

Wärmetauscherprüfung mittels Wirbelstrom zur Unterstützung von RBI

Bernd HEUTLING *, Stefan KÖLLNER **, Achim UEBRIG **
* LVQ-WP Werkstoffprüfung GmbH, Europaallee 1-3, 28309 Bremen
** Delta Test GmbH, Hambühren, Brigitta 15, 29313 Hambühren

Kurzfassung. Viele chemische, aber auch energiegewinnende Prozesse beinhalten Erwärmungs- und/oder Abkühlungsschritte. Um diese im industriellen Rahmen realisieren zu können, werden Wärmetauscher, Kondensatoren, Kessel u.v.m. eingesetzt, die einen Wärmeaustausch zwischen einem Hilfsstoff und dem eigentlichen Produkt ermöglichen. Aufgrund des oftmals großen Temperaturunterschieds zwischen Hilfsstoff und Produkt sowie der für die Apparate korrosiven Medien unterliegen die Apparate einem ständigen, wenn auch nicht gleichmäßigen Verschleiß, der bis zum Versagen führen kann.

Derartige Versagensfälle stellen sowohl für die Umwelt und Betriebssicherheit als auch für den wirtschaftlichen Unternehmenserfolg große Risiken dar, so dass seit langem aufgrund von Vorschriften und Regularien, aber auch aus wirtschaftlichem Eigeninteresse zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen durchgeführt werden. Eine Weiterentwicklung bzw. Alternative zu den konventionellen via Zeitintervall gesteuerten Inspektionsplänen ist das inzwischen vielfach implementierte Risk-Based-Inspection-Konzept (RBI). Darin führen die Betreiber ähnlich dem SHM-Konzept ein langfristiges Monitoring der Objekte via wiederkehrender Prüfungen durch. Auf Basis der Ergebnisse wird dann eine Risikoabschätzung hinsichtlich des wahrscheinlichen Schädigungsfortschritts vorgenommen. Dazu müssen exakte Ergebnisse hinsichtlich Ort und Schädigungsgrad vorliegen.

In diesem Beitrag sollen verschiedene technologische Randbedingungen sowie ihre technische Umsetzung betrachtet werden, die notwendig sind, um wirbelstrombasierte Wärmetauscherprüfungen als wertvolles RBI-Instrument dauerhaft zu etablieren. Zu diesen Aspekten gehören die Kontrolle der Eignung der Justierkörper und -fehler, die Sicherstellung der maximalen Prüfgeschwindigkeit im Verhältnis zur Abtastrate sowie insbesondere die Reproduzierbarkeit der Befunde hinsichtlich ihrer Größe und Lage unabhängig von den Unwägbarkeiten der konventionellen manuellen Wirbelstromprüfung, aber auch ihre eindeutige Dokumentation. Neben einer theoretischen Betrachtung dieser Aspekte wird auch eine seit Jahren bewährte Umsetzung in den Prüfalltag via Hard- und Software-Lösungen vorgestellt.

Einführung

Sowohl in der Chemie als auch in Energiegewinnung werden in einer Vielzahl von Fällen Prozesse betrieben, die aus verschiedensten Gründen Erwärmungs- oder Abkühlungsteilabläufe enthalten. Diese Vorgänge sind über längere Zeiträume nicht konstant, sondern schwanken um prozessabhängige Mittelwerte, die z. T. sehr hoch sein können. Gleichzeitig überlagern sich den Temperaturschwankungen zusätzlich mechanische Spannungen, die im ungünstigsten Fall schwingend auftreten können.



Zusätzlich können durch ungünstige Betriebsbedingungen korrosive Effekte auftreten. Dazu gehören u. a. ungeeignete Kombinationen von Werkstoffen und Prozessmedien wie z. B. verschiedene austenitische Stähle, die sich im Kontakt mit chlor- und chloridhaltigen Werkstoffen nicht korrosionsbeständig verhalten. Ähnliches gilt für die Kombination von Kupfer-Zink-Legierungen mit Ammoniak und vielen seiner Derivate.

Sich überlagernde Werkstoff-Medium-Kombinationen und mechanische Spannungen können zu Spannungs- bzw. Schwingungsrissskorrosion führen, deren Versagensfortschritt ausgehend von kleinsten Fehlstellen katastrophal schnell sein kann. Diese sonst evtl. vernachlässigbaren kleinen Unregelmäßigkeiten können also unter ungünstigen Betriebsbedingungen Ausgangspunkt für Versagensfälle sein.

Daher erscheint es vorteilhaft, neben einer systematischen, detaillierten Analyse der Betriebsbedingungen der Komponente gut oder idealerweise hochauflösende Monitoringmaßnahmen einzusetzen, um in der Lage zu sein, Fehlstellen sowohl frühzeitig als auch in exakter und reproduzierbarer Größe detektieren zu können.

1. Belastung von Wärmetauschern im Betrieb

Aufgrund der Vielzahl von (wärmetauschenden) Stoffen, Aggregatzuständen und Bauweisen erhebt dieser Abschnitt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

1.1 Temperaturgefälle

Chemische Prozesse beruhen in vielen Fällen auf der Erwärmung oder Abkühlung eines Produkts. Dabei erfolgt üblicherweise die Abkühlung des Produkts durch Abführung der Wärme an einen anderen Stoff, der dabei erwärmt wird; dieses Prinzip wird für die Erwärmung umgekehrt angewandt (Abb. 1) [3].

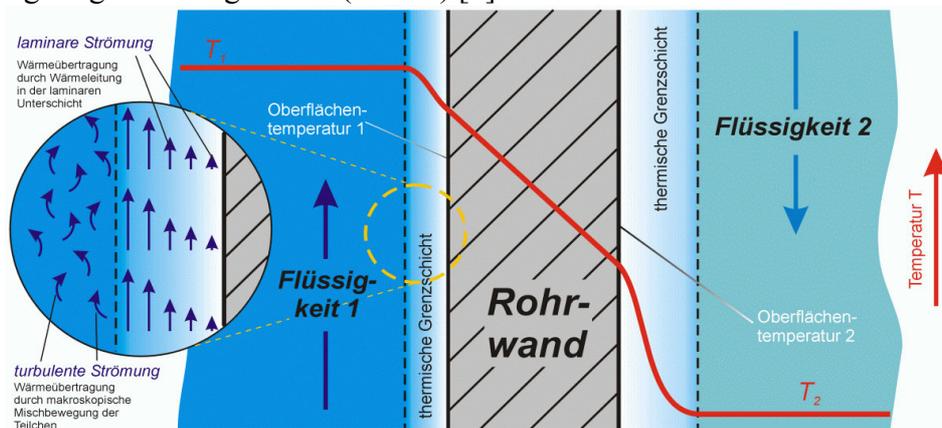


Abb. 1: Prinzip des Wärmeaustauschs bei geringen Fließgeschwindigkeiten im Gegenstromverfahren

Bei der indirekten Wärmeübertragung (also in Rekuperatoren) erfolgt der Wärmeaustausch in der Rohrwand durch Wärmeleitung. In der thermischen Grenzschicht der Flüssigkeiten zur Rohrwand findet der Wärmeaustausch aufgrund der quasi-laminaren Strömung ebenfalls durch Wärmeleitung statt. Die Angleichungsgeschwindigkeit hängt dabei von der Temperaturdifferenz der beiden Medien (in Abbildung 1 jeweils als Flüssigkeit angenommen, die im Gegenstromverfahren geführt werden), dem Rohrwandmaterial und der Führung der Fluidströme (Gegen-, Gleich- oder Kreuzstrom) ab [1].

Für den Wärmeübergang zwischen Rohroberfläche und Flüssigkeit ist eine turbulente Strömung günstig, was insbesondere bei hohen Fließgeschwindigkeiten erreicht wird. Durch hohe Geschwindigkeit steigt aber auch der Strömungswiderstand, so dass die durch

den verbesserten Wärmeübergang optimierte Effizienz des Wärmetauschers wieder gesenkt wird.

Wärmetauscher bestehen in den meisten Fällen aus Metall, jedoch auch aus Kunststoff, Glas oder Siliciumcarbid. In der Klimatechnik kommen vor allem Kupfer und Aluminium aufgrund ihrer guten Wärmeleitfähigkeiten zum Einsatz. Für den industriellen Einsatz werden vor allem Stahl und insbesondere Edelstahl genutzt, da die Beständigkeit der Materialien gegen die korrosiven Eigenschaften der Produkte benötigt wird. Kunststoff, Glas oder Siliciumcarbid werden in der chemischen Industrie für Wärmetauscher eingesetzt, wenn die chemische Aggressivität der Produkte den Einsatz metallischer Werkstoffe nicht erlaubt. Da sich die Wirbelstromprüfung nur für leitfähige Werkstoffe eignet, beschränkt sich ihr Einsatz auf die Prüfung von paramagnetischen und ferromagnetischen Wärmetauschern.

Die Bauformen sind mannigfaltig, konzentrieren sich jedoch im industriellen Einsatz meistens auf Geradrohr- und U-Rohrkühler (s. Abb. 2 und 3), wobei letztere trotz ihrer komplexeren Bauweise insbesondere in beengten Anlagen Anwendung finden [3].

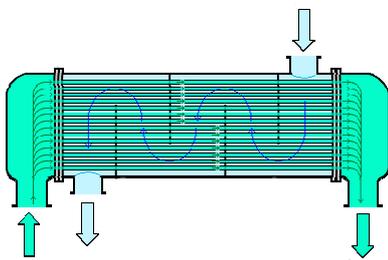


Abb. 2: Geradrohr-Wärmetauscher

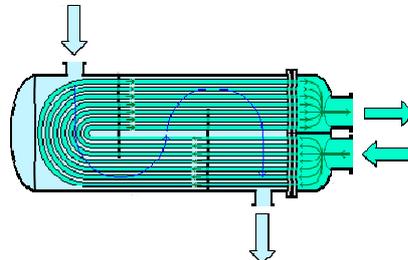


Abb. 3: U-Rohr-Wärmetauscher

1.2 Korrosion

Eine Schädigung von Wärmetauschern kann durch eine große Zahl von Faktoren ausgelöst werden. Als eine der Hauptursachen für die Beschädigung (und im schlimmsten Fall Leckage) eines Wärmetauschers kann die Korrosion angesehen werden.

Die DIN EN ISO 8044 beschreibt die Korrosion als „die Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion [...] führen kann.“ [4]. Die Norm definiert u. a. 37 Korrosionsarten, darunter Lochfraßkorrosion, Spannungsrisskorrosion und Erosionskorrosion (Abb. 4).

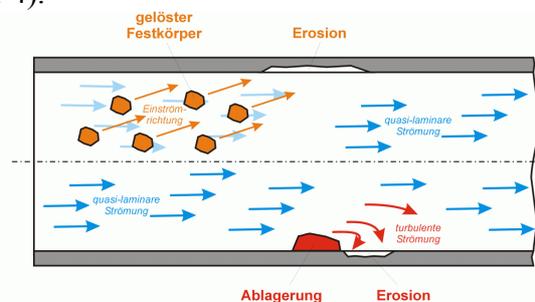


Abb. 4: Erosionseffekte in Fluiden

Lochfraßkorrosion entsteht vor allem bei passivierten Werkstoffen unter Vorhandensein eines Elektrolyten. Das Auftreten wird stark beeinflusst von hohen Temperaturen, niedrigem Elektrodenpotential des Werkstoffes sowie einem niedrigen pH-Wert des Elektrolyten, i. e. des Fluids, und einer geringen Sauerstoffkonzentration im Elektrolyt.

Für das Auftreten von Spannungsrisskorrosion ist die Erfüllung von drei Bedingungen notwendig: zum einen muss der Werkstoff empfindlich gegen Spannungsrisskorrosion sein. Außerdem müssen Zugspannungen in Form von Eigenspannungen oder extern aufgebracht Spannungen vorliegen. Darüber hinaus muss ein spezifisches Angriffsmittel vorhanden sein; dies sind bei austenitischen Stählen chloridhaltige Fluide und bei Kupfer-Zink-Legierungen u. a. Ammoniak, Amine, Nitrite oder Nitrate.

Die Erosionskorrosion ist nicht nur von den mechanischen Werkstoffeigenschaften abhängig, sondern auch von den Strömungsbedingungen, also Geschwindigkeit und Geometrie, sowie von eventuellen besonderen Stoffbedingungen (z. B. gelösten Festkörperpartikeln in Fluiden oder Tröpfchenbildung in Gasen), die zu abrasivem Abtrag führen können (Abb. 4 und 5) [4].



Abb. 5: verschiedene Schädigungsarten (Innenkorrosion, Dampferosion, Erosion)

2. Prüfplan für Wärmetauscher?

Da alle Anlagen u. a. einem betriebsbedingten Verschleiß unterliegen, der sowohl Produktivität als auch Betriebsbereitschaft reduzieren kann, implementieren viele Anlagenbetreiber Wartungs- und Instandhaltungssysteme. Diese sollen bei möglichst geringem Kostenaufwand gewährleisten, dass die Anlagen sicher und produktiv sind [5]. In vielen Fällen wird daher u. a. auf eine rechtzeitige Erkennung von Versagensgründen Wert gelegt. Wünschenswert ist es in diesem Zusammenhang, durch die Wartungs- und Instandhaltungssysteme qualitativ hochwertige Erkenntnisse zu gewinnen [5], die geeignet sind, durch rechtzeitige Instandhaltungsmaßnahmen die Lebenszeit der Objekte zu verlängern (Abb. 6). Hierfür werden häufig zerstörungsfreie Prüfungen eingesetzt, im Fall der hier betrachteten Wärmetauscher sehr oft die Wirbelstromprüfung.

Bei der Inbetriebnahme können Bauteile aufgrund von Konstruktions-, Werkstoffauswahl-, Fertigungs- und/oder Montagefehlern versagen. Insbesondere bei kritischen und/oder kostenintensiven Bauteilen ist dann eine „Nullprüfung“ ratsam, um den einwandfreien Zustand sicherzustellen und ggf. Garantieansprüche stellen zu können.

Über die weitere Lebenszeit können unterschiedliche Gründe, die aus den o.g. Gründen oder auch aus der Betriebsweise des Bauteils resultieren können, zum Versagen führen. Eine regelmäßige Überprüfung ist daher insbesondere bei sicherheits- oder betrieblich relevanten Bauteilen empfehlenswert. Die regelmäßige Prüfung von Wärmetauschern empfiehlt sich aus technischen Gründen wie:

- Kontrolle des Objektzustandes
- Kontrolle des Schädigungsfortschritts
- Vorbeugen von Leckagen
- Sicherstellung der Betriebssicherheit

Gegen Ende der zu erwartenden Betriebszeit führen dann häufig verschiedene Altersgründe, die schon in der Auslegung, Fertigung und Montage oder durch die spätere Betriebsweise forciert werden, zum Ausfall des Bauteils. Eine regelmäßige oder besser zustandsabhängige (= mit kritischer werdendem Zustand häufigere) Überprüfung mit geeigneten Instandhaltungsmaßnahmen kann zu einer deutlichen Verlängerung der Betriebszeit des Bauteils führen (Abb. 6) [2]. Dadurch lässt sich im Vergleich zur statischen Strategie

„kompletter Austausch der Baugruppe nach Erreichen der geplanten Lebensdauer“ eine Verringerung der Kosten bewirken.

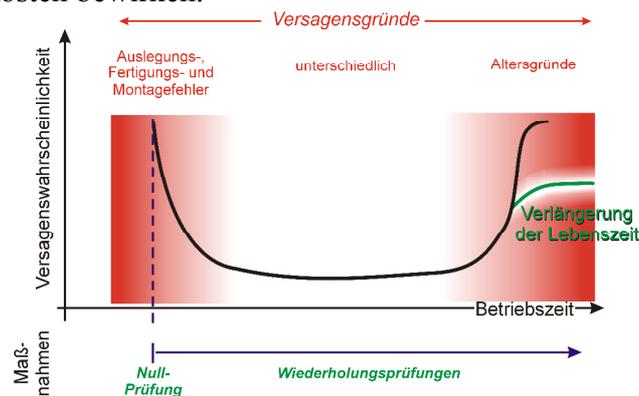


Abb. 6: Versagensgründe und –wahrscheinlichkeit im Verlauf der Betriebszeit [2]

Auch wirtschaftliche Aspekte spielen bei der Auslegung von Prüfplänen für Wärmetauscher eine Rolle, z. B.:

- Vermeidung von Produktionsausfällen und der damit verbundenen Kosten aufgrund unerwarteter Leckagen
- Reduktion getauschter Rohre auf die tatsächlich geschädigten Rohre und damit bei eigener Durchführung der Arbeiten
 - Kostenersparnis hins. der Rohrlagerung
 - Kostenersparnis hins. des vorgehaltenen Personals für die Reparaturarbeiten
 - geringere Ausfallzeiten des Wärmetauschers
- bzw. bei Vergabe der Arbeiten
 - Kostenersparnis durch reduziertes Auftragsvolumen
 - geringere Ausfallzeiten des Wärmetauschers
- Vermeidung verschenkter möglicher Betriebszeit durch a priori festgelegtes Austauschen zu einem vorherberechneten Zeitpunkt, obwohl die technisch tatsächlich mögliche Betriebsdauer noch nicht erreicht ist, und damit
 - Verlängerung der Komponentenlebenszeit ohne Erhöhung des Ausfallrisikos
 - Verringerung von Inspektionskosten

3. RBI – ein anderer Ansatz Prüfpläne zu erstellen

Das herkömmliche Konzept der gleichbleibenden Inspektionszyklen ist oben schon dahingehend erweitert worden, dass basierend auf dem sich verschlechternden Zustand die Inspektionszyklen verkürzt werden, um so der zunehmenden Wahrscheinlichkeit eines ungeplanten Stillstands aufgrund einer Leckage entgegen zu wirken [2]. Dadurch könnten in der Anfangsphase, in der das Bauteil nur wenige bzw. geringe Schädigungen aufweist, längere Überprüfungszyklen realisiert werden als in späteren Lebensabschnitten der Komponenten, in denen der Schädigungsgrad und damit die Versagenswahrscheinlichkeit zunimmt.

Die rein zeitbasierten Prüfpläne [2] basieren vielfach lediglich auf den Mindestanforderungen der gängigen Normblätter und Standards und berücksichtigen nicht die tatsächlichen Betriebsbedingungen mit all ihren Risiken und Konsequenzen. RBI bzw. Risk-Based-Inspection geht über diesen Ansatz deutlich hinaus und berücksichtigt im Rahmen von Risikoanalysen u. a. auch die tatsächlichen Betriebsbedingungen der Komponenten (Abb. 7). RBI mündet in der Entwicklung von Prüfplänen, die auf der Kenntnis sowohl der Versagenswahrscheinlichkeit („risk of failure“ RoF) als auch der Versagensfolgen („consequences of failure“ CoF) basieren [6].

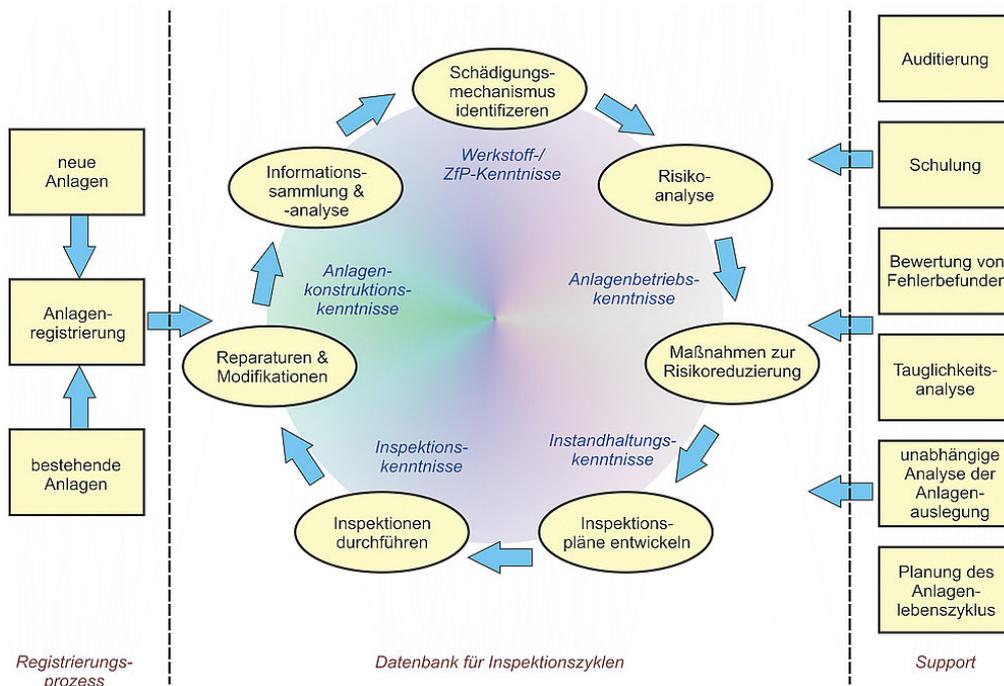


Abb. 9: Beispiel für einen RBI-Prozessablauf (nach [7])

Von Seiten der Prüfer sind dabei ZfP-Befunde zu liefern, die Aufschluss über lokale und daraus resultierend eine globale Schädigungsrate einer Komponente liefern. Dafür reicht das in anderen Fällen verwendbare Resultat „maximale Schädigung über der Rohrlänge“ nicht aus. Stattdessen muss das Prüfsystem in der Lage sein,

1. reproduzierbare Signale/Befunde
2. mit reproduzierbaren Bewertungen
3. an reproduzierbaren Rohrlängspositionen

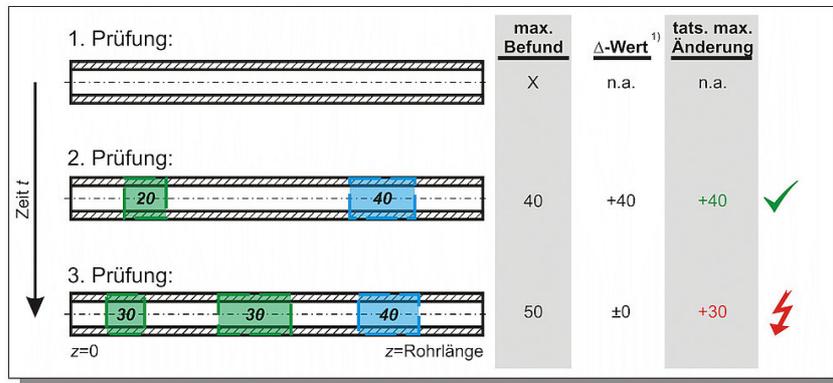
zu liefern. Obwohl die Wirbelstromprüfung „nur“ ein vergleichendes Prüfverfahren ist, ist die Reproduzierbarkeit der Signale unter korrekten Prüfbedingungen sehr hoch. Die Bewertungen sind jedoch in den meisten Fällen von der Leistungsfähigkeit des Prüfers abhängig. Daher sollten Signalaus- und -bewertungsalgorithmen in der Prüfsoftware eingesetzt werden, um die Abhängigkeit vom Prüfer zu minimieren und die Reproduzierbarkeit insbesondere über längere Prüfzyklen und für Wiederholungsprüfungen zu stärken [9], [10]. Wesentlicher Aspekt hierbei ist für eine korrekte Abschätzung der Schädigungsrate, dass die Position der Signale/Fehler über der Rohrlängsachse reproduzierbar und exakt erfasst wird, ohne die es evtl. zu schwerwiegenden Fehlabschätzungen des Schädigungsfortschritts kommen kann [2]. In den hier verwendeten Prüfsystemen werden seit Jahren bewährte Kombinationen von Signalanalyse- und Prüfpositionserfassungssystemen eingesetzt, die die o. g. Forderungen erfüllen [9].

4. Beispiele

Prüfpositionserfassungssysteme sind im Fall von wiederkehrenden Prüfungen (WKP) nahezu obligatorisch, da nur eine hohe lokale Auflösung der Signale bzw. Befunde eine exakte Ermittlung einer Schädigungsrate ermöglicht [9].

Abbildung 10 zeigt ein Beispiel für die Fehldeutbarkeit von Ergebnissen, wenn Signale ohne lokale Positionsauflösung bewertet werden. Dort ist ersichtlich, dass mehrere Aspekte zu einer Fehlbewertung für das gesamte Rohr führen können, wenn nur der maximale Befund als Gesamtwertung benutzt wird: zum einen ändert sich der Maximalbefund zwischen

zweiter und dritter Prüfung gar nicht, zum anderen verschlechtert sich der kleinere Fehler um 10% (was nicht im Gesamtergebnis reflektiert werden würde). Zum dritten ist im Zeitraum zwischen der zweiten und dritten Prüfung ein weiterer Fehler entstanden (30%), dessen Wachstumsgeschwindigkeit ebenfalls nicht im Gesamtergebnis reflektiert werden würde (Abb. 10).



1) Δ -Wert = max. Befund_{neue Prüfung} - max. Befund_{frühere Prüfung}

Abb. 10: Beispiel für die Fehldeutbarkeit von Ergebnissen, die auf exakten z-Positionsdaten basieren und solchen die nicht z-basiert sind

In der verwendeten Dokumentationspraxis liefert eine z-basierte Darstellung, wie in Abbildung 11 gezeigt, detaillierte Werte für lokale Schädigungsfortschrittsraten und liefert damit für den RBI-Prozess wichtige Informationen für die Bestimmung der Risikokennwerte und damit die Erstellung von Inspektionsplänen.

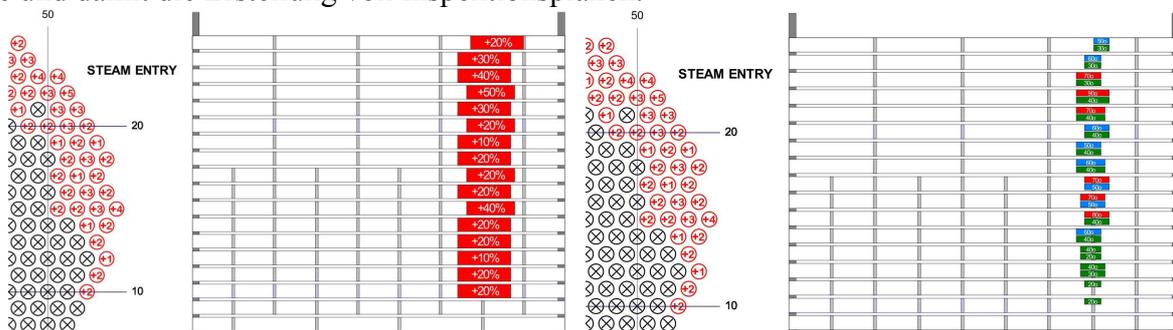


Abb. 11: Beispiele für die Darstellung von hinsichtlich der z-Adresse orts aufgelösten Signalbefunden in einfacher (links) und detaillierter (rechts) Schädigungsrate-Darstellung

5. Zusammenfassung

Aufgrund der oftmals hohen Belastung von chemischen Apparaten und Energiegewinnungsanlagen erscheint ein detailliertes und regelmäßiges Monitoring hinsichtlich neuer bzw. dem Wachsen von bestehenden Fehlstellen sinnvoll, um einem ungeplanten Versagen der Komponenten und damit hohen Material- und Ausfallkosten sowie Schäden an Personen, Material und Umwelt vorzubeugen.

Aufgrund der komplexen Betriebsbedingungen der Anlagen und Einzelkomponenten ist eine pauschale Herangehensweise nicht empfehlenswert. Es hat sich im Verlauf der Jahre ein vielschichtiges Strategiesystem entwickelt, das unter dem Begriff *Risk and Reliability Management (RRM)* bekannt ist. In dessen Rahmen ist die *Risk-Based-Inspection RBI* ein Werkzeug, um Inspektionspläne zu entwickeln, die u. a. auf der Kenntnis der Versagenswahrscheinlichkeit beruhen.

Für diesen umfangreichen Prozess wurde gezeigt, dass Inspektionsleistungen einen kleinen, aber wichtigen Anteil am RBI-Prozess erbringen. Für ein optimales Ergebnis ist es notwendig, dass im Rahmen von RoF- und CoF-Analysen sorgfältige und umfangreiche Anlagenanalysen durchgeführt werden. An diesen Analysen sollten zahlreiche Betriebsbereiche sowie die zerstörungsfreie Prüfung, hier im Beispiel der Wärmetauscher die Wirbelstromprüfung, beteiligt sein. Dabei ist insbesondere zu beachten, dass es für eine ideale Unterstützung des RBI-Prozesses wichtig ist, dass die ZfP detaillierte, reproduzierbare und hoch orts aufgelöste Prüfergebnisse zu liefern vermag, wie es die hier verwendete Wirbelstromprüfung seit Jahren leistet.

Referenzen

- [1] Marcus Reppich: Instandsetzung von Wärmeübertragern – Schadensursachen, Schadenserkennung, Behebung, Vorbeugung; PP Publico Publications; 2003; ISBN 3-934736-09-2
- [2] Bernd Heutling, Werner Sievert, Ulrich von Behr: Just-in-Time-Prüfung mit induktiven Prüfverfahren - Eine Betrachtung von Kosten und Nutzen; DACH-Tagung 2008
- [3] Heribert Stroppe, Karlheinz Schiebold: Wirbelstrom-Materialprüfung; Castell-Verlag; 2011; ISBN 978-3-934255-49-4; 2011
- [4] DIN EN ISO 8044 - Korrosion von Metallen und Legierungen - Grundbegriffe und Definitionen; 1999
- [5] John Reynolds: 101 essential Elements in Pressure Equipment Integrity Program For the Hydrocarbon Process Industry; API Inspector Summit, Galveston (Texas); 2009
- [6] Ramesh J. Patel: Risk Based Inspection; 3rd MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition - 27-30 Nov 2005 Manama, Bahrain
- [7] Bernhard O. Herzog, Paul Jackson: The ladder to success - Risk-based inspection reduces costs; ABB Review 1/2009
- [8] A. Jovanovic, R. Kauer, M. Renner: The Story of RIMAP; Seminar Standardisation in Research and Innovation “Practical tools for the dissemination and implementation of research results”; 2011; Brüssel
- [9] B. Heutling: Automatische Signalauswertung bei der Prüfung paramagnetischer und ferromagnetischer Wärmetauscher; 9. DeltaTest-Fachtagungs-Beitragsband; 2008
- [10] P. Hünies, P., B. Heutling: Automatische Klassifizierung von Signalen bei der Wirbelstromprüfung von ferromagnetischen Wärmetauschern; DGZfP-Berichtsband; DGZfP-Jahrestagung; Münster; 2009
- [11] Alvarado, Greg: Risk Based Inspections – Setting Risks Targets; Inspectioneering Journal, July/August 2012
- [12] API Recommended Practice 580 – Risk-based Inspection; American Petroleum Institute; First Edition, May 2002