbildung 8: Schichtstärken Reinnickel (Paneel 1, 5 und 8)





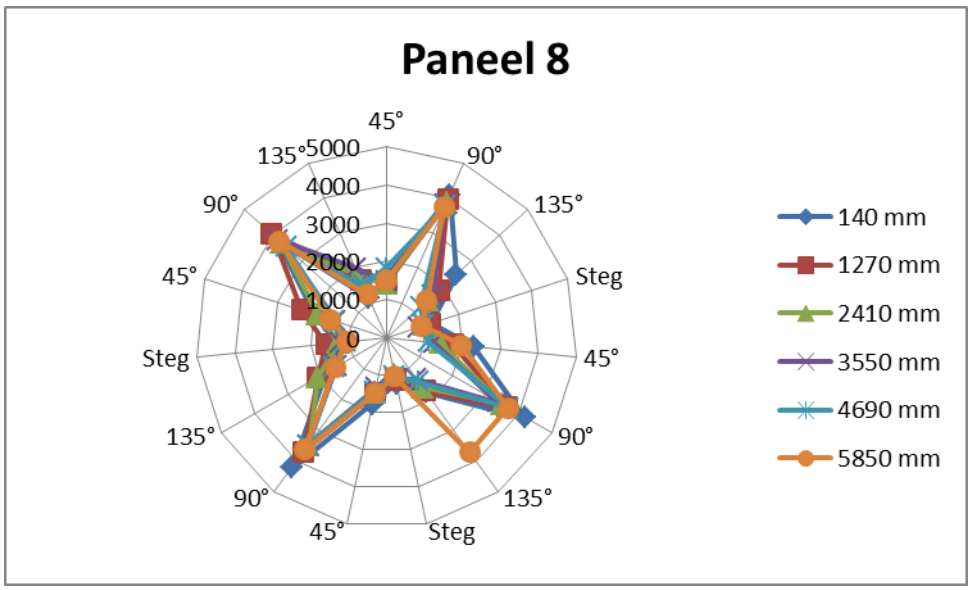


Abbildung 9: Schichtstärkenverteilung (Paneel 1, 5 und 8)

Aus Abbildung 9 wird das Schichtstärkenprofil der jeweiligen Membranwände noch deutlicher erkennbar. Die Bereiche der Flanken und Stege sind eindeutig dünner als der Scheitel- und dessen Nachbarbereiche.

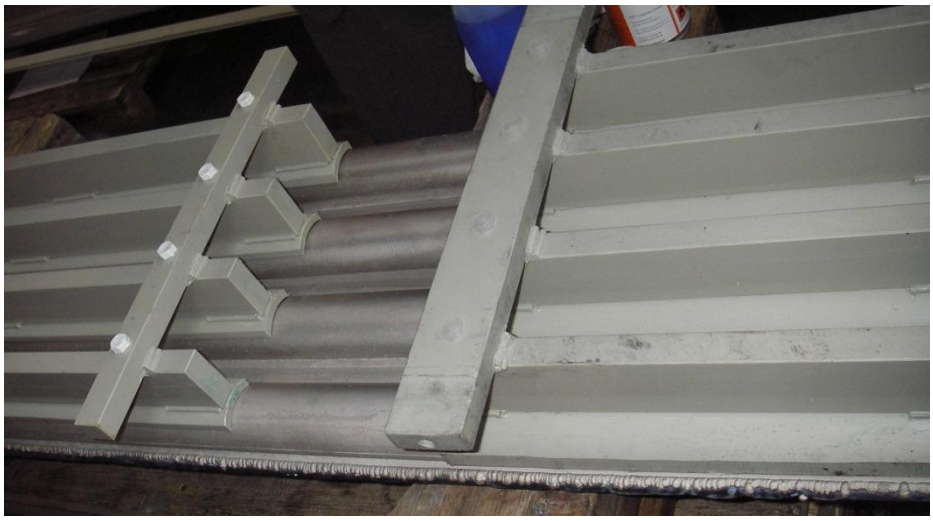


Abbildung 10: Anodengitter (Entwicklungsstand 2009)

Das Anodengitter (Abbildung 10) sollte für künftige Anwendungen der Geometrie der Membranwand optimal angepasst werden, um eine gleichmäßige Nickelschicht zu erreichen. Aus Betreibersicht ist wesentlich, dass eine Mindestnickelschichtstärke von ca. 1,5 bis 2 mm erreicht wird. Treten auf Grund der Geometrie des Anodengitters stärkere Nickelschichten im Scheitel oder zwischen 10 bzw. 02:00 Uhr auf, erhöht sich unnötig der Materialaufwand und damit verbunden der Preis der Vernickelung.

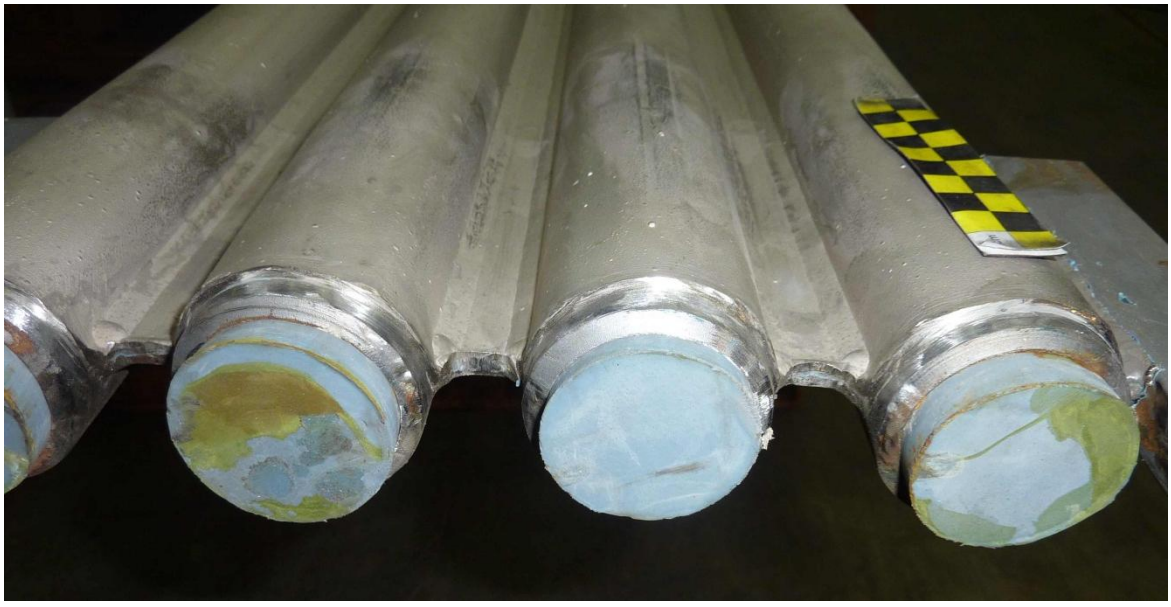


Abbildung 11: Paneele vernickelt (rechts Anschlussflosse für den Anodenstrom)

Durch das Aufbringen eines isolierenden Lackfilmes ist es möglich, vernickelungsfreie Flächen (auch in komplexeren Formen) zu erhalten (Beispiel: Rückseite der Paneele, ½ Stegbereiche links und rechts sowie die Rohranschlussbereiche).

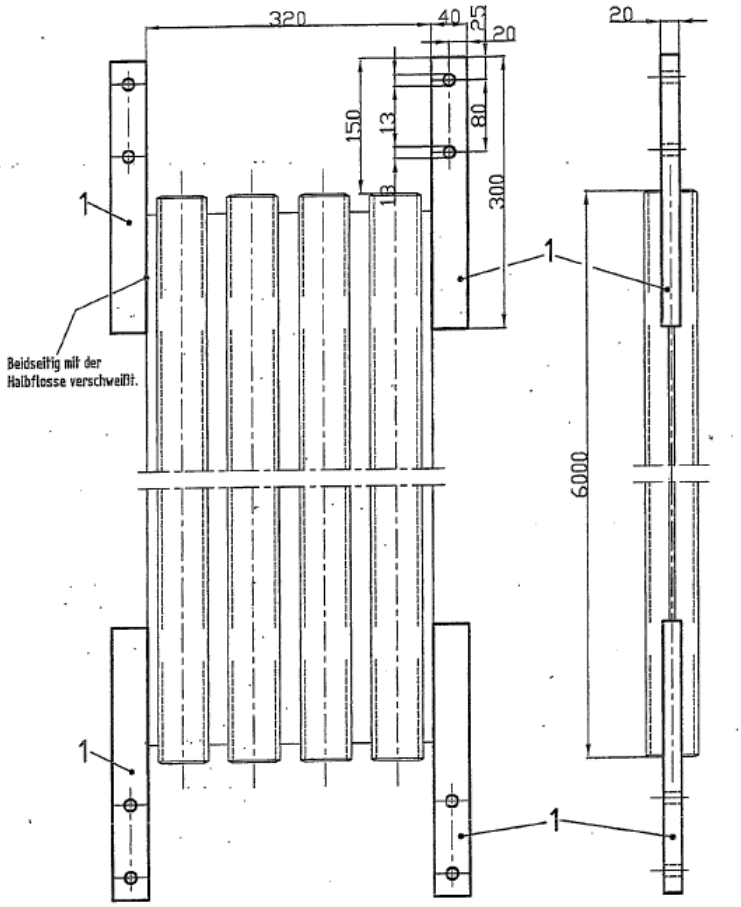


Abbildung 12: Fertigungsskizze Paneel mit Anodenanschlüssen

3 Einbau von dickschichtvernickelten Rohren bei GKS

Im Jahr 2003 wurden auch bei GKS im Überhitzerbereich unter anderem vernickelte Einzelrohre eingesetzt. Hier bestätigten sich die Erfahrungen aus Hamburg: Nickel „mag“ keine Rußbläser.

Im Jahr 2009 kam es zum Kontakt zwischen Baumgarte Boiler Systems GmbH (BBS) und GKS mit dem Ziel, eine größere Testfläche an dickschichtvernickelten Paneel-Wänden einzusetzen. Die Fa. BBS führt in Zusammenarbeit mit H. Ansey (Erfinder) die weitere Entwicklung der Dickschichtvernickelung für den Einsatz in Kesselanlagen durch.

Da es für den Vernickelungsprozess keine gesonderten Anforderungen hinsichtlich der Teilung der Membranwand gibt, wurden die Wände durch GKS-Lagerbestand beigestellt. Vorgesehen war, die Trennwand 1./2. Zug über eine Länge von 6 m mit einer vernickelten Membranwand auszustatten.

Der Vernickelungsprozess stellte sich jedoch schwieriger als erwartet dar. Der Abstand zwischen Anodengitter und zu beschichtender Membranwand sowie die Oberflächengüte der Nickelschicht waren für den Hersteller nicht befriedigend. Man einigte sich darauf, den Großversuch zu verschieben, um weitere Erfahrungen beim Vernickelungsprozess zu sammeln. Ein Paneel wurde GKS für den Einbau zur Verfügung gestellt. Die vorgesehene Betriebszeit war auf ein Jahr limitiert, da im Folgejahr (2010) die Zustellgrenze des Feuerfestmaterials weiter nach unten verlegt werden sollte. Parallel wurden neue Wände mit modifizierten Anoden-Gittern gefertigt.

Abbildung 13: Testfläche Dickschichtvernickelung 2009; hier rechte Seitenwand

Die einjährige Betriebsphase wurde ohne Auffälligkeiten beendet. Der Paneelstoß wurde mit 2.4806 als feuerraumseitige Decklage verschweißt. An der Schutzschicht sowie an den Stegnähten wurden keine Auffälligkeiten festgestellt.

Im Jahr 2010 wurden 10 Membranwände in der Rückwand des 1. Zuges mit einer Länge von 6.000 mm (Länge Vernickelung 5900 mm) eingebaut.

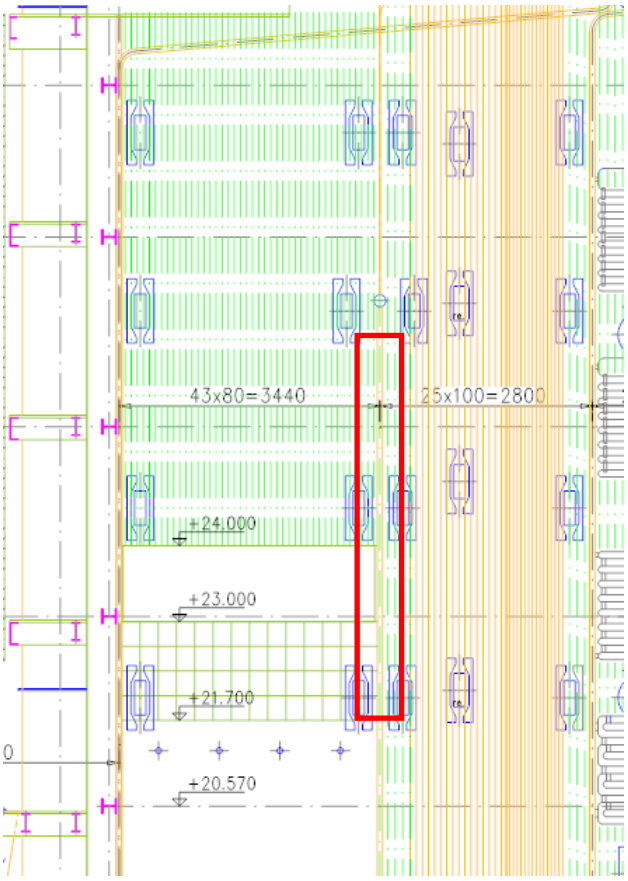


Abbildung 14: Einbaulage der dickschichtvernickelten Wände

Die vertikalen Paneelstöße wurden auf der Seite des 2. Zuges mittels MAG-Fallnaht rauchgasdicht verschweißt. Auf der Seite des ersten Zuges erfolgte zusätzlich eine Gegenschweißung mit 2.4806 die vor der Nachvernickelung mit 2.4155 im manuellen WIG-Verfahren verschliffen wurde. Der Lagenaufbau der Nachvernickelung wurde dreilagig gestaltet.

Das Nachvernickeln der Stegnähte birgt zum heutigen Zeitpunkt ebenfalls noch Ansätze für eine Verbesserung.

Das Auftragsschweißen mit Reinnickel-Stäben unterscheidet sich zu den sonst im Kesselbau üblichen Auftragsschweißungen, da hier keine Legierung vorliegt sondern ein Reinstoff. Dieser hat bei zu hoch eingestelltem Schweißstrom die Eigenschaft, auf Grund der zu hohen Temperatur mit dem Grundwerkstoff keine Bindung einzugehen, sondern wie zu heiß gewordener Lötzinn ohne Benetzung abzulaufen.

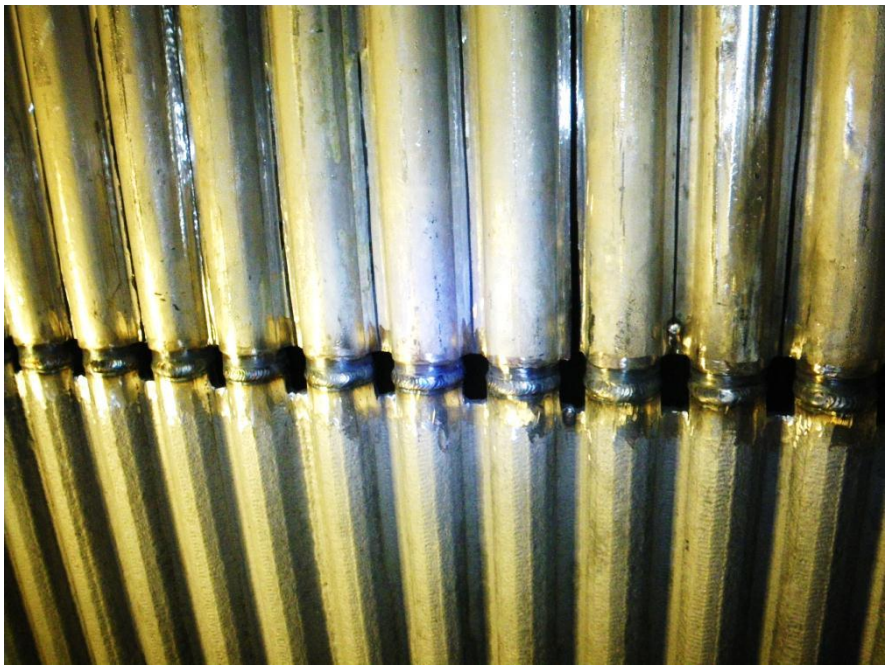


Abbildung 15: Anschluss an Inconel-Wände

Diese Bindefehler treten bei anderen Auftragsschweißungen bei ungünstig gewählten Schweißparametern zwar auch auf, bei Reinstoffen ist das „Toleranzfenster“ aber deutlich kleiner. Somit nehmen diese Nachvernickelungen im Vergleich zu den vertikalen Stegverbindungsnähten bei der Inconel-Montage bislang deutlich mehr Zeit in Anspruch.

Weiterhin sollte vom Stabschweißen auf eine Drahtnachführung (Rollenware) übergegangen werden, um den Schweißprozess stabiler und homogener zu gestalten.

Abbildung 16: Einbau 2010 Trennwand 1./2. Zug

In Abbildung 15 (rechtes Bild) sind die geschlitzten Bereiche bereits mit Reinnickel nachbehandelt. Das linke Bild zeigt die bereits nachvernickelte vertikalen Paneelstöße.

Abbildung 17: Paneelstoß an "Alt-Inconel"

In Abb. 16 sind die teilweise erforderlichen Schlitzungen im Stegbereich -hier bereits für die Nachvernickelung verschliffen zu erkennen.

Abbildung 18: Eingebaute vernickelte Membranwände 2010

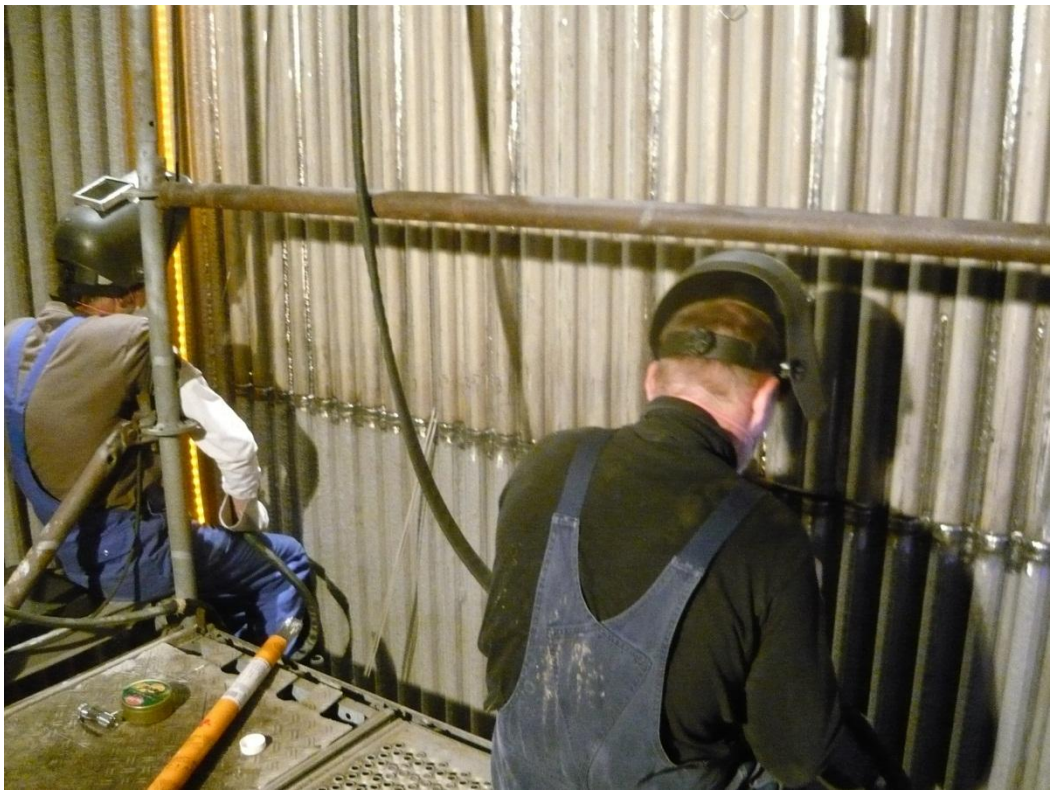


Abbildung 19: Vernickeln von Stegnähten bei Montage

4 Betriebserfahrungen mit vernickelten Membranwänden

Eigentlich sollte die Überschrift eher „Revisionserfahrungen mit vernickelten Membranwänden“ heißen, da bei Betrieb der Anlage keine Unterschiede zu schweißplattierten oder anderen Schutzsystemen zu erkennen sind.

Im Zuge der Montage wurden Wandstärkenmessungen an den Paneelwänden durchgeführt. Die Messungen wurden mittels Ultraschall-Messung durchgeführt, da das bei GKS verfügbare Schichtdickenmessgerät bei einer Reinnickelschicht nicht funktioniert.

Die auf Herstellerdaten basierenden Nullmessungen wurden bewusst nicht herangezogen, da eine künftige Bewertung ebenfalls mit „Bordmitteln“ erfolgen soll. Die Ergebnisse der „Nullmessung“ sind neben den Vergleichsmessungen aus den Jahren 2011 und 2012 in Tabelle 1 für einige Rohre exemplarisch aufgeführt. Die Messungen wurden in drei Ebenen, jeweils bezogen auf die obere Montagenaht, durchgeführt.

Die Wand ist mit der Revision vom März 2012 insgesamt 15.400 Stunden im Einsatz. Grundsätzlich lässt sich hierbei noch nicht von einer Langzeiterfahrung mit ausreichender Standzeit sprechen. Allerdings lassen die Ergebnisse erkennen, dass nicht mit einem Kurzzeiteinsatz der Nickelwände zu rechnen ist.

Tabelle 1: Messergebnisse und Abzehrraten

	Rohr-Nummer	Messebene	2	3	6	7	10	11	14	15	18	19	22	23	26	27	30	31	34	35	38	39
2010	Nullmessung 2010	140mm v oben	9,2	9,1	8,8	9,1	9,6	9,4	9,2	9,1	9,8	9,7	8,5	8,3	8,3	8,6	9,7	9,3	9,3	9,4	9,0	8,8
03 2011	Messung Mittelwert		9,10	9,02	8,19	8,07	9,57	9,43	8,93	8,77	8,99	9,20	8,18	8,08	8,41	8,09	9,57	9,13	8,62	9,00	8,65	8,49
03 2011	Abzehrung zu Nullmessung		-0,10	-0,11	-0,63	-1,00	-0,06	0,04	-0,27	-0,28	-0,84	-0,54	-0,30	-0,18	0,11	-0,55	-0,15	-0,17	-0,69	-0,44	-0,34	-0,28
03 2012	Messung		9,34	9,15	8,27	8,18	9,73	9,54	8,95	8,86	8,95	9,25	8,27	8,08	8,37	8,18	9,54	8,95	9,05	9,05	8,86	8,66
03 2012	Abzehrung zu Nullmessung		0,14	0,02	-0,55	-0,89	0,10	0,15	-0,25	-0,19	-0,88	-0,49	-0,21	-0,18	0,07	-0,46	-0,18	-0,35	-0,26	-0,39	-0,13	-0,11
03 2012	Abzehrung zu 2011		0,24	0,13	0,09	0,10	0,17	0,11	0,02	0,09	-0,03	0,05	0,09	0,00	-0,03	0,08	-0,03	-0,18	0,43	0,05	0,20	0,17
2010	Nullmessung 2010	2000 mm v oben		8,47		8,22		7,60		7,86		8,74		7,26		8,40		9,10		7,85		8,49
03 2011	Messung Mittelwert			7,98		8,09		8,56	8,11	8,29		7,56		7,70		8,10		9,01		8,39	8,63	8,46
	Abzehrung zu Nullmessung			-0,49		-0,13		0,96		0,43		-1,18		0,44		-0,30		-0,09		0,54		-0,03
03 2012	Messung		8,40	8,40	8,40	7,81	8,89	9,08	8,11	8,30	8,60	8,50	8,40	7,72	8,79	8,20	9,57	8,60	8,79	8,20	8,69	8,50
03 2012	Abzehrung zu Nullmessung			-0,07		-0,41		1,48		0,44		-0,24		0,46		-0,20		-0,50		0,35		0,01
03 2012	Abzehrung zu 2011			0,42		-0,27		0,52	0,00	0,01		0,94		0,02		0,11		-0,41		-0,19	0,06	0,04
2010	Nullmessung 2010	4000 mm von oben	8,26		8,74		7,70		7,82		8,26		7,33		7,84		7,60		7,82		8,94	
03 2011	Mittelwert		8,05	7,87	7,86		7,87		7,96	8,07	7,64	8,55	7,51		8,69		8,06		8,76		8,69	7,99
03 2011	Abzehrung zu Nullmessung		-0,21		-0,88		0,17		0,14		-0,62		0,18		0,85		0,46		0,94		-0,25	
03 2012	Messung		8,11	7,81	7,72	8,69	7,91	8,60	8,30	8,20	8,20	8,69	7,42	8,20	8,79	8,50	8,11	9,47	8,89	9,08	8,69	8,20
03 2012	Abzehrung zu Nullmessung		-0,15		-1,02		0,21		0,48		-0,06		0,09		0,95		0,51		1,07		-0,25	
03 2012	Abzehrung zu 2011		0,06	-0,05	-0,14		0,05		0,35	0,14	0,56	0,15	-0,08		0,10		0,05		0,12		0,00	0,22

Die Messungen zeigen, dass keine relevanten Abschwächungen der Nickelschicht festzustellen sind. Alle rechnerischen Differenzen liegen im Bereich der Messunsicherheiten. Die Anzahl der „positiven“ Abweichungen ist höher, als die der gemessenen Abzehrung. Bei den Rohren 7 und 18 auf der ersten Messebene sind im ersten Betriebsjahr Abzehrraten zwischen 1,0 und 0,8 mm festgestellt worden. Im Jahr 2012 nahezu keine Abzehrung. Diese deutet eher auf einen Fehler bei der Nullmessung hin.

Die nachstehende Tabelle zeigt die Abzehrraten pro 1.000 Betriebsstunden.

Tabelle 2: Abrehrraten pro 1.000 Bh

	Rohr-Nummer																			
Messebene	2	3	6	7	10	11	14	15	18	19	22	23	26	27	30	31	34	35	38	39
140	0,01	0,00	-0,04	-0,06	0,01	0,01	-0,02	-0,01	-0,06	-0,03	-0,01	-0,01	0,00	-0,03	-0,01	-0,02	-0,02	-0,03	-0,01	-0,01
2000		0,00		-0,03		0,10		0,03		-0,02		0,03		-0,01		-0,03		0,02		0,00
4000	-0,01		-0,07		0,01		0,03		0,00		0,01		0,06		0,03		0,07		-0,02	

Die erste Befundung nach einem Betriebsjahr zeigte an den Rohren und an den Stegen der jeweiligen Paneele keine Auffälligkeiten. Allerdings mussten 2011 Reparaturmaßnahmen im Bereich der Anschlussnähte an das „Alt-Inconel“ durchgeführt werden (vergl. nachstehende Abbildung).

Weiterhin mussten einige der senkrechten Paneelstöße nachgearbeitet werden.

Abbildung 20: Nacharbeit an den horizontalen Anschlussnähten 2011

Nach einem weiteren Betriebsjahr wurde im März 2012 eine weitere Bestandsaufnahme durchgeführt.

Die Vernickelungen der horizontalen Anschlussnähte zeigten gegenüber dem Jahr 2011 keine negativen Befunde. Optisch konnten auch hier an den Werksvernickelungen keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Die auf Abb. 21 zu erkennenden Mulden sind auf den Herstellprozess zurückzuführen (vergl. Abb. 22).

Abbildung 21: "Mulden" 2012 = Abflachung bzw. Nickelanhäufung auf 10 und 02 Uhr

Abbildung 22: Beispiel für "Mulden" nach Galvanisierung

Die in Abb. 23 zu erkennenden Anhäufungen der Nickelbeschichtung spiegeln sich in den Schichtstärkenermittlungen des Vernickelers (Abbildung 8 und 9) wieder.

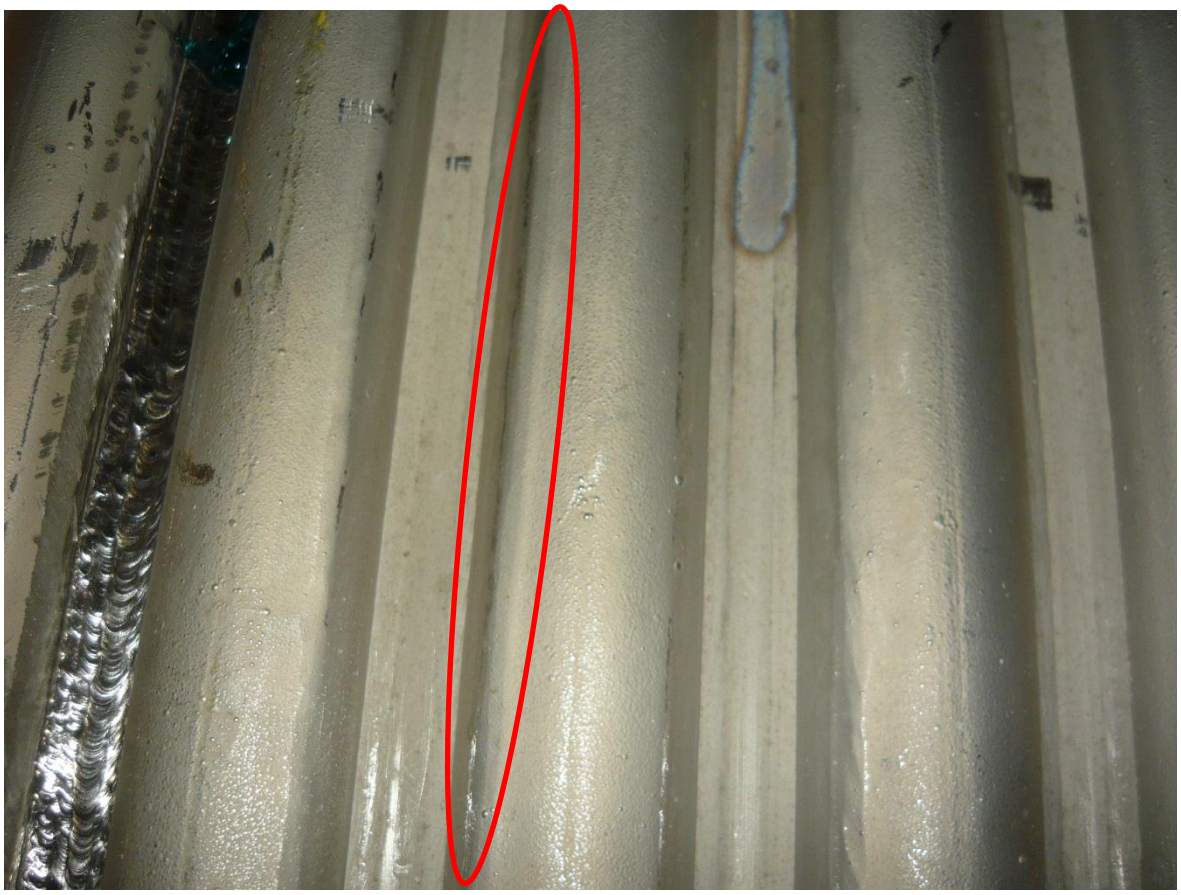


Abbildung 23: Oberflächenstruktur und Nachvernickelung im Steg

Abbildung 24: Bindefehler an Nachvernickelung aus 2011 bzw. 2012

Die bereits unter Kapitel 3 angeführte Problematik an den senkrechten Stegnähten zeigte sich 2012 ebenfalls erneut (Abb. 24). Der bei der Galvanisierung durch Isolationslack geschützte Stegbereich zeigt im Übergang zur galvanisierten UP-Naht der

Membranwandschweißung entsprechende Fehlstellen. Hier konnte anscheinend beim Nachvernickeln keine richtige Bindung mit dem Grundwerkstoff und der vernickelten UP-Naht hergestellt werden. Die bereichsweise „aufgeklebte“ Reinnickelschicht wurde innerhalb von einem Betriebsjahr abgelöst und unterwandert. Dieser Effekt ist an mehreren Stellen an den Stegnähten aufgetreten.

Abbildung 25: Detail Fehlstelle an Nachvernickelung Steg

Die raue Struktur der Oberfläche der Reinnickelschicht (rechte Bildhälfte) beruht darauf, dass die Flächen mit Schlackengranulat anstatt mit Glasperlen gestrahlt wurden.

Der Aufwand für die Pflege bzw. Nacharbeit, insbesondere an den vertikalen Paneelstößen, muss durch Optimierung des Schweißprozesses noch deutlich verbessert werden. Es wird sicherlich keinen „Spaß“ machen, an jeder nachvernickelten Naht in zyklischen Abständen (1 oder 2 Jahre) erneut zum Reinnickelschweißstab (oder -Draht) zu greifen.

An den Wänden an sich sehen wir, abgesehen von der Optimierung der Reinnickelschichtstärke, aktuell keinen weiteren Handlungsbedarf.

5 Zusammenfassung

Dickschichtvernickelung stellt nach heutigem Stand eine echte Alternative zu den bislang dem Stand der Technik entsprechenden Korrosionsschutzmaßnahmen dar. Zumindest lässt eine Betriebszeit bei GKS von 2 Jahren (Hamburg, Rugenberger Damm seit 2003 im Verdampferbereich im Einsatz) keine negativen Anzeichen an den druckführenden Komponenten erkennen. Der Aufwand im Bereich der Stegverbindungen muss mit Sicherheit optimiert und effizienter gestaltet werden.

Folgende **technische Vorteile** sind zu erkennen:

- Kein thermischer Einfluss auf den Grundwerkstoff und damit kein Verzug der Rohrwände.
- Kein Schrumpfungsprozess – damit keine „Sonderfertigung“ von Membranwänden mit Übermaß in der Teilung.
- Keine Fe-Aufmischung (außer in den Bereichen, in denen nachvernickelt werden muss).
- Keine Porenbildung in der Schutzschicht.
- Erweist sich eine Dickschichtvernickelung nach dem ersten Badaufenthalt als zu dünn, kann ohne Probleme nachgalvanisiert werden.
- Schichtstärke durch Stromstärke und Aufenthaltsdauer im Galvanisierungsbad einstellbar.

Verbesserungspotentiale:

- Gleichmäßigere Nickelschicht durch Optimierung der Anodenabstände
- Verfahren der Nachvernickelung (Schweißprozess muss hinsichtlich Qualität und Quantität optimiert werden ➔ Handfertigkeit des Schweißpersonals)

Als Betreiber kann man folgende Gedanken zur **Preisbildung** geben:

- Die Kosten der Galvanisierung werden unmittelbar vom Rohstoffpreis des Nickels beeinflusst. Bei schweißplattierten Wänden ist der Nickel nur eine von vier (Nickel, Chrom, Molybdän und Niob) wesentlichen Bestandteilen.
- Die erforderliche Vorbehandlung der Membranwand unterscheidet sich nur unwesentlich (beide Beschichtungssysteme benötigen eine metallisch blanke Oberfläche - Sandstrahlen).
- Eine umfangreiche Nachbearbeitung von Membranwänden, wie beim Schweißplattieren auf Grund der thermischen Einwirkungen, ist beim galvanischen Prozess nicht erforderlich.

Gibt man der Dickschichtvernickelung, ähnlich wie der Schweißplattierung, Zeit verschiedene Entwicklungsstufen und Verbesserungen zu durchlaufen – sollte dieses System dann nicht ebenso zum Erfolg und damit technisch bewährten Schutzsystem führen?