

Zerstörungsfreie Prüfung von Duplex-Rohrbögen

Ultraschall- und Wirbelstromprüfung unter erschwerten Bedingungen

Bernd HEUTLING^{*}, Patrick HÜNIES^{*}, Werner ROYE^{*},
Rudolf FLEHMER^{*}, Michael KRÄMER^{*}, K. SCHIEBOLD^{*},
Uwe HELSPER^{**}, Maksym AWERBUCH^{***}

^{*} LVQ-WP, Ruhrorter Str. 47, 45478 Mülheim/Ruhr

^{**} TUBE-TEC Rohrverformungs GmbH, Hirtscheider Straße 13-15, 57647 Nistertal

^{***} Delta Test GmbH, Brigitta 15, 29313 Hambühren

Kurzfassung. Im Bereich von hoch belasteten Bauteilen wird in den meisten Fällen eine 100%-Überprüfung der Fertigungslose durchgeführt. Eine solche Prüfung ist nur mit zerstörungsfreien Verfahren möglich und die eingesetzten Verfahren sind in vielen Fällen in kundenseitigen Vorschriften oder Normen spezifiziert.

Für die hier untersuchten lösungsgeglühten Super-Duplex-Rohrbögen wurden kundenseitig jeweils Referenzfehler für die Wirbelstromprüfung und die Ultraschallprüfung festgelegt, die zuverlässig mit einem der beiden Verfahren detektiert werden sollten. In diesem Beitrag sollen die Möglichkeiten und Grenzen der beiden ZfP-Verfahren erläutert und erste Erfahrungen von Serienprüfungen dargestellt werden.

1. Einführung

Im Bereich von hoch belasteten Bauteilen wird neben stichprobenartigen zerstörenden und/oder metallurgischen Untersuchungen in den meisten Fällen eine 100%-Überprüfung der Fertigungslose durchgeführt. Eine solche 100%-Prüfung ist nur mit zerstörungsfreien Verfahren möglich und die eingesetzten Verfahren werden in vielen Fällen in kundenseitigen Vorschriften oder Normen spezifiziert.

Für die hier untersuchten lösungsgeglühten Super-Duplex-Rohrbögen wurden kundenseitig als Referenzfehler für die Wirbelstrom- und die Ultraschallprüfung festgelegt, die zuverlässig mit einem der beiden Verfahren detektiert werden sollten. Im Idealfall ist eine solche Rohrprüfung unproblematisch, in diesem Fall lagen die Schwierigkeiten in der großen Varianz der Geometrie der Prüflose.

Zur Ermittlung der optimalen Prüftechnik wurden sowohl Untersuchungen mit eigens per Vorsatzkeilen an die Rohrkrümmung angepassten Ultraschallprüfköpfen als auch mit verschiedenen Wirbelstromkonzepten durchgeführt.



2. Prüfaufgabe

2.1 Prüfobjekte

Die Prüfobjekte sollten als lösungsgeglühte und gebeizte Rohrbögen aus *UNS S32750* vorliegen. Als grundsätzliche Geometriedaten wurden genannt:

- $\text{Ø}19,1 \cdot 3,2$ [mm]
- $\text{Ø}25,25 \cdot 3,1$ [mm]

wobei Biegeradien in den Stufenungen

- 57 mm
- 75 mm
- 77,5 mm

mit Biegewinkeln von

- 45°
- 90°
- 180°

in nahezu beliebigen Kombinationen vorkommen können.

2.2 Werkstoff

Der Werkstoff *UNS S32750* ist ein Super-Duplex und entspricht gem. Werkstoff-Datenblatt [3] einem *1.4410* und damit einem *X 2 CrNiMoN 25 7 4* (nach DIN EN 10088-2 und ASTM A240). Die hohen Werte der Legierungselemente Chrom und Molybdän bedeuten eine hohe Beständigkeit gegen Korrosion, insbesondere gegen Lochfraß-, Spalt- und Spannungsrisskorrosion.

Es handelt sich um eine häufig eingesetzte Stahlsorte, dessen Vormaterial hohe Festigkeitswerte ($R_{p0,2} \geq 550 \text{ N/mm}^2$, $R_m \geq 795 \text{ N/mm}^2$) aufweist [2, 3]. Das optimale Gefüge wird erst durch ein Lösungsglühen erreicht. Aufgrund seiner hohen Korrosionsbeständigkeit und guten Festigkeitseigenschaften eignet sich der Werkstoff für den Einsatz unter sehr fordernden Bedingungen, z. B. in chemischen und petrochemischen Anlagen oder im Seewassernahen Einsatz on- und offshore.

Duplex-Stähle weisen ein Zwei-Phasen-Gefüge aus zumeist annähernd gleich großen Anteilen Ferrit und Austenit auf [4]. Super-Duplex-Stähle unterscheiden sich von den konventionellen Duplex-Stählen durch erhöhte Nickel-, Molybdän- und Stickstoffgehalte. Aufgrund der ferritischen Anteile im Gefüge war ferromagnetisches Verhalten zu erwarten.

2.3 Vorgegebene Justierfehler

Der Auftraggeber hatte ein umfangreiches Prüfprogramm für die o.g. Rohrbögen vorgesehen. Für den Zeitpunkt nach Umformung in die eigentlichen Rohrbögen und ihr Lösungsglühen wurden neben zahlreichen anderen Prüfungen auch die Inspektionen auf Fehler gefordert. Die Anforderung der Kundenspezifikation lautete auf eine 100% Prüfung der Rohrbögen

- mit dem Wirbelstromprüfverfahren mit einem Justierfehler in Form einer Durchgangsbohrung von $\text{Ø}0,8$ mm für alle Rohraußendurchmesser kleiner oder gleich 32 mm als Standardtestfehler

oder alternativ

- mittels Ultraschalltechnik, wobei die Standardfehler Nuten längs und quer zur Rohrachse auf der Außenoberfläche sein sollten mit einer Tiefe kleiner oder gleich 5%

der Rohrwanddicke, einer Breite kleiner oder gleich 0,5 mm und einer maximalen Nutlänge von 25 mm.

2.4 Realisierte Justierfehler

Gemäß der in 1.2 genannten Spezifikation wurden für die Justierung des Wirbelstromprüfsystems sowohl in der neutralen Faser im Rohrbogenbereich als auch in den geraden Rohrabschnitten Durchgangsbohrungen mit einem Durchmesser von $\varnothing 0,8$ mm eingebracht.

Für die Machbarkeitsstudien mittels Ultraschallprüfung wurden gerade Rohrstücke mit Wanddicken von 3,1 mm verwendet, so dass die maximal erlaubte Nuttiefe 0,15 mm betrug. Daher wurden in die Testrohre erodierte Außen-Nuten mit 0,15 mm Nuttiefe, 0,5 mm Breite und Längen von 5 mm in Längs- und Umfangsrichtung eingebracht (Abb. 1).



Abb. 1. 1“-Rohr mit Längs- und Quernut, Tiefe 0,15 mm

3 Machbarkeitsuntersuchung mittels Ultraschallprüfung

3.1 Prüfkopf

Zum Nachweis der o.g. Justierfehler wurde der 10 MHz-Prüfkopf S6WB10WM der Firma Deutsch ausgewählt. Ein Winkelvorsatzkeil mit angepasstem Radius gemäß Abbildung 2 erlaubte die Prüfung auf Längsfehler. Für die Querfehlerprüfung wurde der Radius entsprechend um 90° versetzt.

Die Keile sind für einen Transversalwelleneinschallwinkel von 45° konzipiert. Mit 10 MHz ergibt sich so eine Transversalwellenlänge $\lambda \approx 0,3$ mm.



Abb. 2. Prüfkopf für die Längsfehlerprüfung

3.2 Ultraschallgerät



Abb. 3. Prüfsystem

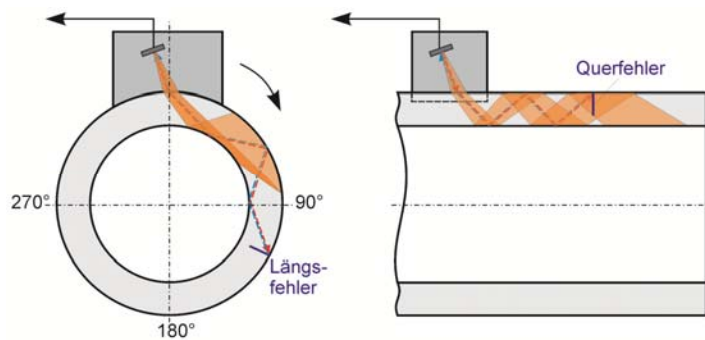


Abb. 4. Einschallprinzipien

Die Prüfung wurde mit dem Ultraschallgerät Echograph 1090 (Abb.3) der Firma Deutsch nach den in Abbildung 4 realisierten Einschallprinzipien durchgeführt.

3.3 Resultate der Machbarkeitsstudie für die Ultraschallprüfung

Als Resultat dieser Machbarkeitsstudie ergeben sich folgende A-Bilder:

Im A-Bild zur Querfehlerprüfung ist nach dem Echo der Quernut auch die Echoanzeige vom Rohrende sichtbar. Aufgrund des Schallbündeldurchmessers bezogen auf die Wanddicke ergeben sich klare deutliche Echos aus dem Schallverlauf mit mehreren Schallumlenkungen. Der Signal-Rausch-Abstand beträgt über 20 dB. Damit sind die Anzeigen eindeutig zu erkennen. Die Transversalwelle durchläuft das ganze Rohr und kann am Ende des Rohres mit einem minimalen Signal-Rausch-Abstand von 6 dB die komplette Rohrlänge von 400 mm in einem Prüfgang erfassen, da sich aufgrund der Schallbündeldivergenz das Schallbündel nach drei Schallumlenkungen auf den ganzen Umfang verteilt (wie in Abb. 3 rechts angedeutet).

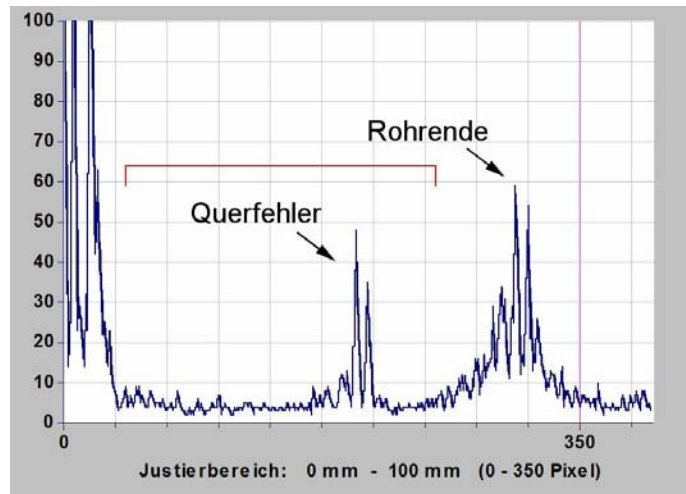


Abb. 4. A-Bild zur Querfehlerprüfung

Es verbleibt jedoch ein kurzer ungeprüfter Rohrabschnitt, der eine weitere Einschallposition von der Gegenseite erforderlich macht.

Das A-Bild zur Längsfehlerprüfung zeigt ebenfalls das Nutecho mit einem sehr guten Signal-Rausch-Abstand. Die Transversalwelle durchläuft den gesamten Umfang, so dass das Rohr „nur“ entlang einer Prüfspur in Längsrichtung abgetastet werden muss.

Im vorliegenden A-Bild ist sogar das Wiederholungsecho gut zu erkennen – allerdings deutlich verbreitert, weil beim mehrfachen Umlaufen des Umfangs sich noch mehr Echos aus verschiedenen Schallumlenkungen vereinen.

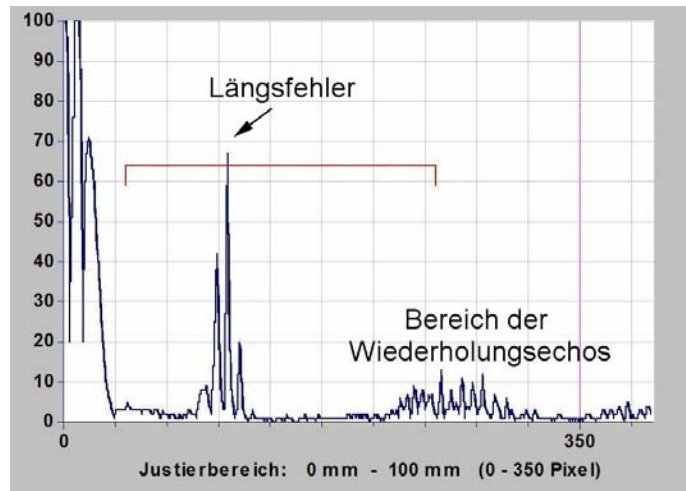


Abb. 5. A-Bild zur Längsfehlerprüfung

3.4 Fazit der Ultraschall-Machbarkeitsstudie

Die Machbarkeitsstudie belegt, dass die geraden Rohre mit der vorgegebenen Prüfempfindlichkeit eindeutig mit Ultraschall prüfbar sind. Allerdings sind mehrere Prüfdurchgänge erforderlich, weil auf Längsfehler und Querfehler mit zwei Einschallrichtungen sowie in verschiedenen Umfangspositionen bei der Querfehlerprüfung und unterschiedlichen Längspositionen bei der Längsfehlerprüfung geprüft werden muss. Das bedeutet, dass der Prüfkopf über den gebogenen Teil des Schenkels geführt werden muss, wodurch Ankopplungsprobleme zu erwarten sind, da es im Bogenbereich zu Abhebeeffekten des Prüfkopfs kommen wird. Darüber hinaus werden Bearbeitungsspuren auf der Prüfstückoberfläche, die durch

die Rohrfertigung oder den Biegearbeitgang verursacht werden, durch die hohe Empfindlichkeit der Prüfung zu Pseudoausschuss führen.

Resultierend aus diesen Überlegungen wurde auf eine Erweiterung der Machbarkeitsstudie auf die unterschiedlichen Krümmungsradien verzichtet.

4 Voruntersuchungen mittels Wirbelstromprüfung

4.1 Anmerkungen zum Justierrohr

Für die Wirbelstromprüfung wurden in Justierkörpern mit Durchmessern von 19,1 mm und 25,25 mm jeweils Ø0,8 mm Justier-Durchgangsbohrungen sowohl in den geraden Schenkelabschnitten als auch in der „neutralen Faser“ des Bogens eingebracht. Aufgrund der Anordnung der Bohrung in der neutralen Faser im Bogen ist zu berücksichtigen, dass es bei Fehlern, die im Außenbereich des Bogens liegen und bei denen der Sensor dicht an der Oberfläche anliegt, zu einer Überbewertung kommen wird. Umgekehrt werden Fehler, die auf der Innenseite des Bogens liegen und bei denen der Sensor aufgrund seiner Geometrie leicht abheben wird, etwas unterbewertet werden. Da die Hauptbelastung durch die Umformung auf der Zug- = Außenseite der Biegung liegt und dort die größte Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Fehlern liegt, ist diese Einschränkung bei der Positionierung der Justierfehler tolerierbar.

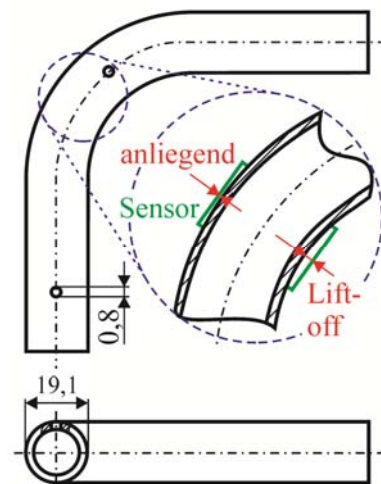


Abb. 6. Justierrohrbogen

4.2 Vorversuche bez. der Gleichfeldvormagnetisierung

Erste einfache Tests mit einem Elotest B1 mit Tastsensor ergaben, dass die Prüflinge wie erwartet ein deutliches ferromagnetisches Verhalten aufwiesen und keine schnelle einfache Prüflösung möglich sein würde.

Die klassische Prüfmethode für Rohre auf Dichtheit ist die Prüfung mit Außendurchlaufensensoren, da diese ein homogenes Magnetfeld im Prüfbereich des Prüfobjekts bewirken, und im Fall von ferromagnetischen Werkstoffen mit einer Gleichfeldvormagnetisierung, die die Permeabilitätsschwankungen des ferromagnetischen Werkstoffs bedämpft oder im besten Fall ausschaltet.

In SEP 1917 wird ausgeführt, dass bei un- und niedrig legierten Stählen, die im Vergleich zu einem hoch legierten Stahl weniger hartmagnetisch sind, erst ab Feldstärken größer 2400 A/cm eine relative Permeabilität von ca. 2 zu erwarten ist. Für die weiteren Betrachtungen wird also als grober Startpunkt angenommen, dass Feldstärken von mindestens von 2400 A/cm erreicht werden müssen, auch wenn die tatsächlich notwendigen Feldstärken höher liegen, um eine möglichst vollständige Beseitigung der Störungen durch Permeabilitätsschwankungen zu erreichen.

Im Vorfeld wurden verschiedene Versuche für eine gute Gleichfeldvormagnetisierung mittels verschiedener technischer Ansätze überdacht und zum Teil getestet:

- *Axiale Stromdurchflutung* nach DIN EN ISO 9934, Teil 1: dort wird im Anhang A1 ausgeführt, dass die notwendige Stromstärke für eine Feldstärke an der Oberfläche über den Zusammenhang $I = H \cdot p$ überschlägig berechnet werden kann; darin sind I die Stromstärke in [A], H die Feldstärke in [kA/m] und p der Umfang in [mm]. Durch Einsetzen des minimalen Feldstärkewertes und des Umfangs ergibt sich für den größeren Durchmesser eine notwendige Stromstärke von ca. 19 kA, was durch die vorhandenen Hochstromerzeuger nicht zu leisten war. Darüber hinaus hätte diese Magnetisierung auch eine inhomogene radiale Feldverteilung bedeutet und zusätzlich das Risiko von Einbrandstellen mit sich gebracht, so dass keine weiteren Anstrengungen in dieser Richtung unternommen wurden.
- *Magnetisierung mittels ferromagnetischem Kern und Permanentmagnet*: ein magnetischer Transformatorkreis unter Nutzung von Neodyn-Magneten wurde durch das Einführen des Prüfobjekts geschlossen. Es wurden zwar hinreichende Feldstärken im Messspulenbereich festgestellt, aber die konstruktiv bedingte Breite erlaubte trotz Abschrägungen nicht das passieren der engen Biegeradien (Abb. 7).



Abb. 7. Magnetisierung mittels Permanentmagnet

4.3 Realisierte Lösung zur Gleichfeldvormagnetisierung

Schließlich wurde als ebenso leistungsfähige wie gut bedienbare und kostengünstig herstellbare Lösung der folgende Aufbau gewählt:

- *Magnetisierung mittels ferromagnetischem Kern und transformatorischer Magnetisierung*: der Aufbau eines magnetischen Kerns aus dem letzt genannten Vorversuch wurde beibehalten und eine schaltbare Magnetisierung durch Spulen realisiert. Auch hier erfolgte das Schließen des Transformatorkerns durch das in den Außendurchlaufsensor geführte Prüfobjekt. In Kombination mit einer geeigneten Magnetisierungsspulenauslegung wurde schließlich eine geeignete Konstellation erarbeitet, die eine hinreichende Magnetisierung im Messspulenbereich und damit reproduzierbar auswertbare Wirbelstromsignale lieferte (Abb. 8). Die immer noch leicht schwankenden Wirbelstromsignale deuten jedoch an, dass eine vollständige Sättigung des Prüfobjekts scheinbar nicht erreicht wird.
- *Konturierung des Sensors*: die engen Biegeradien erforderten für die gewählte Sensorauslegung ggf. eine Konturierung des Sensors, damit auch die Lose mit den engsten Biegeradien geprüft werden konnten. Diese fiel jedoch im Gegensatz zu den Sensoren mit Permanentmagneten aufgrund der Möglichkeit, wesentlich kompakter bauen zu können, bei den Wirbelstromsensoren mit Magnetisierungsspulen so gering aus, dass die Magnetisierungsleistung nicht reduziert wurde.



Abb. 8. Wirbelstromsensor mit Magnetisierungsspulensystem

Nachdem die Tests hinsichtlich der notwendigen Magnetisierung erfolgreich abgeschlossen worden waren, wurden noch einige Untersuchungen hinsichtlich der Optimierung des Wirbelstromspulensystems durchgeführt. An deren Ende ergab sich das im Folgenden vorgestellte Prüfequipment.

5 Realisierte Prüftechnik

Als Prüftechnik wurde letztlich eine Kombination aus den folgenden Komponenten gewählt: Ein-Frequenz-Universalwirbelstromprüfgerät, Wirbelstromsensor mit elektrisch betriebener Gleichfeldvormagnetisierung in Differenzschaltung und ein Prüftisch zur reproduzierbaren Handhabung der Proben (Abb. 9).

Mit diesem Prüfequipment wurden jeweils an den Schenkeln mit den Durchmessern 19,1 mm und 25,25 mm an den geforderten $\varnothing 0,8$ mm Justierbohrungen Justiersignalverläufe aufgenommen und dokumentiert.

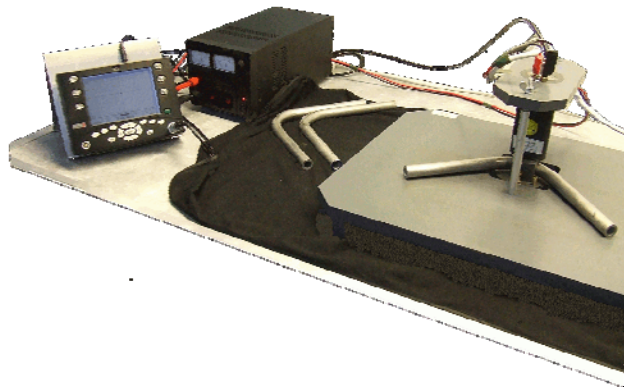


Abb. 9. Prüfstand

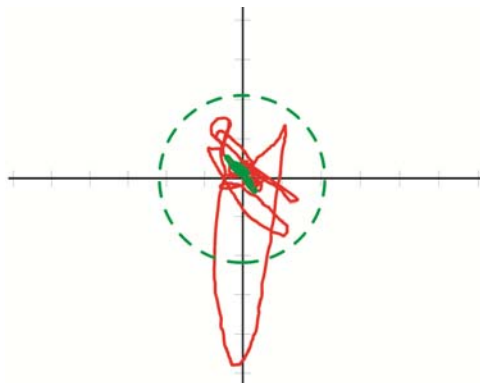


Abb. 10. Justiersignal Bohrung im geraden Schenkel

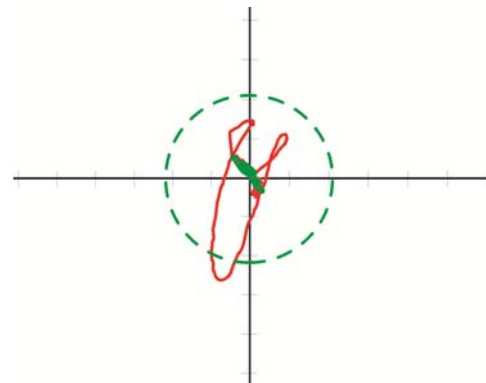


Abb. 11. Justiersignal Bohrung im Bogen

In den Abbildungen 10 und 11 sind die Justiersignale für die $\varnothing 0,8$ mm Justierbohrungen sowohl im geraden Schenkel (s. auch Abb. 6) und im Bogenbereich dargestellt. Wie oben ausgeführt führt die unterschiedliche Lage des Sensors zur Prüfoberfläche bzw. zum Fehler zu unterschiedlichen Signalausprägungen, die jedoch ein Nutz-zu-Störsignal-Verhältnis von 3:1 erfüllen (grüne kreisförmige Schwelle um das grün dargestellte ungestörte Signal).

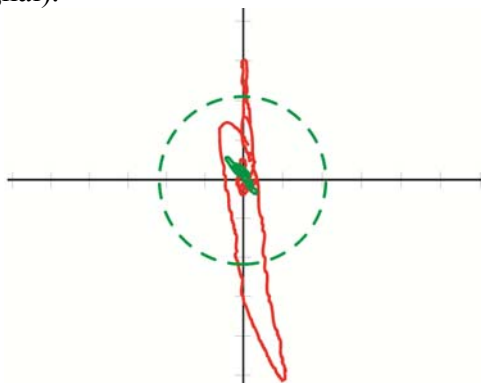


Abb. 12. Justiersignal Gefügeveränderung

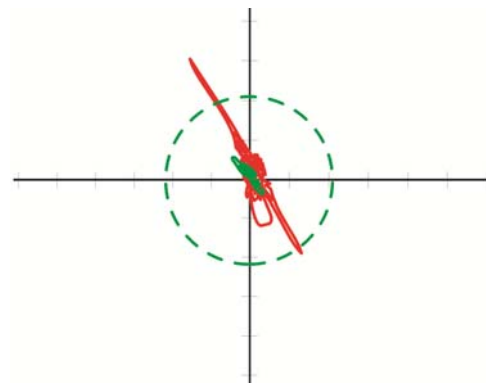


Abb. 13. Justiersignal Oberflächenbeschädigung

Abbildung 12 stellt das Justiersignal einer massiven lokalen Materialveränderung im Übergangsbereich vom geraden in den gebogenen Schenkel dar; optisch, per UT oder RT konnte kein Grund für diese Anzeige gefunden werden. Das Zusammenfallen der

Anzeige mit dem Übergang von gerade zu gebogen lässt auf einen metallurgischen Grund schließen, was aber nicht belegt werden konnte. Dieses Signal ist jedoch von den Bohrungjustiersignalen gut unterscheidbar und damit akzeptabel im Sinne einer Fehlerdetektion. Ähnliches gilt für das Justiersignal einer lokalen Oberflächenbeschädigung auf der Prüfseite (Abb. 13).

6 Übersicht über die Einsetzbarkeit bei den ersten Prüflosen

Bisher wurden 1.741 Rohrbögen in nahezu beliebigen Kombinationen von Rohrdurchmesser, Biegeradien und –winkel mit der vorgestellten Wirbelstromtechnik geprüft. Davon wurden nach den festgelegten Kriterien 1.647 Stück für gut befunden. Die Prüfung wird auftragsabhängig in unregelmäßigen Abständen fortgesetzt werden.

Die reine Prüfzeit je Prüfteil war abhängig von den Biegeradien und –winkeln und variierte im Bereich von ca. 30 bis 45 Sekunden. Dazu kamen Rüst- und Kalibrierzeiten bei inhomogenen Prüflosen sowie Dokumentationszeiten.

7 Fazit

Für die geforderte Prüfung von Super-Duplexrohren wurden Voruntersuchungen mit Ultraschalltechnik sowie mit der Wirbelstromprüfung durchgeführt. Bei ähnlicher guter Anzeigqualität der Ultraschallvoruntersuchungen wurde letztlich aus Gründen der zu erwartenden günstigeren Prüfzeiten und aufgrund von Handhabungsvorteilen der Wirbelstromprüfung der Vorzug gegeben.

Es wurde eine Ein-Frequenz-Wirbelstromprüftechnik mit Gleichfeldvormagnetisierung und in Differenz angeordneten Messspulen realisiert. Dieses Prüfsystem wurde in einen eigenen Prüftisch eingesetzt, um die Handhabung weiter zu vereinfachen und reproduzierbare Prüfbedingungen zu schaffen. Die ermittelten Justiersignale erlaubten eine eindeutige Unterscheidung der zu erwartenden Ungänzentypen über Amplituden- und Phasenunterschiede.

Mit dieser Prüfausrüstung wurden auf der Basis der Voruntersuchungen 1.741 Rohrbögen unterschiedlichster Geometrien (Biegewinkel und –radius) erfolgreich geprüft.

Referenzen

- [1] Atlas Steels - Technical Handbook of Stainless Steels
- [2] Handbook of Comparative World Steel Standards, John E. Bringas, ASTM DS67B, 3rd Edition
- [3] Werkstoff-Datenblatt des StahlWissenNaviMat, Dr. Sommer Werkstofftechnik GmbH
- [4] Butting: Informationsmaterial Duplex/Superduplex