

Zerstörungsfreie Fehlerprüfung und Fehlertiefenbestimmung chloridinduzierter Lochkorrosion in austenitischen Rohren

Wilfried REIMCHE, Rainer DUHM, Martin BERNARD, Friedrich-Wilhelm BACH,
Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover
Dick A. KRONEMEIJER, Shell Global Solutions International B.V., Amsterdam, Niederlande
Benno KÜCHEKNECHT, Delta Test, Hambühren

Kurzfassung. Zum sauberen Einschluss und Transport von aggressiven Medien in chemischen, petrochemischen und Kraftwerksanlagen werden bevorzugt Rohre und Behälter aus korrosionsbeständigen austenitischen Stählen eingesetzt. Austenitische Stähle neigen jedoch bei Anwesenheit von Chlorionen zu Lochkorrosion (Lochfraß) die kraterförmig, nadelstich- oder kavernenartig das Rohr lokal sehr begrenzt schädigen, wobei die Schadensstelle im Oberflächenbereich in vielen Fällen nur sehr fein ausgebildet ist /1/. Daher werden derartige Schäden oft erst erkannt wenn sie zu Undichtigkeiten führen.

Im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung von Rohrleitungen in einer petrochemischen Anlage wurde in austenitischen 3“ und 8“ Rohren mit Wandstärken von 6,3mm und 8,6mm mehrfach chloridinduzierte Lochkorrosion festgestellt, die hinsichtlich der ausgebildeten Fehlertiefe falsch bewertet und klassifiziert wurde /2/.

Zum Nachweis und zur Bewertung derartiger Fehler in austenitischen Rohren wurden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie verschiedene zerstörungsfreie Prüftechniken an die Prüfaufgabe angepasst und hinsichtlich ihrer Nachweisempfindlichkeit und Eignung zur Fehlertiefenbewertung untersucht.

Eingesetzte zerstörungsfreie Prüftechniken waren eine

- angepasste problemorientierte Wirbelstromtechnik,
- Mikrofokus-Durchstrahlungsprüfung,
- hochfrequente Ultraschallprüfung,
- Fernfeld-Wirbelstromtechnik in SCAN-Technik.

Aufgezeigt wurden die Prüfergebnisse im Vergleich an verschiedenen eingebrachten Fehlern sowie an einer Vielzahl von natürlichen Fehlern. Die Schadensursache und die Prüfergebnisse wurden exemplarisch verifiziert über schichtweise Querschliffe und Elementanalysen im Lochbereich.

1. Einführung

In der chemischen, petrochemischen und Lebensmittelindustrie wie auch im Kraftwerks- und Anlagenbau werden wegen ihrer guten Korrosionsbeständigkeit, Duktilität, Warmfestigkeit und Temperaturbeständigkeit zum Einschluss von Medien in Rohren und Behältern unter erhöhten Anforderungen bevorzugt austenitische Stähle eingesetzt.

Metastabile austenitische Stähle neigen jedoch unter zyklischer Beanspruchung mit geringer plastischer Verformung zur Martensitbildung und Werkstoffermüdung wie auch unter chemischer und mechanischer Beanspruchung kann es zur Spannungsrisskorrosion kommen. Eine weitere wenig bekannte Unzulänglichkeit austenitischer Stähle ist die Neigung zur Lochkorrosion bei Anwesenheit von Chlorionen, die die Rohr- oder Behälterwand kraterförmig, nadelstich- oder kavernenartig lokal sehr begrenzt schädigen /1/. Dabei sind die

Schadensstellen im Oberflächenbereich oft nur sehr fein ausgebildet und werden erst erkannt, wenn sie zu Undichtigkeiten führen.

Unter erhöhten Betriebsbedingungen und beim Einschluss aggressiver Medien werden daher zum Nachweis der Integrität von Rohrleitungs- und Behältersystemen aus sicherheitstechnischen Gründen zur Abnahme und in entsprechenden Zeitabschnitten wiederkehrende Prüfungen gefordert.

Im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung eines Rohrleitungssystems in einer petrochemischen Anlage wurde in austenitischen 3'' und 8'' Rohren mit Wandstärken von 6,3mm und 8,6mm mehrfach chloridinduzierte Lochkorrosion festgestellt [2], die hinsichtlich der ausgebildeten Fehlertiefe falsch bewertet und klassifiziert wurde. Bei der zerstörungsfreien Prüfung des Rohrleitungssystems in der Anlage vor Ort wurden maximale Fehlertiefen von 68% für die 3'' Rohre und von 76% für die 8'' Rohre angegeben, was für einen weiteren Betrieb der Anlage nicht zulässig ist.

Zum Nachweis und zur Bewertung derartiger Fehler in austenitischen Rohren wurden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie verschiedene zerstörungsfreie Prüftechniken an die Prüfaufgabe angepasst und hinsichtlich ihrer Nachweisempfindlichkeit und Eignung zur Fehlertiefenbewertung untersucht. Zur Analyse und Beschreibung der Fehlerursache und Fehlertiefe wurden exemplarisch an einigen Fehlerstellen Proben entnommen, metallographische Schliffe angefertigt, die Fehler geometrisch vermessen und Elementanalysen im Lochrandbereich mit einer Mikrosonde durchgeführt.

Hinsichtlich der zerstörungsfreien Prüfung von austenitischen Rohren auf Lochkorrosion wurde die

- Mikrofokus Durchstrahlungsprüfung,
- hochfrequente Ultraschallprüfung,
- Fernfeld-Wirbelstromtechnik in SCAN-Technik sowie eine
- problemorientierte Wirbelstromtechnik

an die Prüfaufgabe angepasst und bezüglich der Fehlerempfindlichkeit und Fehlertiefenbewertung untersucht.

2. Typische Fehlerausbildung in einem 8'' Rohr

Der Abschnitt eines 8'' Rohres aus einer petrochemischen Anlage mit mehreren Fehleranzeigen ist in Abbildung 1 dargestellt.

Bei dem Rohrabschnitt handelt es sich um ein
8'' Rohr, Spiralnaht geschweißt
Wandstärke = 8,6mm
Werkstoff: AISi 316L

In diesem Rohrabschnitt wurden bei der zerstörungsfreien Prüfung vor Ort nach dem Fernfeld-Wirbelstromverfahren durch eine namhafte Prüffirma mit der Fernfeld-Wirbelstromtechnik mehrere Fehleranzeigen registriert und mit einer Fehlertiefe von maximal 76% der Rohrwandstärke bewertet. Zur Überprüfung der Fehleranzeigen und Fehlerbewertung sowie zur Klärung der Schadensursache wurde dieser Rohrabschnitt aus der Anlage entnommen und für weitere Untersuchungen im Rahmen einer Machbarkeitsstudie bereitgestellt.

Zu Vergleichszwecken und zur Kalibrierung zerstörungsfreier Prüftechniken wurden in das 8'' Rohr verschiedene Testfehler als Bohrungen in einem fehlerfreien Rohrabschnitt eingebracht.

Fehlertyp	Durchmesser	Fehlertiefe
I	1mm	1, 2, ... 5mm
II	2mm	1, 2, ... 5mm
III	3mm	1, 2, ... 5mm

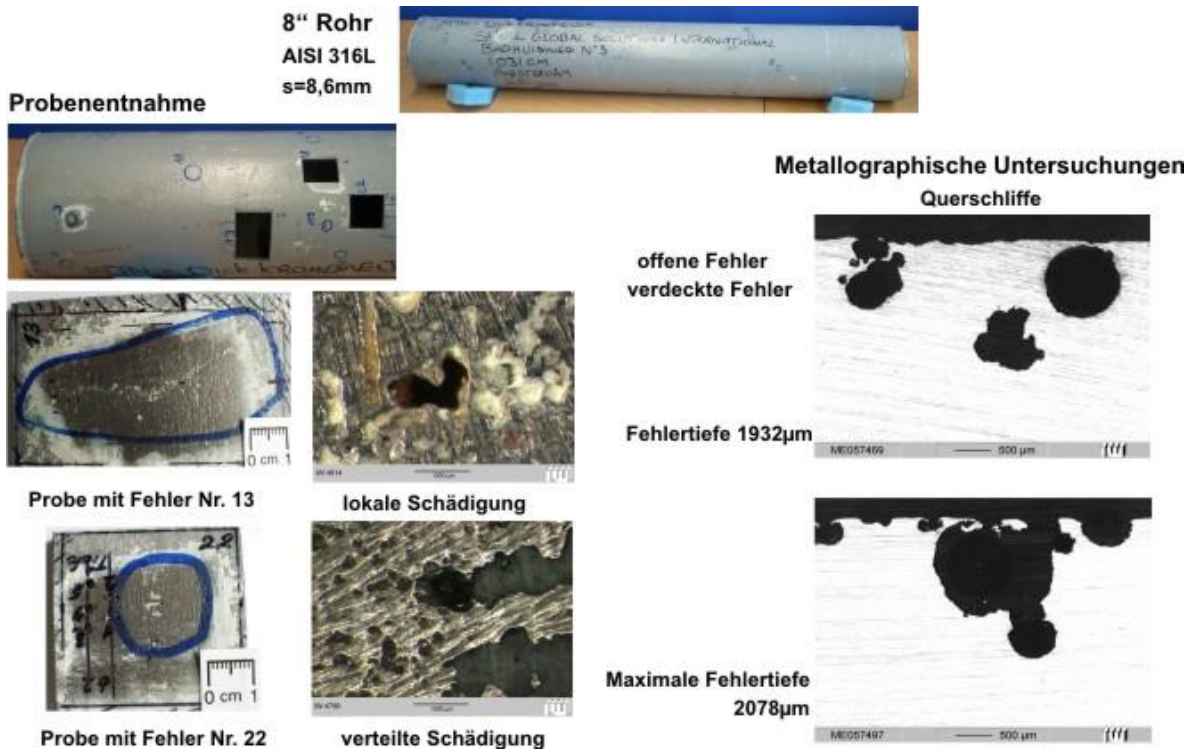


Abbildung 1: 8" Rohr-Probenentnahme und metallographische Untersuchungen

Nach erfolgter Anpassung und Anwendung zerstörungsfreier Prüftechniken

- angepasste Wirbelstromprüfung
- hochauflösende Mikrofokus Durchstrahlungsprüfung
- hochfrequente Ultraschallprüfung von der Rohrrinnenseite
- Fernfeld Wirbelstromprüfung

wurden zur Verifizierung der Fehlerbewertung und Klärung der Schadensursache an 3 charakteristischen Fehlerorten Proben entnommen. Dabei zeigen sich lokal sehr begrenzt aber auch über einen größeren Oberflächenbereich verteilte Schädigungen. Im Querschliff, Abbildung 1, ist die typische Lochkorrosion mit kavernenartigem Werkstoffangriff und zur Oberfläche offenen aber auch verdeckten Fehlstellen erkennbar. Durch die Anfertigung schichtweiser Querschliffe im Bereich der maximalen Fehleranzeige konnte geometrisch eine maximale Fehlertiefe von 2,078mm bestimmt werden, was einer relativen Wandschwächung von 24% entspricht.

3. Fehlerursache

Zur Ermittlung der Fehlerursache wurde im Querschliff mit Hilfe der Mikrosonde eine Elementanalyse im Lochrandbereich einer Kaverne durchgeführt, Abbildung 2.

Die Elementanalyse zeigt eine erhöhte Konzentration von Chlor im Bereich der Werkstoffgrenzfläche, wodurch die vermutete chloridinduzierte Lochkorrosion bestätigt wird. In der Werkstoffgrenzfläche führt dieses zu einer Verarmung der metallischen Grundelemente des Werkstoffs Eisen (Fe), Chrom (Cr) und Nickel (Ni) und damit zu einer fortschreitenden Zerstörung des Materials, Abbildung 2.

Elementanalyse im Lochrandbereich - Mikrosonde

8" Rohr
AISI 316L
s=8,6mm

Fe ↓

Cl ↑

Cr ↓

Ni ↓

↓
Chloridinduzierte
Lochkorrosion

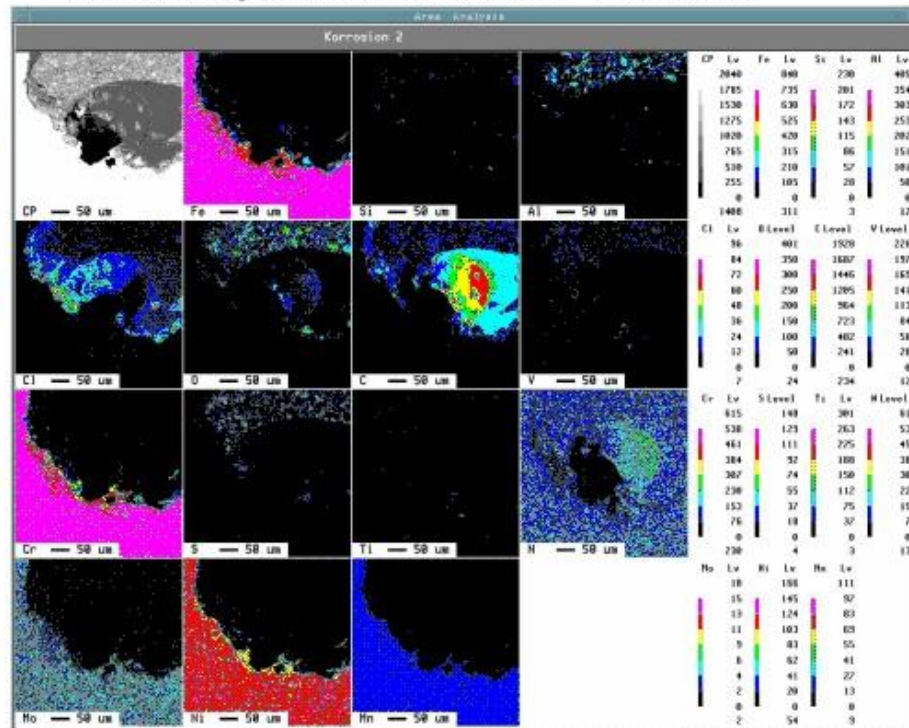


Abbildung 2: Elementanalyse im Lochrandbereich einer Kaverne

4. Ultraschallprüfung

Eine zerstörungsfreie Möglichkeit zur Ermittlung der Fehlertiefe chlorinduzierter Lochkorrosion in der Rohraußenwand besteht mit der Ultraschallprüfung im Impuls-Echo-Verfahren von der Rohrinneinnenseite /3/.

Ultraschallprüfung – Fehlertiefe über Innenwand – 8" Rohr,

Impuls-Echo AISi 316L, s=8,6mm



US-Prüfkopf

Sensor-Führung und Handhabung
zur Rohrinnenprüfung

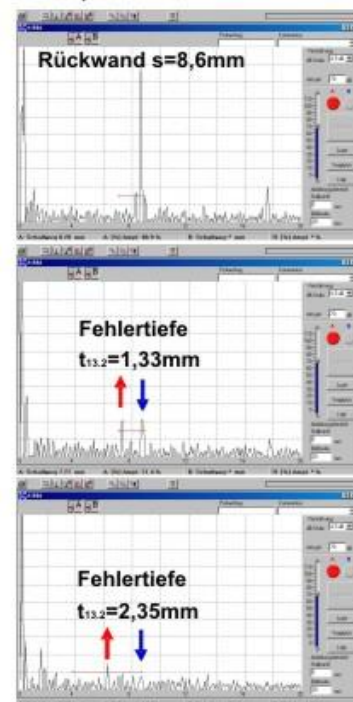


Abbildung 3: Ultraschallprüfung 8" Rohr - Fehlertiefe über Rohrinnenwand

Hierzu ist es notwendig, dass der Ultraschallkopf in einem Molch oder in einer Sensor-Führung mit einem Handhabungssystem im Rohr geführt und positioniert wird. Die Schwierigkeit zur Ermittlung der Fehlertiefe ergibt sich dabei aus der Anschallung kleiner Kavernen, wie diese nach Abbildung 1 im Bereich der maximalen Fehlertiefe ausgebildet sind. Bei einer kugeligen Form der Kaverne mit einer diffusen Schallreflexion und einer kleinen Reflektorfläche von weniger als 0,5mm im Durchmesser ist nur ein schwaches Echo zu erwarten.

Um eine starke Schallbündelung und eine hohe örtliche und zeitliche Auflösung zu erreichen, wurde ein hochfrequenter 15MHz Ultraschall-Prüfkopf CLF-4 der Firma Krautkrämer mit einer angepassten Vorlaufstrecke zusammen mit einem Ultraschall-Prüfsystem USLT 2000 verwendet, Abbildung 3.

Bei guter Ankopplung lässt sich mit dieser Technik im fehlerfreien Rohrbereich ein scharf ausgebildetes Rückwandecho bei einem geringen Rauschlevel ermitteln. Im Bereich der Lochkorrosion kommt es dann, je nach Fehlerausbildung, zu einem mehr oder weniger starken Abfall im Rückwandecho. Aus der Laufzeitdifferenz zwischen Fehler- und Rückwandecho ist die örtliche Fehlertiefe der Lochkorrosion zu ermitteln. Im Bereich des Fehlers 13.2 wurde eine maximale Fehlertiefe von 2,35mm ermittelt.

5. Mikrofokus-Röntgen-Durchstrahlungsprüfung

Im Vergleich mit der konventionellen Röntgenprüfung arbeitet die Mikrofokus-Röntgentechnik mit einem sehr kleinen Brennfleck in der Größenordnung von 10 bis 50µm und ist damit geeignet zum Nachweis auch kleiner Volumenfehler mit der Möglichkeit zur Detailvergrößerung /7/. Ein Nachweis von Volumenfehlern im Bauteil erfolgt durch die Streuung oder Absorption der Röntgenstrahlung im Bauteil und die Abbildung der Strahlenintensität auf einem Röntgenfilm oder Röntgenstrahlen-Bildwandler, Abbildung 4.

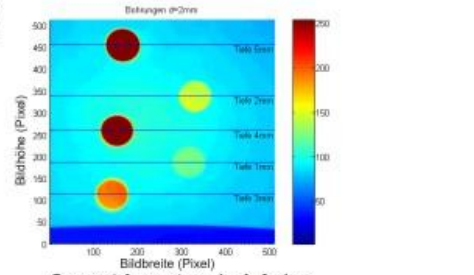
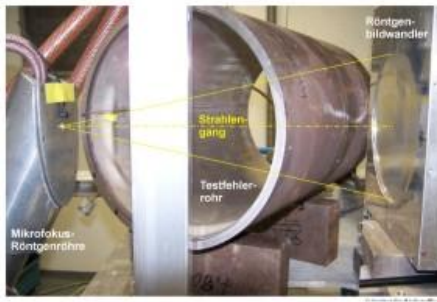
Die Schwächung der Röntgenstrahlung erfolgt in Abhängigkeit des Werkstoffs und der zu durchstrahlenden Wandstärke nach einer Exponentialfunktion und ist im Bereich von Volumenfehlern aufgrund der verbleibenden geringen Restwandstärke deutlich schwächer. Die Verteilung der Strahlenintensität hinter dem Prüfobjekt wird mit einem Röntgenstrahlen-Bildwandler erfasst und in der Nachweiskette über eine entsprechende Grauwertverteilung abgebildet.

Um eine Zuordnung zwischen der durchstrahlten Materialwandstärke und der Grauwertverteilung zu erhalten, wurden in einen fehlerfreien Bereich des 8'' Rohres

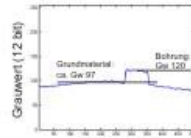
- 5 Flachbodenbohrungen - Durchmesser 2mm
- Bohrungstiefe 1, 2, .. 5mm

eingebraucht, Abbildung 4. Anhand von Durchstrahlungsaufnahmen dieser Flachbodenbohrungen ist mit der Grauwertanalyse eine Zuordnung zwischen der Fehlertiefe (Wandstärkenschwächung) und dem Differenz-Grauwert im Bezug zum ungeschwächten Rohr zu ermitteln, Abbildung 4 rechts oben und unten. Dieser an Testbohrungen ermittelte Zusammenhang zwischen der Grauwert-Differenz und der Fehlertiefe ist die Basis zur Bewertung der Volumenausdehnung von Lochkorrosion in Durchstrahlungsrichtung im 8'' Rohr.

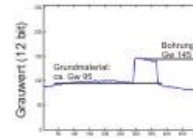
Mikrofokus Durchstrahlungsprüfung



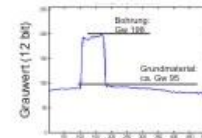
Grauwert-Auswertung der Aufnahme
Lage der Grauwertprofile



Grauwertprofil durch
Bohrung 1 (Tiefe 1 mm)



Grauwertprofil durch
Bohrung 2 (Tiefe 2 mm)



Grauwertprofil durch
Bohrung 3 (Tiefe 3 mm)

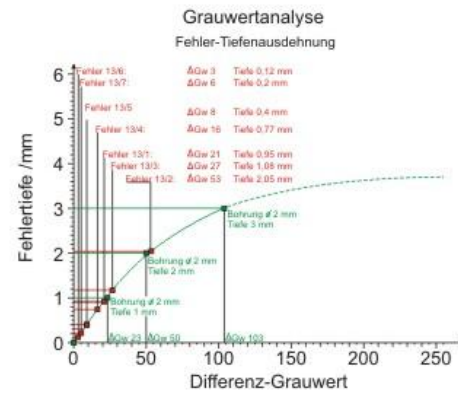
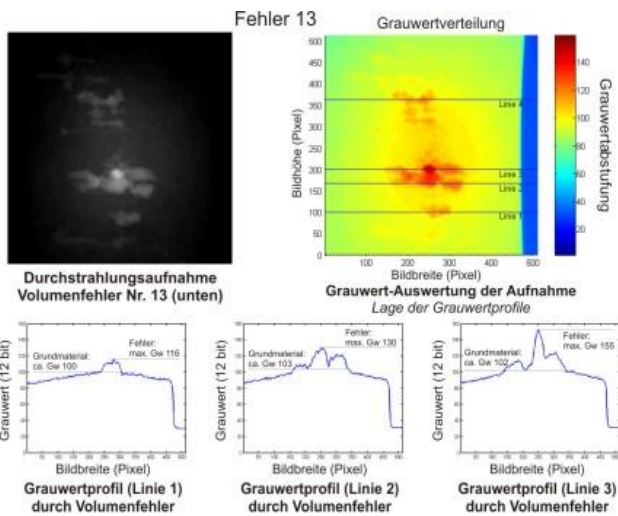


Abbildung 4: Mikrofokus-Durchstrahlungsprüfung
Grauwertanalyse von Testfehlern und natürlichen Fehlern

Wie schon in Abbildung 1 aufgezeigt, wird auch anhand der Grauwertverteilung über der Fläche eines Fehlerbereichs sowie einiger Linienprofile deutlich, dass die chloridinduzierte Lochkorrosion an mehreren Stellen fleckenhaft zu Werkstoffverlusten im Oberflächenbereich mit geringem Materialabtrag von 0,1 bis 1,0mm in der Tiefe geführt hat. Nur an einigen wenigen Stellen haben sich lokal sehr begrenzt Kavernen mit einer größeren Wandstärkenschwächung von bis zu 2,05mm gebildet, Abbildung 4 links unten. Bei der Durchstrahlungsprüfung ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Grauwertverteilung ausschließlich Information über die Wandstärkenschwächung liefert. Sind die Volumenfehler in Durchstrahlungsrichtung von der Rohroberfläche bis zum Fehlergrund durchgängig ausgebildet, entspricht die Wandstärkenschwächung auch der Fehlertiefe. Wie in Abbildung 1 anhand von Querschliffen aufgezeigt treten bei der chloridinduzierten Lochkorrosion Kavernen und Hohlräume im Werkstoff in verschiedenen Größen und regelloser verdeckter Lage auf. Bei verdeckten oder zerklüfteten Volumenfehlern ist die Fehlertiefe oftmals größer als die lokale Wandstärkenschwächung.

6. Fernfeld-Wirbelstromprüfung

Um ähnlich wie bei der Durchstrahlungsprüfung die Ausbildung und Verteilung der chloridinduzierten Lochkorrosion anhand von Korrosionsnarben in der Rohroberfläche und feiner Kavernen in der Rohrwandung mit Durchmessern kleiner 0,5mm auch in der Tiefe noch nachweisen zu können, wurde eine hochauflösende Fernfeld-Wirbelstromtechnik mit einer Eindringtiefe von ca. 3mm eingesetzt, Abbildung 5 /4, 5, 6/.

Fernfeld-Wirbelstromprüfung in Scantechnik

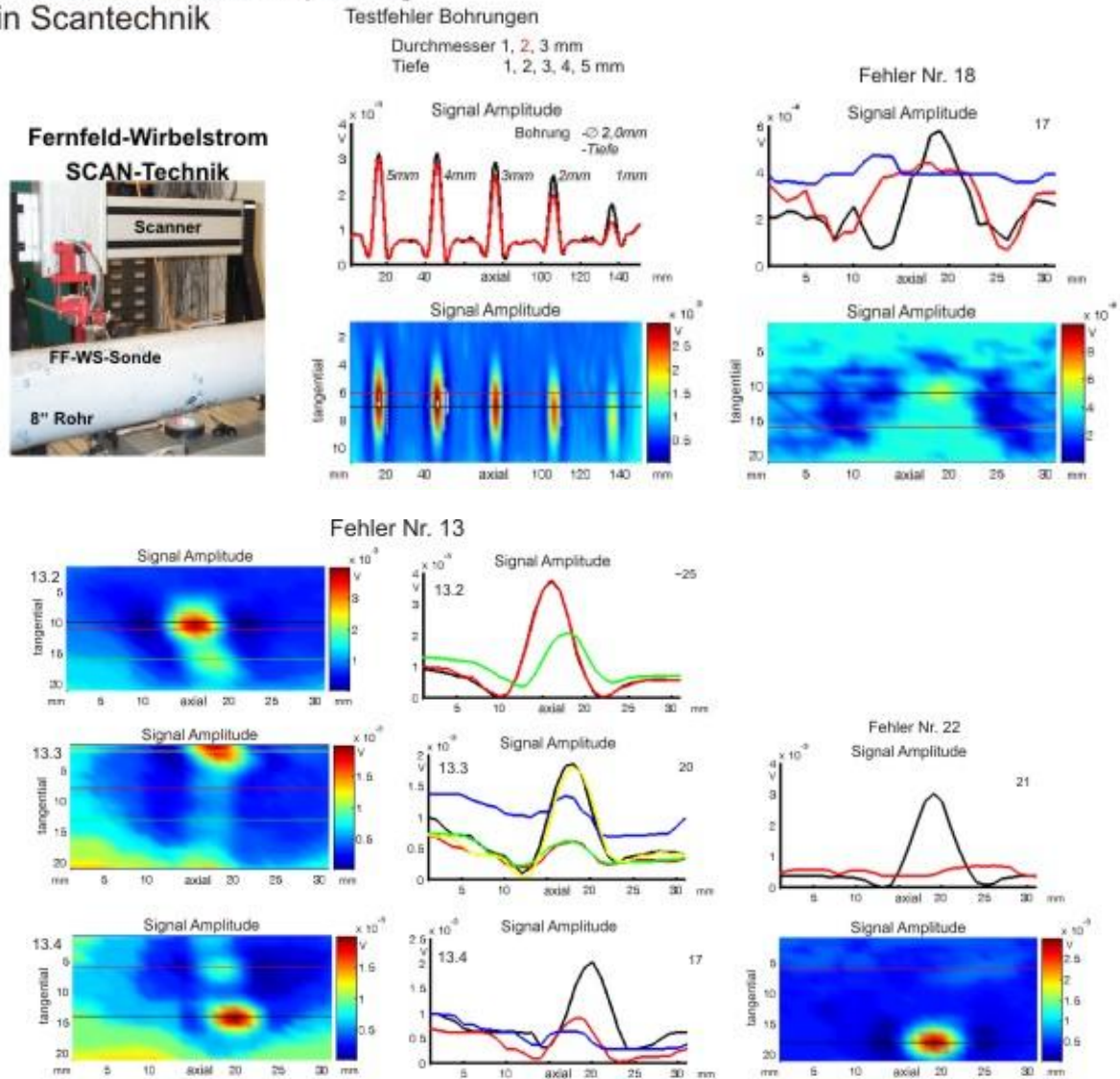


Abbildung 5: Fernfeld-Wirbelstromprüfung in SCAN-Technik

Zur Bewertung der Fernfeld-Wirbelstromanzeigen hinsichtlich der Fehlerausbildung und Fehler-tiefe wurden die in das 8'' Rohr eingebrachten Testfehler-Bohrungen mit einem Durchmesser von 1, 2 und 3mm und einer Bohrungstiefe von 1, 2, 3, 4 und 5mm gescannt. In Abbildung 5 links oben sind die registrierten Signal-Amplituden über der SCAN-Fläche und im Linienschnitt dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Signalamplitude zum einen vom Bohrungsdurchmesser, wie auch von der Bohrungstiefe abhängig ist. Mit zunehmender

Bohrungstiefe, bis 4mm, ist auch eine Zunahme der Signalamplitude verbunden, wodurch die hohe Eindringtiefe der hochauflösenden Fernfeld-Wirbelstromsonde bestätigt wird.

Wie die durchgeführten Untersuchungen anhand der Testfehler gezeigt haben, besteht hinsichtlich der Fehlertiefe ein Zusammenhang zwischen dem Fehlervolumen und dem Signalverlauf,

Fehlervolumen $\hat{=}$ Bohrungsdurchmesser und Bohrungstiefe

Signalverlauf $\hat{=}$ Signalamplitude und Signalbreite

was eine Abschätzung der Fehlertiefe aus dem Signalverlauf ermöglicht. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Fehlertiefe bei der Fernfeld-Wirbelstromprüfung besteht über die Betrachtung der Signalphase.

In Abbildung 5 sind exemplarisch die Fernfeld-Wirbelstrom-Scans von 3 Fehlern Nr. 13, 18 und 22 dargestellt. Bei dem Fehler Nr. 18, Abbildung 5 rechts oben, handelt es sich um Lochkorrosion im Rohr-Oberflächenbereich in einer Tiefe von bis zu 0,7mm. Der Fehler Nr. 22, Abbildung 5 rechts unten, ist ein Einzelfehler mit einer Fehlerbreite und einer Fehlertiefe von ca. 1,7mm. Beim Fehler Nr. 13 hingegen, Abbildung 5 links unten, handelt es sich um die Anhäufung von mehreren Fehlstellen, die mit der Mikrofokus-Röntgentechnik, wie in Abbildung 4 aufgezeigt, aufgelöst werden können. Auch die eingesetzte Fernfeld-Wirbelstromtechnik besitzt ein hohes örtliches Auflösungsvermögen und ermöglicht die Erfassung und Bewertung lokaler Lochkorrosion im Bereich des Fehlers Nr. 13. In der äußeren Randzone des Rohres werden Korrosionsnarben mit einer Tiefe von ca. 0,5mm und an mehreren Stellen Lochkorrosion mit einer Fehlertiefe von bis zu 1,9mm nachgewiesen. Damit ist die mit der Fernfeld-Wirbelstromtechnik in diesem Bereich ermittelte Fehlertiefe um 0,2mm geringer wie geometrisch über metallographische Schliffe ermittelt. Dieses ergibt sich dadurch, dass die volumetrisch sehr feine Kavernenspitze in der Tiefe des Werkstoffes nur einen geringen Einfluss auf das Fernfeld-Wirbelstromsignal hat. Zusammenfassend betrachtet besitzt die Fernfeld-Wirbelstromprüfung jedoch eine hohe örtliche Auflösung und Tiefenwirkung und bietet damit über einen SCAN des Fehlerbereichs Möglichkeiten zur lokalen Erfassung und Bewertung von chloridinduzierter Lochkorrosion in der Rohrwandung bezüglich der lokalen Ausdehnung und der Fehlertiefe.

7. Bauteil Wirbelstromprüfung mit Handsonde

Wirbelstromprüfung DELTA TEST GmbH

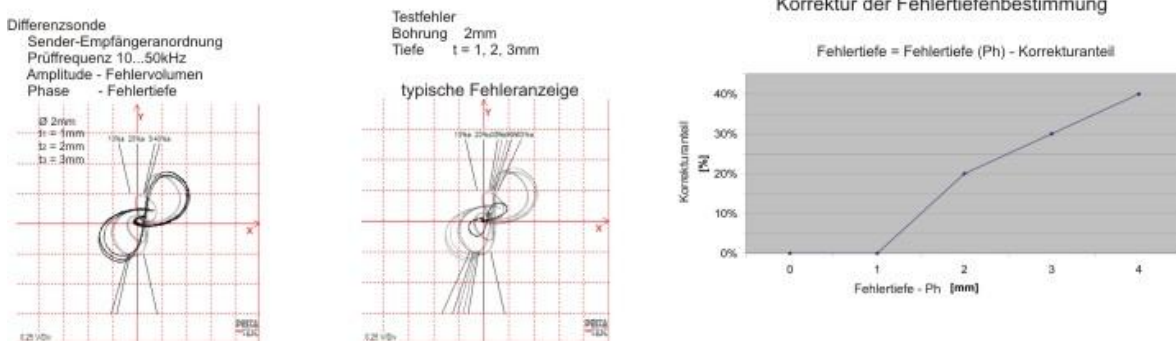


Abbildung 6: Wirbelstromprüfung von Rohren auf Lochkorrosion

Zur Realisierung einer schnellen Oberflächen-Rohrprüfung in technischen Anlagen vor Ort wurde von der Firma DELTA TEST GmbH eine Wirbelstrom Differenzsonde in Sender-Empfängeranordnung entwickelt und erprobt. Die Sonde ist geeignet zur Handprüfung von Rohren und arbeitet, je nach Anwendung, im Frequenzbereich von 10...50kHz.

Hinsichtlich der Fehlerausbildung erfolgt eine Bewertung des

Fehlervolumen - über Signalamplitude

Fehlertiefe - über Signalphase.

Typische Fehleranzeigen wurden an Testfehlern

Bohrungen - Durchmesser 2mm

Bohrungstiefe - t = 1, 2, 3mm

gewonnen und sind in Abbildung 6 dargestellt. Als Signalphase wurde dabei die Steigung des Differenzsignals beim Nulldurchgang erfasst. Eine Fehlertiefenbewertung von chloridinduzierter Lochkorrosion erfordert im Vergleich mit den Testfehler-Bohrungen aufgrund der veränderten Fehlergeometrie eine Korrektur der Signalphase

Fehlertiefe = Fehlertiefe(PH) – Korrekturanteil,

siehe Abbildung 6.

8. Vergleich der Fehlertiefenbestimmung

Zusammenfassend sind in Abbildung 7 die mit den verschiedenen Prüftechniken ermittelten Fehlertiefen für einige exemplarische Fehler aufgezeigt.

Nr	Fehler	Schliff	US-Imp.E.	MF-X-RAY	WS	WS-Korr.	FF-WS
	Position						
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
13.1	320				1,0	1,0	0,9
13.2	330	2,07	2,35	2,05	2,5	2,1	1,9
16	400				1,0	1,0	0,4
18	420	0,85	0,75	0,8	1,2	1,2	0,7
22	480	1,87	1,50	1,0	1,7	1,7	1,7
25	610				1,0	1,0	0,7
26	610				1,0	1,0	0,5
34	1160				1,0	1,0	0,4
46	1330		1,10		1,8	1,8	1,25
47	1440				1,2	1,2	1,1
48	1450				1,0	1,0	0,9

Tabelle 1: Vergleich der Fehlertiefenbestimmung

Im Vergleich mit den geometrisch anhand von Schliffen ermittelten Fehlertiefen zeigt die Ultraschallprüfung von der Rohrrinnenseite eine Abweichung von $\pm 0,3\text{mm}$. Die Schwierigkeit liegt dabei in dem sehr kleinen und diffusen Reflektor der Fehlerspitze in der Tiefe und der Positionierung des Prüfkopfes.

Mit der Mikrofokus-Röntgentechnik lässt sich anhand der Grauwertverteilung die Schwächung der Wandstärke sehr genau ermitteln. Die Problematik liegt hier in der Geometrie zerklüfteter oder verdeckter Fehler hinsichtlich der Bewertung der Fehlertiefe.

Bei der Ermittlung der Fehlertiefe mit der Wirbelstromprüfung werden kleine Fehler im Oberflächenbereich grundsätzlich mit 1mm Fehlertiefe angegeben und damit stark überbewertet. Auch flächig sehr breit ausgebildete Lochkorrosion, wie z.B. Fehler Nr. 46, führt aufgrund einer starken Signal-Amplitude bei großflächigen Oberflächenfehlern zu einer Überbewertung der Fehlertiefe.

Die Fernfeld-Wirbelstromprüfung in SCAN-Technik mit Bewertung der Fehlertiefe über ein Kennlinienfeld liefert bei kleinen wie auch größeren und tieferen Lochkorrosionsstellen mit ei-

ner mittleren Abweichung von $\pm 0,15\text{mm}$ zerstörungsfrei sehr zuverlässige Werte bezüglich der lokalen Fehlerrausbildung in der Rohrwand, wie auch der Fehlertiefe.

9. Zusammenfassung

Bei den im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen von austenitischen Rohren festgestellten Fehlstellen in der Rohrwand, handelt es sich um Lochkorrosion im Bereich der Rohraußenwand, was anhand von metallurgischen Untersuchungen über Querschliffe nachgewiesen wurde. Weiterhin konnte über Elementanalysen mit einer Mikrosonde ein erhöhter Chloranteil im Lochbereich und eine Verarmung der metallischen Grundelemente Eisen (Fe), Chrom (Cr) und Nickel (Ni) in der Werkstoffgrenzfläche nachgewiesen werden, was ein eindeutiges Indiz für die Schadensursache einer chloridinduzierten Lochkorrosion ist.

Die bei der Fernfeld-Wirbelstromprüfung vor Ort für das 8'' Rohr mit einer Wandstärke von 8,6mm angegebene maximale Fehlertiefe von 76% konnte nicht bestätigt werden. Anhand von schichtweisen Querschliffen im Fehlerrandbereich konnte lediglich eine maximale Fehlertiefe von 2,078mm, was einer relativen Wandschwächung von 24% entspricht, nachgewiesen werden. Hinsichtlich der zerstörungsfreien Prüfung von austenitischen Rohren auf Lochkorrosion wurden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie verschiedene zerstörungsfreie Prüftechniken an die Prüfaufgabe angepasst und hinsichtlich ihrer Nachweisempfindlichkeit und Eignung zur Fehlertiefenbewertung untersucht.

Mit Hilfe einer hochfrequenten Ultraschallprüfung im Impuls-Echo-Verfahren ist eine Vermessung der Fehlertiefe auch kleiner Hohlräume von der Rohrinneenseite möglich. Die Technik erfordert jedoch eine gute Ankopplung sowie eine genaue Führung und Positionierung des Ultraschallkopfes im Rohr.

Mit der Mikrofokus-Röntgentechnik lässt sich, anhand der Grauwertverteilung, die Schwächung der Wandstärke und damit die Fehlerrausbildung sehr genau ermitteln. Die Problematik liegt hierbei in der Geometrie zerklüfteter oder verdeckter Fehler hinsichtlich der Bewertung der Fehlertiefe.

Eine hochauflösende Fernfeld-Wirbelstromprüfung in SCAN-Technik mit einer hohen Eindringtiefe ermöglicht über Vergleichsfehler eine recht genaue Vermessung der Fehlerrausbildung und Bewertung der Fehlertiefe flacher und tiefer Fehler mit einer Abweichung von ca. $\pm 0,15\text{mm}$.

Eine speziell für die Rohrprüfung vor Ort entwickelte handgeführte Wirbelstrom Differenzsonde ermöglicht eine schnelle und empfindliche Fehlerprüfung am Ort der Anlage. Hinsichtlich der Fehlertiefe werden sehr flache und großflächig ausgebildete Fehler überbewertet.

10. Referenzen

- [1] Bargel, H.J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde, 9. bearb. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2005, ISBN: 3-540-26107-9
- [2] Investigation of Leaking, Interner Bericht – Shell Global Solutions – 2005
- [3] Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: Ultrasonic Testing of Materials. 4th, fully revised Edition, Springer-Verlag, 1990
- [4] Weber, W.: Zerstörungsfreie Prüfung dickwandiger austenitischer Rohre und Rohrbögen mit fortschrittlicher Wirbelstromtechnik. Dissertation, Uni. Hannover, 2002
- [5] Weber, W.; Feiste, K. L.; Reimche, W.; Stegemann, D.: Characterization of material degradation and detection of imperfections inside of thick walled austenitic components with electromagnetic testing. The 10th int. symposium of applied electromagnetics and mechanics, Tokyo, Japan, 13-16 May 2001
- [6] Reimche, W.; Bernard, M.; Zwoch, S.; Bach, Fr.-W.: Entwicklung und Quantifizierung einer Fernfeld-Wirbelstromtechnik zur Fehlerprüfung von Schweißnähten und dickwandigen Bauteilen. Tagung Werkstoffprüfung, Bad Neuenahr, 07.-08. Dez 2006
- [7] Feinfokus Röntgensysteme GmbH, Bedienungsanleitung, Garbsen (1993)