

# Wirbelstromprüfung von ferritisch-austenitischen Duplexwerkstoffen und Nickel mit Phasenauswertung in der Wärmetauscherrohrprüfung

Bernd HEUTLING<sup>1</sup>, Achim UEBRIG<sup>2</sup>, Maksym AWERBUCH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GSI mbH, Niederlassung SLV Hannover, Hannover

<sup>2</sup> Delta Test GmbH, Hambühren

Kontakt E-Mail: [heutling@slv-hannover.de](mailto:heutling@slv-hannover.de)

**Kurzfassung.** Bei der Prüfung von Wärmetauscherrohren sind die prüftechnisch etablierten Fälle diejenigen, die nicht-ferromagnetische Werkstoffe aufweisen, z.B. austenitische oder kupferbasierte Werkstoffe. Im Lauf der Jahre wurden bei Prüfung von ferromagnetischen Wärmetauscherrohren große Fortschritte gemacht hinsichtlich der Reduzierung der störenden hohen Permeabilität bis hin zur softwareseitigen Unterstützung der Prüfer bei der Signalauswertung im laufenden Prüfbetrieb. Die hartmagnetischen rostfreien ferritisch-austenitischen Duplexwerkstoffe wie z.B. 1.4462 oder der Super-Duplex 1.4410 (Alloy 2507, ASME SA789, S32750), dessen Korrosionsbeständigkeit noch besser ist, sind jedoch ein besonderer anspruchsvoller Fall. Gleiches gilt für Nickelrohre. Um die durch die Permeabilität dieser hartmagnetischen Werkstoffe hervorgerufenen Signalstörungen zu reduzieren, wurden besondere Sensoren entwickelt, die sich nach den Validierungen in der Entwicklungsphase bereits in ersten Einsätzen in der Wärmetauscherrohrprüfung bewährt haben.

Im Beitrag soll ein Überblick über die Eigenschaften, Möglichkeiten und Grenzen dieser „Duplexsensoren“ gegeben und erste Ergebnisse hinsichtlich der oben genannten Werkstoffe vorgestellt werden.

## Einführung

Für die Prüfung von Wärmetauscherrohren hat sich trotz großer Anstrengungen, anderer Prüftechniken zu etablieren, die Wirbelstromprüfung bis heute behauptet. Ihre Bevorzugung bei der Wärmetauscherrohrprüfung ist begründet durch ihre Schnelligkeit, also wirtschaftlichem Vorteil, als auch durch ihre hohe Detektionswahrscheinlichkeit (POD) und Aussagegenauigkeit.

Bis heute basieren diese Tatsachen vor allem auf der Prüffähigkeit nicht-ferromagnetischer Rohrwerkstoffe, wie z.B. austenitischer oder kupferbasierter Werkstoffe. Ferromagnetische und selbst ferritisch-austenitische Werkstoffe schmälern diese Vorteile mit zunehmender Permeabilität zusehends.

In diesem Beitrag werden die Entwicklungen in der aktuellen Wirbelstromsensorentwicklung der Firma Delta Test GmbH für ferritisch-austenitische Werkstoffe und perspektivisch für allgemein ferromagnetische Werkstoffe dargestellt.



## 1. Wärmetauscherprüfung – eine kurze Abgrenzung

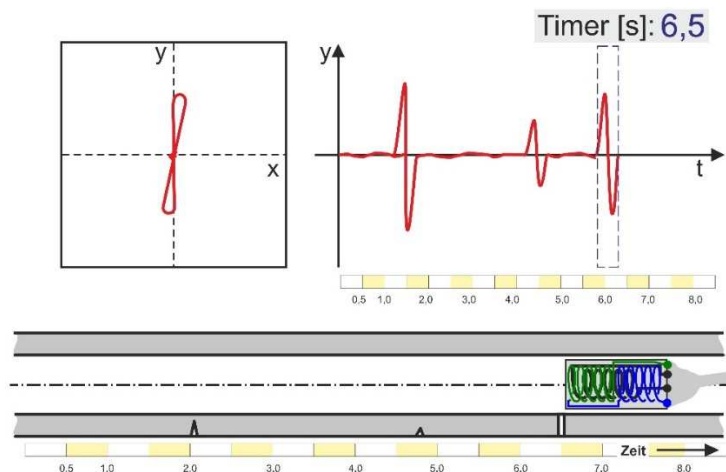
In vielen Industrieanlagen wie z.B. der chemischen und ONG-Industrie kommen Wärmetauscher zum Einsatz. In vielen Fällen ist es aus ökonomischen und sicherheitstechnischen Aspekten wichtig, diese Wärmetauscher initial und dann wiederholend auf Betriebstüchtigkeit zu prüfen. Diese Prüfungen sollen ökonomisch sein und beinhalten üblicherweise nicht nur eine Untersuchung auf Unregelmäßigkeiten. Sie haben gerade im Fall der Wiederholungsprüfungsthematik das Ziel, Aussagen bis hin zum Schädigungsfortschritt der Prüfobjekte zu leisten [1].

Konventionelle Prüftechniken wie Magnetpulverprüfung und Eindringprüfung sind aufgrund der stark eingeschränkten Zugänglichkeit der Mehrheit der Wärmetauscherrohre nicht einsetzbar. Die Sichtprüfung kann aus diesem Grund auch nur eingeschränkt benutzt werden (Endoskopie der Innenwandung der Rohre), ist dabei jedoch systemimmanent auf diese Innenoberfläche begrenzt und ist damit und aus Gründen der geringen der Prüfgeschwindigkeit mit dem o.g. Ziel nur sehr bedingt einsetzbar. Die Ultraschallprüfung wird in Form der IRIS-Prüfung eingesetzt, ist jedoch im Vergleich zur Wirbelstromprüfung sowohl aufwändiger in der Prüfobjekt- und Prüfvorbereitung als auch langsamer in der Prüfgeschwindigkeit [2].

Die Wirbelstromprüfung hat bis heute den größten Anteil in der Wärmetauscherrohrprüfung. Dies ist begründet durch ihren ökonomischen Vorteil der hohen Prüfgeschwindigkeit, aber auch durch ihre hohe Detektionswahrscheinlichkeit (POD) und Aussagegenauigkeit hinsichtlich sowohl flächiger als auch voluminöser Unregelmäßigkeiten [3], [4].

## 2. Wirbelstromsignale in der Wärmetauscherprüfung

Gemeinhin bekannt sind die Basissensorkonstruktionen bzw. -schaltungen von Wirbelstromsensoren in der Rohrprüfung und die daraus generierten Wirbelstromsignale [5].



**Abb. 1:** Beispiel Signalgenerierung bei einem Differenzsensor in einem paramagnetischen Rohr

In der Literatur [5] sind Beispiele für die Signalgewinnung und Interpretation von Wirbelstromsensoren insbesondere an nicht-ferromagnetischen Prüfobjekten dargestellt und erklärt; ein Beispiel für die Signalerzeugung mit einem Differenzsensor in einem parama-

netischen Rohr ist in Abb. 1 gezeigt. Darin ist die Klarheit der Signale und ihr ausgezeichnetes Signal-Rausch-Verhältnis SNR sowohl in XY- als auch Y-t-Darstellung sehr gut zu sehen.

Inzwischen ist nicht nur die von jeher mögliche Zeit-Zuordnung der Signalereignisse realisierbar (s. Abb. 1) und bei gleichförmiger Sensorgeschwindigkeit daraus abgeleitet der Ortsbezug der Signalereignisse generierbar, sondern es ist durchaus möglich über spezielle Wegaufnehmer einen echten Millimeter-genauen Ortsbezug herzustellen, was für die Analyse von Schädigungsfortschritten von größter Bedeutung ist [6], [10].

Damit hat sich die Wirbelstromprüfung von nicht-ferromagnetischen Wärmetauschern als schnell, einfach und reproduzierbar und damit verlässlich gezeigt und etabliert.

### 3. Problematik der Wirbelstromprüfung von ferromagnetischen Werkstoffen

All diese positiven Aspekte bei der Prüfung nicht-ferromagnetischer Prüfobjekte täuschen nicht darüber hinweg, dass die Wärmetauscherprüfung mit Wirbelstromsystemen bei der Prüfung von ferromagnetischen Rohrwerkstoffen mit Problemen behaftet ist.

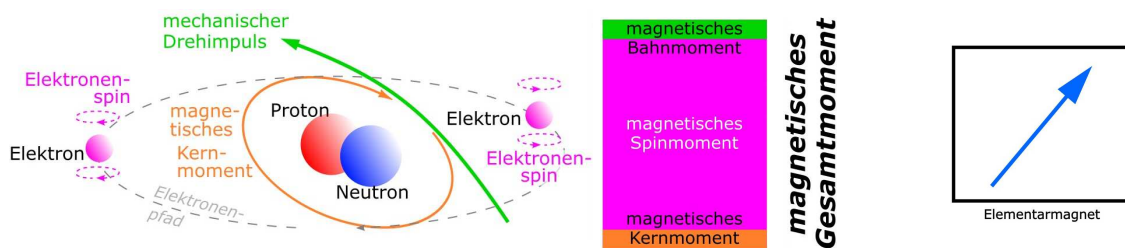


Abb. 2: vereinfachte Herleitung der Darstellung eines Elementarmagneten

Grob vereinfacht bildet jedes Atom aufgrund mehrerer Spin- bzw. Drehimpulseffekten „nach außen“ einen winzigen Elementarmagneten (Abb. 2). In ferromagnetischen Werkstoffen sind diese Elementarmagnete in einzelnen Bereichen in gleicher Richtung vororientiert, den sog. magnetischen Domänen bzw. Weiß'schen Bezirken (Abb. 3).

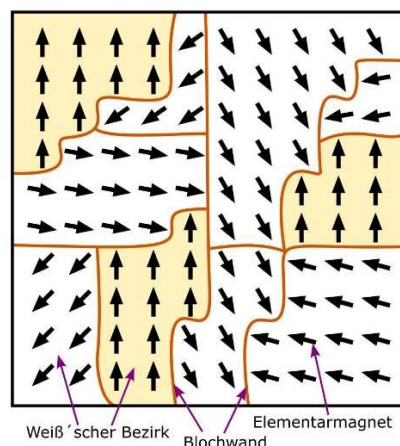


Abb. 3: Vorausrichtung der Elementarmagnete in ferromagnetischem Werkstoff

Beim Magnetisieren des Bauteils setzen diese magnetischen Bezirke der Ummagnetisierung durch das äußere Magnetfeld einen Widerstand entgegen. Dieser Widerstand hängt vor allem von der Permeabilität des Bauteilwerkstoffs ab. Die Permeabilität ist zum einen

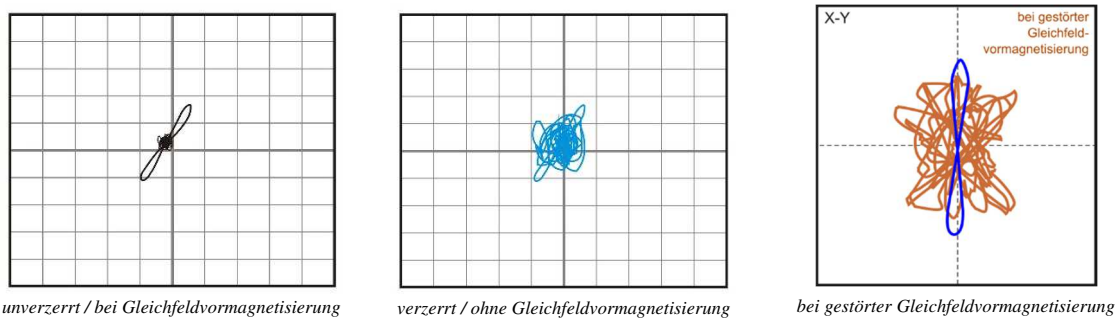
werkstoffspezifisch und zum anderen aufgrund zahlreicher Einflüsse nicht konstant über das Bauteil. Mikroskopisch ist der Einfluss der Weiß'schen Bezirke überwiegend, aber auch Schwankungen der chemischen Zusammensetzung bewirken Änderungen der Permeabilität. Makroskopisch können Wärmebehandlungen, Verformungen im kalten Zustand sowie innere Spannungen, Gefügestruktur wie z.B. Einschlüssen, Poren und Ausscheidungen die Permeabilität merkbar beeinflussen (Abb. 4) [11]. In all dieser Variabilität und Kombinatorik wird der Einfluss der Permeabilität unvorhersehbar.

Werkstoffeigenschaft	Permeabilität $\mu$
chemische Zusammensetzung / Legierung	mit Einfluss
Mischkristallzusammensetzung	mit Einfluss
Gefüge, Korngröße	mit starkem Einfluss
Mischgefüge-Zusammensetzung	mit Einfluss
Ausscheidungen	mit starkem Einfluss
innere Spannungen	mit starkem Einfluss
Anisotropie	mit Einfluss
Mikrorissfelder, Spannungsrisskorrosion	mit Einfluss
(Kalt-)Verformung	mit Einfluss
$\delta$ -Ferrit im Austenit	mit starkem Einfluss
Dendriten im Stahl	ohne Einfluss
Einschlüsse, Poren	mit starkem Einfluss

■ = ohne Einfluss   
 ■ = mit Einfluss   
 ■ = mit starkem Einfluss

**Abb. 4:** Einfluss von Gefügeeigenschaften auf Leitfähigkeit und Permeabilität [11]

Diese Variabilität bewirkt starke Verzerrungen und Störsignale im Wirbelstromsignal (Abb. 5, Mitte und rechts).



**Abb. 5:** Verzerrungen / Störsignale in Wirbelstromsignalen bei ferromagnetischen Werkstoffen

Und obwohl diese Einschränkungen die Prüfungen massiv erschweren, können mit einer optimalen Abstimmung von Prüfhardware, Prüfsoftware und sehr gut geschultem, erfahrenem Personal so gut reproduzierbare Wirbelstromdaten generiert werden, dass eine automatische Signalauswertung auch hier möglich ist [6].

Aus Abbildung Abb. 5 wird ersichtlich, dass Maßnahmen notwendig sind, um die Einflüsse des ferromagnetischen Werkstoffverhaltens auf das Wirbelstromsignal zu minimieren oder im Idealfall vollständig zu kompensieren.

Im Fall der Wärmetauscherprüfung ist hierzu der Einsatz von Innendurchlaufensensoren mit miniaturisierten Elektromagneten etabliert. Die Elektromagneten sollen eine Gleichfeldvormagnetisierung bewirken, die im Fall der Rohrprüfung in der Herstellung mit Außendurchlaufensensoren eine fast vollständige Bedämpfung der ferromagnetischen Störungen im Wirbelstromsignal bewirken (s. Abb. 5, links). Aufgrund der Tatsache, dass letztere Magnete

ungleich größer und damit hinsichtlich der Magnetisierung stärker sind, ist im Fall der Wärmeaustauscherprüfung ferromagnetischer Werkstoffe nur eine erkennbar geringere Bedämpfung und damit schlechtere Signalqualität erzielbar. In der Folge bedeutet das, dass eine Wirbelstromprüfung in diesen Fällen nur durch eine stark optimierte Kombination von ideal an die Prüfsituation angepasste Wirbelstromsensoren und sehr erfahrem Prüfpersonal (wegen der sehr komplexen Signalformkombinationen (s. Abb. 6)) erfolgreich reproduzierbar und belastbar durchgeführt werden kann.

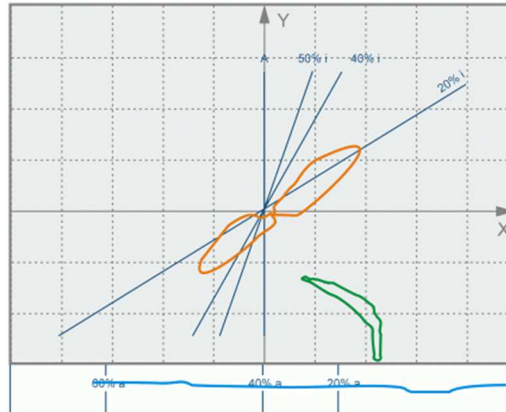


Abb. 6: Beispielhaftes Wirbelstromsignal an einem 20%-Innenfehler eines ferromagnetischen Rohres

#### 4. Entwicklungsziel

Aufgrund der oben beschriebenen Situation sind in diesem Beitrag insbesondere die Verzerrungen der Wirbelstromsignale durch die Einflüsse ferromagnetischer Werkstoffe [5] (s. Abb. 6) bzw. deren Vermeidung von Interesse. Das Entwicklungsziel war es also im Idealfall signaltechnisch robuste, unverzerrte Wirbelstromsignale mit großem Signalrauschverhältnis, typischem Signalverlauf und ähnlich guter Sensitivität wie bei nicht-ferromagnetischen Prüfstücken zu erhalten (s. Abb. 1).

#### 5. Entwicklungsschritte

Ausgehend von der (Differenzkanäle mit den Informationen aus Absolutkanälen verknüpfender) Mehrkanalprüfung (s. Abb. 6) wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt, in denen andere zusätzliche Informationsstränge eingebunden wurden.

Aus Platzgründen sei hier beispielhaft die Prüfung mit vier Differenzkanälen mit einer zugekauften Prüfsoftware dargestellt. Vorgabe darin ist der Einsatz von vier Differenzkanälen, deren Frequenzen in Abhängigkeit von der Kombination von Rohrwanddicken und -werkstoff voreingestellt werden. Als optimale Prüffrequenz  $f_{opt}$  ergibt sich diejenige Frequenz, die die Testfehler mit bester Spreizung (ca.  $45^\circ$ ) zwischen Innen- und Außenfehler und gleichzeitig größter Amplitude darstellt (s. Abb. 7, oben Mitte). Damit ist zwar eine gute Unterscheidung zwischen Innen- und Außenfehlern am Rohr möglich, die Bewertung der „Fehlergröße“ ist allerdings nur über die Amplitude möglich und damit weitaus weniger aussagesicher wie die phasenbasierte Fehlerbewertung bei nicht-ferromagnetischen Rohrwerkstoffen. Das bedeutet, dass auch in diesem Fall zusätzliche Informationen über Absolutkanal/-kanäle notwendig sind, was die Bewertung wieder unerwünscht komplex gestaltet.



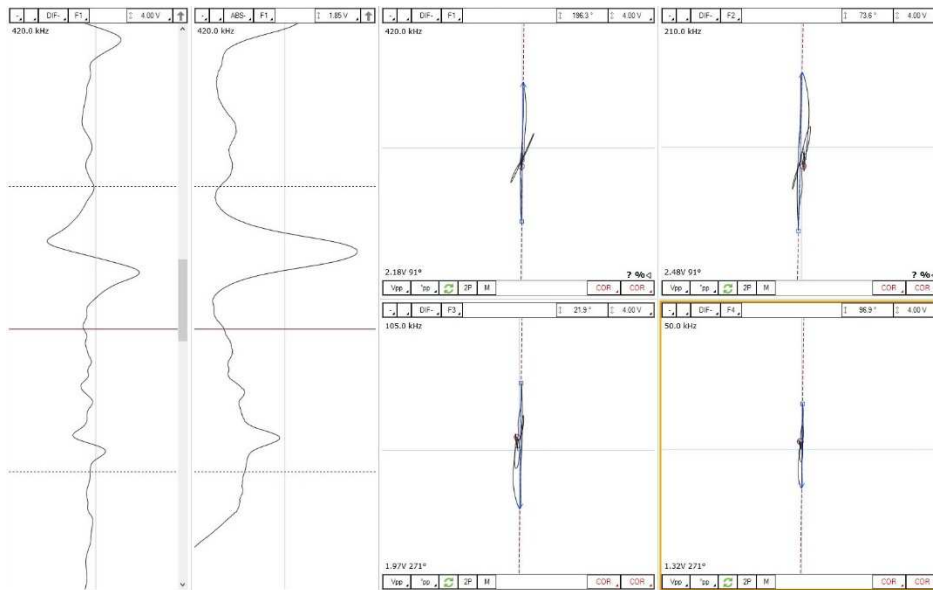


Abb. 7: Fehlerbewertung über die Kombination von vier und mehr Wirbelstromkanäle

Ein zweites Beispiel ist die Kombination von zwei Impedanzebenen: eine für die Darstellung von Außenfehlern, eine für die Anzeige von Innenfehlern (s. Abb. 8). Darin ist die Trennung von Außen- und Innenfehlern viel besser und auch die Bewertbarkeit der Fehler der jeweiligen Fehlerlage ist besser geworden. Allerdings ist die Spreizung in den Skalen nur gering und damit die Genauigkeit der Fehlergrößenbewertung eingeschränkt. Dazu kommt, dass die Komplexität durch die immer noch benötigten Absolutkanäle und die zusätzliche Impedanzebene eher noch erhöht wurde.

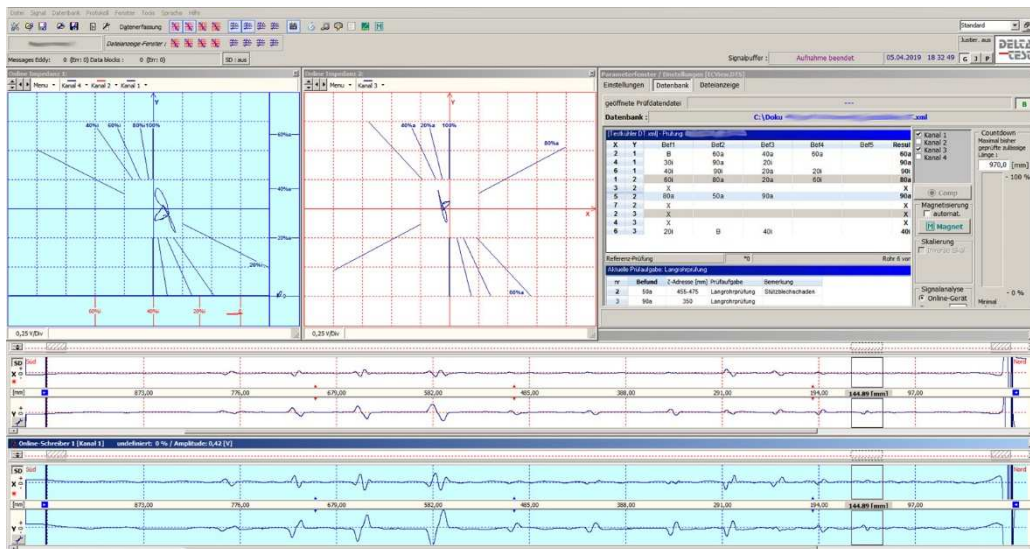


Abb. 8: Versuch mit zwei Impedanzebenen mit getrennter Darstellung von Außen- und Innenfehlern

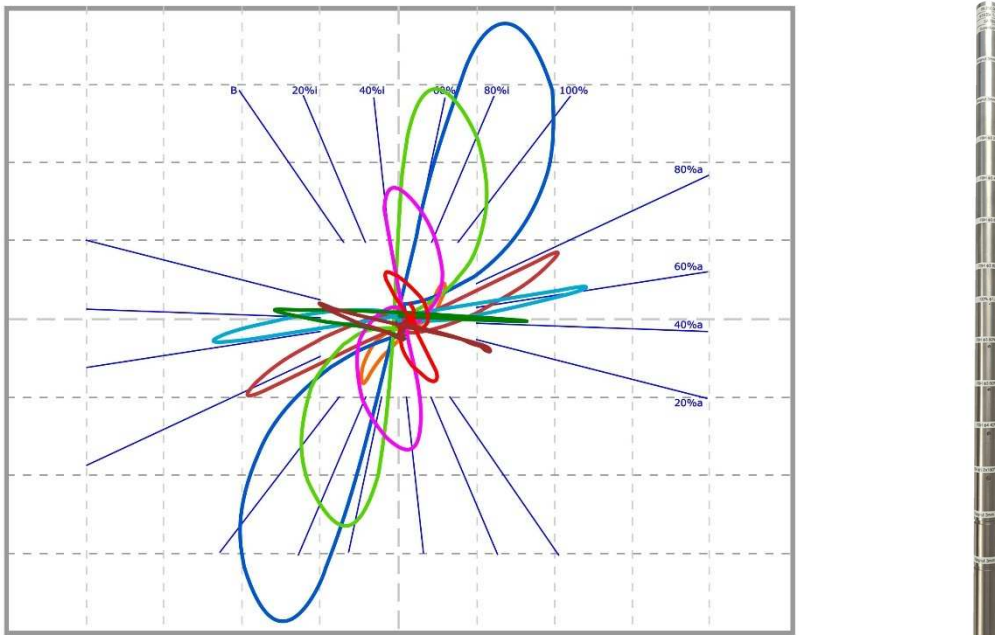
## 6. aktueller Entwicklungsstand

Nach zahlreichen weiteren Ansätzen und deren Untersuchungen wurde dann nach langer Entwicklungszeit der hier vorgestellte „Sensor mit komprimierenden Feldern“ entwickelt. Er zeichnet sich durch die fast vollständige Unterdrückung von Permeabilitätseinflüssen bei Duplex- und Superduplexstählen aus, wie in den folgenden Abschnitten gezeigt wird. Dieser

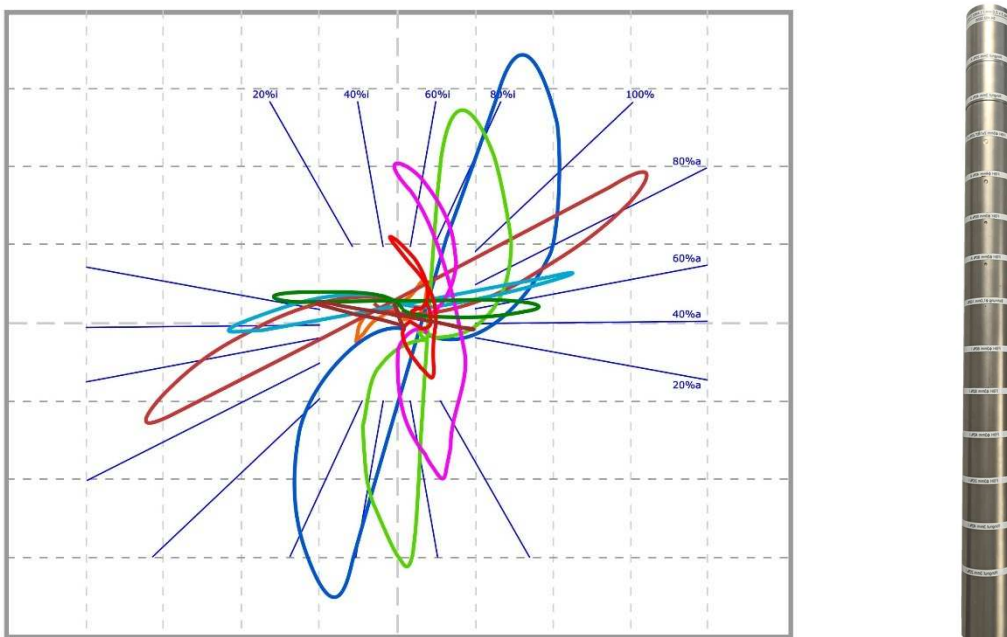
Sensortyp ist in mehreren Durchmesserstufungen realisiert und eingesetzt und erprobt worden. Über die Erfahrungen in Erprobung und Verifizierung werden in den folgenden Abschnitten berichtet.

## 7. Nachweise an künstlichen Fehlern in Duplex-/Superduplexrohren

Über die Erprobung an künstlichen Fehlern Duplex-/Superduplexrohren mit bekannten Fehlergrößen und -tiefen wurden eindeutige Skalen ermittelt und Bewertungssettings gespeichert und weiterverwendet. Die folgenden Abbildungen (Abb. 9, Abb. 10) zeigen wie eindeutig, gut gespreizt und störungsarm die einzelnen Fehlergrößen bei unterschiedlichen Rohrdimensionen und Sensoren zur Anzeige kommen.



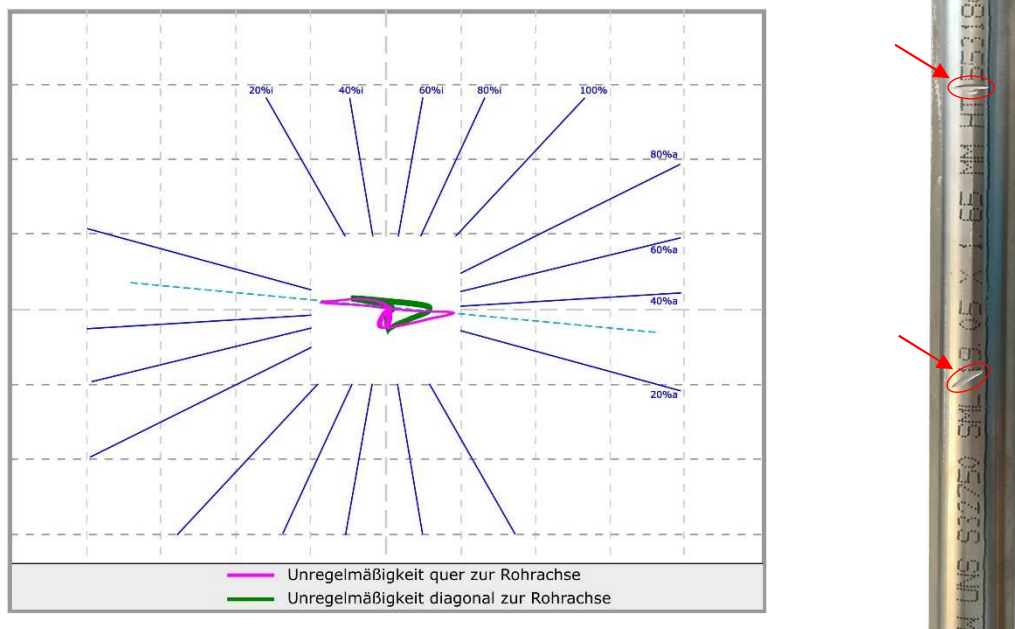
**Abb. 9:** Wirbelstromsignale (links) ermittelt an einem Justier-Superduplexrohr  $\text{Ø}19,05 \cdot 1,65$  [mm] (rechts)



**Abb. 10:** Wirbelstromsignale (links) ermittelt an einem Justier-Superduplexrohr  $\text{Ø}48,3 \cdot 2,11$  [mm] (rechts)

## 8. Nachweise an natürlichen Fehlern in Duplex-/Superduplexrohren

Um die Nachweisqualität von unbekanntem natürlichen Unregelmäßigkeiten zeigen zu können, wurden manuell Unregelmäßigkeiten in ein Superduplexrohr  $\text{Ø}19,05 \cdot 1,65$  [mm] eingebracht und diese dann mit dem dazugehörigen Sensorsystem  $\text{Ø}15$  untersucht und bewertet (s. Abb. 11).

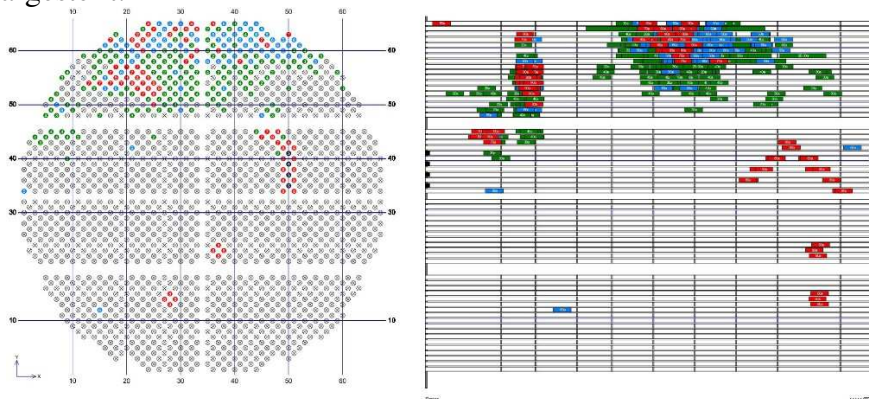


**Abb. 11:** Wirbelstromsignale (links) ermittelt an einem Superduplexrohr  $\text{Ø}19,05 \cdot 1,65$  [mm] (rechts); Rohr enthält zwei natürliche Fehler

Die in Abb. 11 gezeigte Querunregelmäßigkeit wurde taktil nachgemessen. Der verbleibende Durchmesser in/unter dieser Unregelmäßigkeit (s. Abb. 11, rechts, obere Markierung) betrug 18,6 mm, was ca. 26% Wanddickenschädigung entspricht. Die vom Sensor ausgewiesene Wanddickenschädigung von ca. 30% (s. Abb. 11, links) weist eine sehr gute Abbildung des eigentlich geringen Wanddickenverlusts auf.

## 9. Beispiele aus dem realen Einsatz

Seit in der Entwicklung und in etlichen Laboreinsätzen gute Erfahrungen mit dem „komprimierenden Sensor“ gemacht wurden, ist dieser Sensortyp in verschiedenen Größen im realen Prüfeinsatz und hat sich dort durchweg bewährt. Im Folgenden werden Beispiele aus diesen Einsätzen dargestellt.

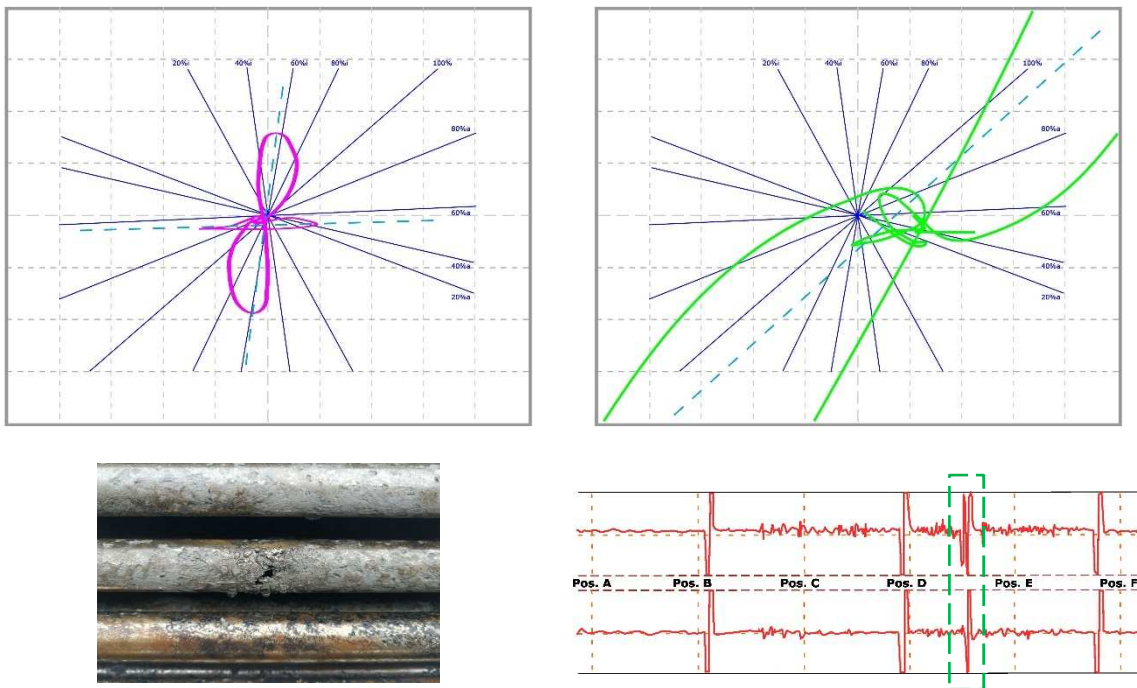


**Abb. 12:** Rohrbild und z-Ansicht eines Wärmetauschers



Abbildung Abb. 12 zeigt das Rohrbild und die dazugehörige z-Ansicht (=Ansicht über die Rohrlänge) eines Wärmetauschers, der mit den neuartigen Sensoren geprüft wurde. Aus dessen Prüfergebnissen werden im Folgenden einige Signale und daraus resultierende Befunde näher betrachtet. Direkte Bezüge auf den Wärmetauscher oder exakte Rohrangaben werden aus Datenschutzgründen nicht genannt.

In Abb. 13 werden Ergebnisse aus einer Prüfung an einem Hyperduplex-Stahl (austenitisch-ferritisch) dargestellt. Das Wirbelstromprüfsystem war einem passenden Justierrohr eingestellt worden (s. Justiersignale in Abb. 13, li. o.). Aus dem Signalverlauf in Y-t-Darstellung werden mehrere Aspekte deutlich (Abb. 13, re. u.): zum einen ist das Wirbelstromsignal streckenweise ganz leicht verrauscht, was vorwiegend auf die korrodierten Rohroberflächen zurückzuführen sein dürfte. Zum anderen ist deutlich zu sehen, wie deutlich sich das Signal der Unregelmäßigkeit vom Grundsignal abhebt (SNR > 18 dB). Das Inhomogenitätssignal in XY-Darstellung (Abb. 13, re. o.) weist durch seine Phasenlage klar auf eine Leckage hin, was nach dem Ziehen des Rohrs aus dem Wärmetauscherbündel mit bloßem Auge ersichtlich war (Abb. 13, li. u.).

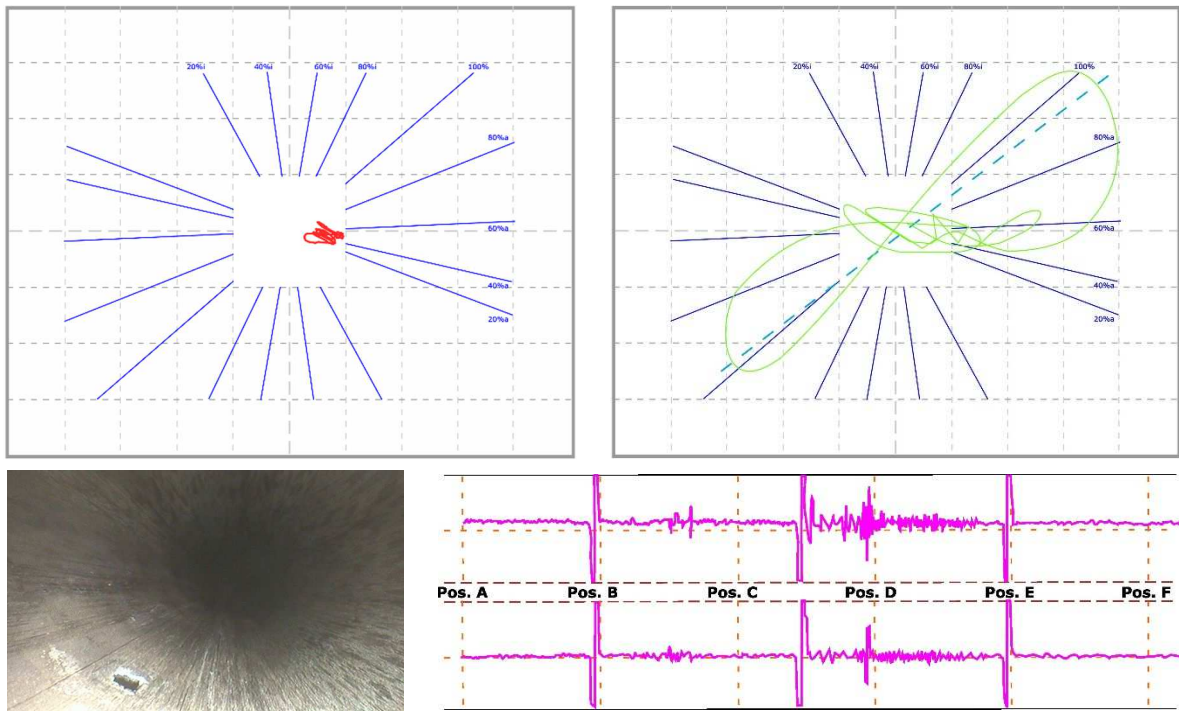


**Abb. 13:** Ergebnisse aus einem Prüfeinsatz (anonymisiert und durch Übertragung in Graphik unkenntlich gemacht):

- li. o.: Darstellung der Justierfehlersignale 60% i und 60% a
- re. o.: XY-Signalverlauf einer Leckage (in der Mitte zwischen Pos. D und Pos. E im Y-t-Schreiber (s. re. u., grün markiert))
- re. u.: Ausschnitt des Signalverlaufs im Y-t-Schreiber (Impedanzebene re. o. stellt den grün markierten Signalteil dar)
- li. u.: Foto der gemeldeten Leckage nach dem Ziehen des Rohrs

Abbildung Abb. 14 zeigt ein weiteres Beispiel aus dem Prüfalltag. Auch hier ist das Fehlersignal in der Impedanzebene (re. o.) dargestellt. Das Belegfoto der Leckage ist li. u. abgebildet. Die Impedanzebene li. o. zeigt das Grundsignal / Rauschen des Wirbelstromsignals im Bereich zwischen Pos. D und Pos. E. Im Vergleich der Impedanzdarstellungen

oben links und rechts ist gut ersichtlich, dass die Fehlersignale klar aus dem Rauschen herauskommen, d.h. das Signal-Rausch-Verhältnis  $SNR$  sehr gut ist ( $SNR > 18$  dB). Dies ist auch in der Y-t-Darstellung re. u. in Abb. Abb. 14 eindrucksvoll zu sehen.



**Abb. 14:** Zweites Beispiel aus dem Prüfalltag (anonymisiert und durch Übertragung in Graphik unkenntlich gemacht):

- li. o.: XY-Darstellung des Rauschsignals zwischen Pos. D und Pos. E
- re. o.: XY-Signalverlauf einer Leckage (bei Pos. D im XY-t-Schreiber)
- re. u.: Ausschnitt des Signalverlaufs im Y-t-Schreiber (Impedanzebene re. o. stellt den Signalteil direkt links von Pos. D dar)
- li. u.: Foto der gemeldeten Leckage nach dem Ziehen des Rohrs

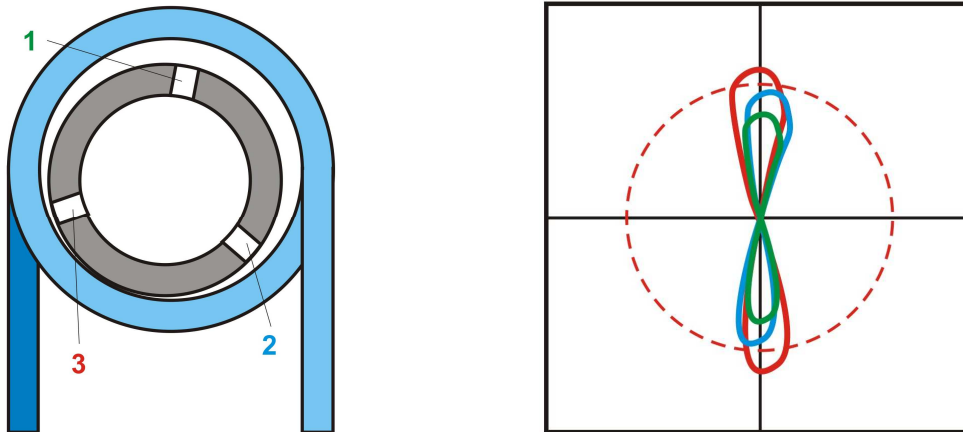
## 10. Zusammenfassung und Ausblick

Nach vielen Entwicklungsschritten kann das Konzept der „Sensoren mit komprimierenden Feldern“ hier vorgestellt werden. Es basiert sowohl auf der langjährigen Erfahrung in der Konstruktion und im Bau von Wirbelstromsensoren als auch der langjährigen Vertrautheit mit der Wirbelstromprüfung von Stahlrohren. In empirischen Untersuchungen an Duplex-/ Superduplexrohren sowohl im Testrohrsetting als auch in der realen Prüfsituation wurde diese neue Sensorkonstruktion erprobt und verifiziert.

Dabei ergaben die Erfahrungswerte aus der Entwicklung und Erprobung, dass die Sauberkeit des Signals abhängig ist von der Rohrwanddicke ( $WD_{max} = 2,5$  mm). Innerhalb dieser Grenze ergibt sich für Duplex- und Superduplex-Stähle eine gute Trennung und Bewertbarkeit von Innen- und Außenfehlern über ihre Phasenlage. Dabei reicht die Qualität der Phasentrennung durchaus an die bei der Bewertung von Rohren aus nicht-ferromagnetischen Werkstoffen heran.

Weitere Vorteile sind die nur noch minimale Dezentrierung des Sensors im Vergleich zu konventionellen Stahlrohrsensoren und dadurch nur eine geringere Über- bzw. Unterbewertung von Unregelmäßigkeiten an unterschiedlichen Positionen über den Rohrumfang

(Abb. 15). Darüber hinaus tritt im Vergleich zu herkömmlichen Stahlrohr-Wirbelstromsensoren ein deutlich geringerer Verschleiß auf, was die Lebensdauer der Sensoren spürbar verbessert.



**Abb. 15:** Falschbewertung bei Dezentrierung des Sensors

Ein weiterer Nutzen ergibt sich für die Prüfung von austenitischen Wärmetauscherrohren durch die Möglichkeit der Eliminierung von 'False calls'; diese entstehen u.a. durch martensitische Gefügebereiche,  $\delta$ -Ferrit (das z.B. in Schweißnähten über den Schweißzusatzwerkstoff vorkommt oder aufgrund von Deformationen wie z.B. durch Hammerschläge bei der Montage).

Darüber hinaus können diese neuartigen Sensoren die Nachprüfung nicht-eindeutiger Signale bzw. Anzeigen von Unregelmäßigkeiten mit anderen Verfahren (z.B. IRIS-UT) nicht nur bei Duplex-/Superduplexstählen, sondern auch bei austenitischen Stählen ersparen.

Für die nahe Zukunft sind die Konstruktion, Bau und Verifizierung weiterer Sensordurchmesser geplant.

## Referenzen

- [1] Heutling, B.; Uebrig, A.; Awerbuch, M., Sievert, W.: Application of Eddy Current Array Technology from the Point of View of a Service Provider; 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016; München; 2016
- [2] Aire, G.E., Chimezie, H.N.: "Comparison of Non-Destructive and Destructive Examinations in Today's Inspection Practices"; WCNDT 2016; München
- [3] Sadek, H.M.: "NDE technologies for the examination of heat exchangers and boiler tubes - principles, advantages and limitations"; Insight Vol 48 No 3 March 2006, pp. 181-183
- [4] Al-Qadeeb, F.E.: "Tubing Inspection Using Multiple NDT Techniques"; 3<sup>rd</sup> MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition; Nov 2005; Bahrain, Manama
- [5] Stroppe, H., Schiebold, K.: „Wirbelstrom-Materialprüfung“; Castell-Verlag; 1. Auflage; 2011; ISBN 978-3-934255-49-4
- [6] Hünies, P.; Heutling, B.; Automatische Klassifizierung von Signalen bei der Wirbelstromprüfung von ferromagnetischen Wärmetauschern; DGZfP-Berichtsband; DGZfP-Jahrestagung; Münster; 2009
- [7] Rasmussen, H.H., Kristensen, H. & Jeppesen, L.: „NDT and Heat Exchanger Tubes“; ECNDT 1998; Okt. 1998; Copenhagen
- [8] Goel, A.: "Refinery Reliability Through Advanced NDT Methodologies"; Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation; Dez. 2006; Hyderabad
- [9] Krzywoszw, K. - EPRI-NDE-Center: "Balance of Plant Heat Exchanger Condition Assessment and Inspection Guide"; 1999; Procedure No: BOPHX-01, Rev.-no.: 0
- [10] Heutling, B.; Uebrig, A.: „Wärmetauscherprüfung mittels Wirbelstrom zur Unterstützung von RBI“; DGZfP-Berichtsband; DGZfP-Jahrestagung; Potsdam; 2014
- [11] Crostack, H.-A.; Bischoff, W.; Stand und Möglichkeiten der zerstörungsfreien Qualitätssicherung; HTM; Carl Hanser Verlag, München; 1989; S. 221-230