

# Wärmetauscherrohrprüfung mit Wirbelstrom - Von der Praxis zur Norm

Gerhard SCHEER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TMT Test- und Maschinentechnik GmbH, Schwarmstedt

Kontakt E-Mail: gerhard.scheer@eddymax.com

**Kurzfassung.** Der Autor ist der Leiter der Arbeitsgruppe Rohrrinnenprüfung im Fachausschuss Wirbelstromprüfung der DGZfP

Rohrwärmetauscher werden in vielen industriellen Bereichen für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt. Während in Kraftwerken hauptsächlich die Umsetzung von Wärme in elektrische Energie stattfindet, werden in der Chemie und Petrochemie Rohrwärmetauscher für unterschiedlichste Prozesse eingesetzt. Die regelmäßige Prüfung der Wärmetauscherberohrung soll zum einen den ordnungsgemäßen Betrieb sicherstellen. Zum anderen spielen auch Umweltaspekte eine Rolle, da solche Wärmetauscher häufig auch einen Austritt von schädlichen Medien in die Umwelt verhindern müssen. Die Prüfung dieser Wärmetauscher erfolgt typischerweise mit Wirbelstromverfahren. Es hat sich im Laufe der Jahre ein Quasistandard etabliert, der in den 1970er Jahren auf Basis der inzwischen zurückgezogenen Norm DIN 54141 entstanden ist und sich weiterentwickelt hat. Aktuell arbeitet seit einigen Jahren eine Arbeitsgruppe im Fachausschuss Wirbelstrom der DGZfP daran, eine neue Norm auf Basis der aktuellen Vorgehensweise, der eingesetzten Prüftechnik und den aktuell gültigen Regeln im Bereich der Wirbelstromprüfung zu erstellen. Der Beitrag stellt die Ausgangssituation, die Umsetzung und den aktuellen Stand dar.

## Einführung

Im Juni 2018 wurde mit der ersten Sitzung die Arbeit der Arbeitsgruppe Rohrrinnenprüfung begonnen. Als Hauptziel wurde die Erstellung eines Standards zur Rohrrinnenprüfung mit dem Wirbelstromverfahren definiert. Hauptmotivation war die Tatsache, dass die Wirbelstromprüfung von Wärmetauscherberohrungen zwar ein anerkanntes Verfahren ist, es aber keine allgemeingültige Richtlinie gibt, nach der diese Prüfungen durchgeführt werden. Daher existiert eine gewisse Verunsicherung über die Art und Weise der Ausführung dieser Prüfung. Hier werden nun die Entstehung des aktuellen Quasistandards in der Prüfpraxis, die drei hauptsächlichsten Prüftechniken, die Arbeit der Arbeitsgruppe und der aktuelle Stand des Vorhabens beschrieben.



## 1. Etablierte Prüfpraxis

### 1.1 Dampferzeugerrohrprüfung

Am Beginn der Wirbelstrom-Wärmetauscherrohrprüfung mit Innendurchlaufensensoren stand die Prüfung der Rohre von Dampferzeugern in Nuklearkraftwerken. Diese Rohre stellen bei Druckreaktoren einen Teil der Barriere zwischen nuklearem und konventionellem Kraftwerksbereich dar und werden als kritisch betrachtet. Daher entstanden in diesem Bereich Standards zur Durchführung einer solchen Prüfung: ASME BPVC Section V, Article 8 und DIN 25435-6: Wirbelstromprüfung von Dampferzeuger-Heizrohren. In beiden Standards stehen die bei der Dampferzeugerberohrung eingesetzten Werkstoffe und die dort auftretenden Schädigungen auf der Außenseite der Rohre im Vordergrund. Bei Recherchen zu diesem Thema findet man diverse Veröffentlichungen von C.V. Dodd, u.a. [1].

### 1.2 Prüfung von Kondensatorrohren

Beim Betrieb der Kraftwerke trat verstärkt eine weitere Problematik auf: Die zu der Zeit gern genutzte Kühlung mit Flusswasser führte in den Kondensatorrohren aus Sondermessing zu teilweise starker Korrosion an der Innenseite der Rohrwand. Auch diese Rohre begann man mit Wirbelstrominnendurchlaufensensoren zu prüfen. Die Prüffrequenzen wurden angepasst und man konnte die Lochfraßkorrosion nachweisen. Anfang der 1980er wurde die Norm DIN 54141 [1] für die Rohrfertigung veröffentlicht, die u.a. allgemein eine Phasenauswertung der Wirbelstromsignalschleifen bezogen auf ein Referenzsignal statt auf die horizontale Achse beschreibt. Ebenso wie bei den Außenschäden an Dampferzeugerrohren kann bei Innenschäden ebenfalls eine Phasenauswertung zur Fehlertiefenbestimmung eingesetzt werden. Allerdings war es hier vorteilhaft, die Signaldarstellung auf dem Oszilloskop so zu wählen, dass der eher kleine Innenfehlerbereich vertikal angezeigt wird. Zusammen mit der auf Oszilloskopen möglichen unterschiedlichen Empfindlichkeitseinstellung der horizontalen und der vertikalen Achse ergab sich dadurch beispielsweise eine Möglichkeit, den eher kleinen Innenfehlerbereich vertikal einzustellen und von ca. 30° auf ca. 60° aufzuspreizen. Als Bezug wurde das Signal einer Durchgangsbohrung gewählt. Damit haben Schäden auf der Rohrinenseite negative Phasenverschiebungswinkel und Schäden auf der Außenseite positive Phasenverschiebungswinkel.

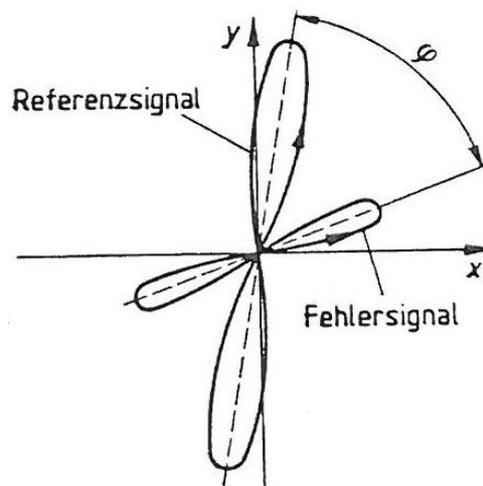


Abb. 1 Bestimmung des Phasenverschiebungswinkels  $\varphi$  nach DIN 54141-1:1982 [2]

Gleichzeitig erarbeiteten kanadische Forscher (V.S. Cecco, G. van Drunen und F.L. Sharp) eine praktische Formel [3], mit der aus der Wanddicke, der Leitfähigkeit und der Permeabilität der zu prüfenden Rohre eine Prüffrequenz berechnet werden kann, bei der sowohl Innen- als auch Außenschäden gut dargestellt werden. Bei dieser Frequenz beträgt der Phasenverschiebungswinkel zwischen Innen- und Außenschäden geringer Tiefe ca. 90°. Daher der Name  $f_{90}$ -Frequenz. Je nach weiteren Rahmenbedingungen sollte die erste Prüffrequenz zwischen der  $f_{90}$ -Frequenz und der ca. 2-fachen  $F_{90}$ -Frequenz gewählt werden.

$$\{f_{90}\}_{kHz} = \frac{300}{\{\sigma\}_{MS/m} \cdot \{\mu_r\} \cdot \{S^2\}_{mm^2}}$$

- $f_{90}$  Frequenz, bei der sich eine Phasenverschiebung von 90° zwischen Innen- und Außenfehlern ergibt
- $\sigma$  elektrische Leitfähigkeit
- $\mu_r$  relative magnetische Permeabilität
- $S$  Rohrwanddicke

**Formel 1** Bestimmung der  $f_{90}$ -Frequenz

### 1.3 Prüfung von Rohren aus nicht ferromagnetischen Werkstoffen

Wärmetauscher werden in sehr unterschiedlichen Bereichen eingesetzt. Und so erweiterte sich das Einsatzgebiet der Wirbelstromprüfung auch auf Bereiche außerhalb der Nuklearkraftwerke. Zunächst kamen konventionelle Kraftwerke und dann chemische Anlagen dazu, in denen Wärmetauscher in unterschiedlichsten Prozessen eingesetzt werden. Ebenfalls erweiterte sich der Bereich der eingesetzten Werkstoffe. Das zur Prüfung der Kondensatorrohre eingesetzte Verfahren wurde und wird seither zur Prüfung aller gängigen nicht ferromagnetischen Rohre eingesetzt.

### 1.4 Prüfung von Stahlrohren (Rohre aus ferromagnetischen Werkstoffen)

Neben den Rohren aus nicht ferromagnetischen Werkstoffen werden im Wärmetauscherbau auch Rohre aus ferromagnetischen Werkstoffen wie Kohlenstoffstählen und legierten Stählen eingesetzt. Als erstes ist hier die Eindringtiefe der Wirbelströme sehr gering. Zweitens ist die Permeabilität nicht konstant und stark beeinflusst von den inneren Spannungen im Gefüge, wodurch ein nicht unerheblicher Störpegel erzeugt wird. In der Fertigungsprüfung setzt man sehr kräftige umfassende Magnetjoch ein, um die zu prüfenden Rohrabschnitte bis in den Bereich der Sättigung zu magnetisieren. Damit lassen sich auch ferromagnetische Rohre entsprechend den gängigen Regeln in der Fertigung prüfen. Bei der Rohrrinnenprüfung ist dies nicht möglich, da im Rohr nicht genügend Platz für eine entsprechende Magnetisierungseinrichtung vorhanden ist. Dennoch wurde Ende der 1970er Jahre mit Innendurchlaufensensoren, welche zusätzlich einen Elektromagneten zur Längsmagnetisierung des zu prüfenden Rohrabschnittes enthielten, experimentiert. Werner Kelb fand heraus, dass sich durch diese Vormagnetisierung nicht nur die Störeinflüsse durch Permeabilitätsschwankungen reduzieren lassen, sondern auch mit hoher Empfindlichkeit lokale Schäden auf der Rohraußenseite nachzuweisen sind. Auf dieses Verfahren wurde ihm 1981 ein Patent erteilt [4]. Die Bestimmung der Fehlertiefe ist allerdings nur dann gut möglich, wenn die Geometrie der Schädigungen bekannt ist, da nur die vom Fehlvolumen abhängige Amplitude der Wirbelstromsignale ausgewertet werden kann.

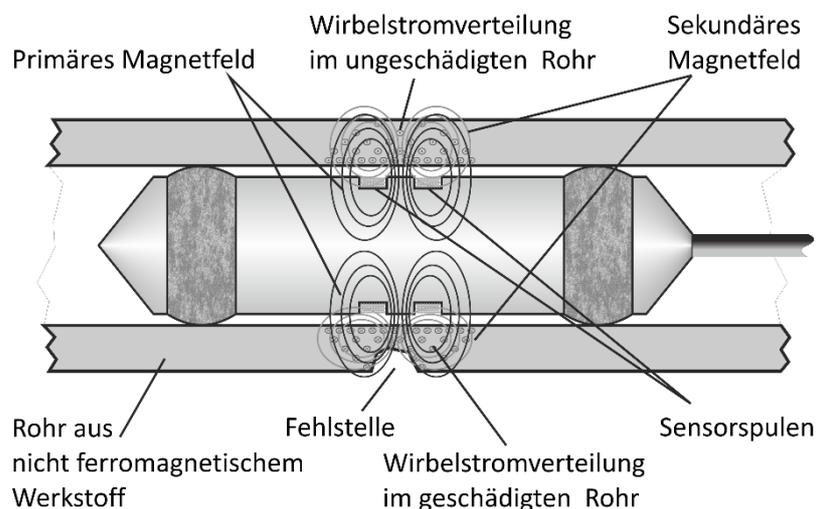
## 1.5 Fernfeldverfahren zur Prüfung von Rohren aus ferromagnetischen Werkstoffen

Als weiteres Verfahren zur Prüfung ferromagnetischer Rohre mit Innendurchlaufensensoren steht das Fernfeldverfahren (Remote Field Eddy Current Technique) zur Verfügung. Die ersten Anwendungen fand das Verfahren in den 1960er Jahren im Ölfeld bei der Prüfung von Förderrohren. In den 1980er Jahren wurde die Technik dann mit der Verfügbarkeit von verbesserten einstellbaren Stromgeneratoren und empfindlicheren Signalverstärkern auch für die Prüfung anderer Rohrdimensionen interessant. Es wurden zu dieser Zeit weltweit viele Untersuchungen zum Verständnis dieser Technik durchgeführt, u.a. von D.L. Atherton, T.R. Schmidt [5] und H. Ostermeyer [6].

## 2. Funktionsweise der vorgestellten Techniken

### 2.1 Prüfung von Rohren aus nicht ferromagnetischen Werkstoffen

Für die Prüfung nichtferromagnetischer Rohre werden Innendurchlaufensensoren eingesetzt, die den Innenraum des Rohres möglichst optimal ausfüllen sollen. Abbildung 2 zeigt



**Abb. 2** Funktionsprinzip am Beispiel eines Innendurchlaufensensors

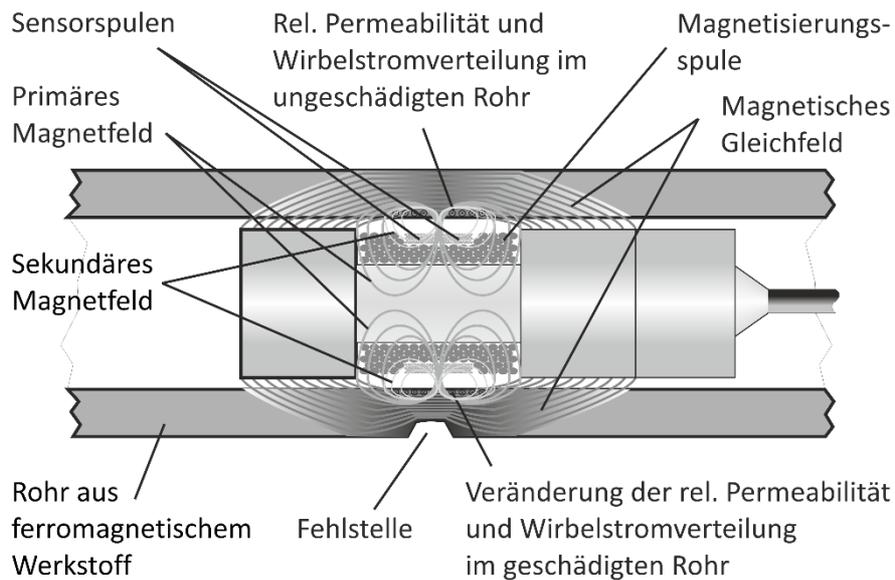
schematisch den Aufbau eines solchen Wirbelstromsensors. Der Sensor besteht aus einer oder mehreren Spulen, die umlaufend um den Sensorkörper gewickelt sind.

Das Funktionsprinzip basiert dabei auf der klassischen Wirbelstromprüfung: Eine von einem Wechselstrom durchflossene Spule erzeugt ein primäres magnetisches Wechselfeld. Durch das primäre magnetische Wechselfeld werden im leitenden Werkstoff der Rohrwand Wirbelströme induziert. Die Wirbelströme in der Rohrwand erzeugen ein sekundäres magnetisches Wechselfeld, das in dem Spulensystem des Sensors eine elektrische Wechselspannung induziert.

Inhomogenitäten der Rohrwand wie Wanddickenänderungen, Risse, Korrosion oder eine Änderung der elektrischen Leitfähigkeit oder magnetischen Permeabilität bewirken Veränderungen der Wirbelstromverteilung in der Rohrwand. Dadurch ändern sich auch das sekundäre magnetische Wechselfeld und die im Spulensystem des Sensors induzierte Wechselspannung. Die Änderung der induzierten Wechselspannung in Betrag und Phase wird am Prüfgerät als Vektor in der X-Y-Ebene dargestellt.

## 2.2 Prüfung von Rohren aus ferromagnetischen Werkstoffen - Methode mit Gleichfeldvormagnetisierung

Das Wirbelstromprüfverfahren mit Gleichfeldvormagnetisierung eignet sich zur Prüfung von Rohren aus ferromagnetischen Werkstoffen, bei denen durch die hohe Permeabilität die Eindringtiefe der Wirbelströme stark verringert ist. Außerdem erzeugen in diesen Werkstoffen Inhomogenitäten durch die unterschiedliche magnetische Ausrichtung der sogenannten „Weiss'schen Bezirke“ ein hohes Störsignal. Zur Verringerung dieser Einflüsse wird mit einer den Sensor ergänzenden Magnetisierungsspule ein magnetisches Gleichfeld in der Rohrwand erzeugt, wie Abbildung 3 schematisch verdeutlicht. Dieses Gleichfeld homogenisiert zum einen die magnetischen Effekte, die zu starken Störsignalen führen, und reduziert gleichzeitig die relative Permeabilität in der Rohrwand.



**Abb. 3** Prinzip der Prüfung mit Gleichfeldvormagnetisierung

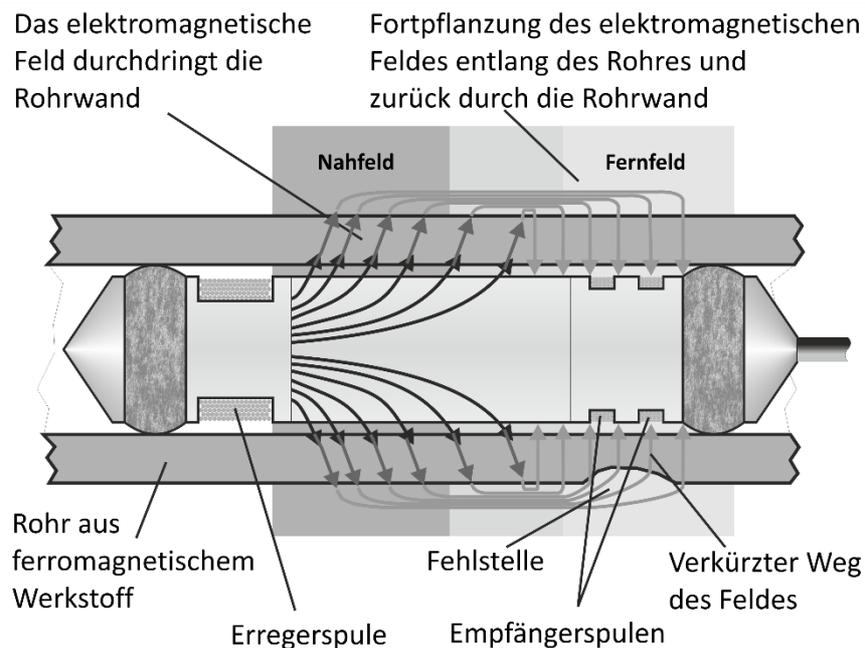
Ist der Querschnitt der Rohrwand durch einen Fehler verringert, kommt es an der Fehlstelle zu einer Kompression der Feldlinien, also zu einer Erhöhung der Flussdichte und damit zu einer Veränderung der relativen Permeabilität in diesem Bereich. Diese kann an der Rohrinnenoberfläche mit dem Wirbelstromfeld mittels einer Änderung der Signalamplitude detektiert werden. Somit ist es mit dieser Methode möglich, Fehler an der Rohraußen- und Rohrinnenseite nachzuweisen, wobei besonders gut pittingartige Korrosion detektiert werden kann.

Bei der Anwendung des Verfahrens muss beachtet werden, dass eine ausreichend große Gleichfeldstärke erzeugt werden muss. Dies kann bei Rohren mit kleinen Durchmessern und relativ großen Wanddicken nicht erreicht werden, da der für die Magnetisierungsspule zur Verfügung stehende Raum begrenzt ist.

Weitere Einschränkungen des Verfahrens bestehen dahingehend, dass die Phasenauswertung zur Bestimmung der Fehlertiefe bei dieser Methode nicht anwendbar ist und somit für eine Fehlertiefenbewertung die Form und Ausdehnung der Schäden bekannt sein muss, um mit gleichartigen Vergleichsfehlern eine Amplituden-Fehlertiefen-Auswertekennlinie erstellen zu können.

### 2.3 Prüfung von Rohren aus ferromagnetischen Werkstoffen - Fernfeldmethode

Die Fernfeldmethode ist ein weiteres Wirbelstromverfahren, welches üblicherweise zur Prüfung von Rohren aus ferromagnetischen Werkstoffen eingesetzt wird, welches hierbei besonders gut für die Detektion großvolumiger Fehler sowie gleichmäßiger Rohrwandausdünnung geeignet ist. Diese Technik ist auch an dickwandigen, nichtferromagnetischen Rohren nutzbar. Im Gegensatz zum in 2.2 beschriebenen Wirbelstromverfahren mit überlagerter Gleichfeldmagnetisierung ist bei der Fernfeldmethode die Anwendbarkeit der Phasenauswertung zur Fehlertiefenbestimmung möglich.



**Abb. 4** Wirkprinzip des Fernfeldverfahrens

Abbildung 4 zeigt das Wirkprinzip des Wirbelstrom-Fernfeld-Verfahrens. Die Erregerspule wird typischerweise mit einem niederfrequenten Wechselstrom im Bereich von 80 Hz ... 1000 Hz betrieben. Das erzeugte elektromagnetische Wechselfeld durchdringt zum Teil die Rohrwand nach außen, pflanzt sich dort entlang des Rohres fort und durchdringt die Rohrwand wiederum zum Teil zurück ins Rohrinnere. Gleichzeitig schwächt sich das von der Erregerspule erzeugte Primärfeld innerhalb des Rohres immer weiter ab und ist ab einem gewissen Abstand von der Erregerspule (ca.  $2,5 \times$  Rohraußendurchmesser) nicht mehr wirksam. Somit ist in diesem, Fernfeld genannten Bereich nur noch der Anteil des Feldes wirksam, der die Rohrwand zweifach durchdrungen hat. In diesem Bereich werden die Empfängerspulen an der Innenseite des Rohres platziert. In Abhängigkeit der Rohrwanddicke verändert sich die Phasenlage entsprechend der Laufzeit der Signale, so dass diese zur Bestimmung der Fehlertiefe genutzt werden kann.

Allerdings kann nicht unterschieden werden, ob sich die Wanddickenminderung an der Rohrinnen- oder Rohraußenseite befindet. Eine weitere Einschränkung ist, dass durch die geringe Prüffrequenz die Wirbelstromdichte und damit das Nachweisvermögen für Fehler mit kleinem Volumen wesentlich geringer als bei den anderen beschriebenen Verfahren.

### 3. Arbeitsgruppe Rohrrinnenprüfung

Die Mitglieder der Arbeitsgruppe kommen aus unterschiedlichen Bereichen. Es sind Prüfdienstleister, Gerätehersteller, Anlagenbetreiber und die BAM vertreten. Zunächst wurde die grundsätzliche Vorgehensweise diskutiert und eine Recherche in existierenden Normen und Regelwerken im Bereich Wirbelstromprüfung an Rohren durchgeführt. Die Mehrzahl der Richtlinien bezieht sich auf die Prüfung der Rohre in der Fertigung mit Außendurchlaufensensoren. Einige wenige beschreiben in speziellen Anwendungen die Prüfung mit Innendurchlaufspulen. Diese lassen sich aber nicht allgemeingültig anwenden. Auf die Durchführung von Innenprüfungen an eingebauten nicht ferromagnetischen Rohren bezogen existieren aktuell nur 2 Standards, ASME BPVC Section V, Article 8, aktuell etwas allgemeiner gehalten, und DIN 25435-6, explizit bezogen auf die Prüfung von Dampferzeugerrohren. Für die Prüfung mit dem Fernfeldverfahren existiert die ASTM Standard Practice E 2096. Für die Prüfung von Rohren mit überlagertem magnetischem Gleichfeld gibt es bis heute keinen veröffentlichten Standard, sondern nur die aktuelle Prüfpraxis der Dienstleister, die dieses Verfahren anwenden.

Es wurde daraufhin entschieden, einen 4-teiligen Normvorschlag zu erstellen, der neben einem allgemeinen Teil drei weitere Teile entsprechend den drei unterschiedlichen physikalischen Verfahren enthalten soll (Tabelle 1). Die grundlegenden Normen zur Durchführung von Wirbelstromprüfungen (DIN EN ISO 15549 und 12718), Personalqualifizierung (DIN EN ISO 9712) und Geräteüberprüfung (DIN EN ISO 15548 Teil 3) stellen die Basis dar. Außerdem muss beachtet werden, dass der neu entstehende Normvorschlag nicht im Widerspruch zu bereits bestehenden Normen und Richtlinien steht.

**Tabelle 1.** Tabelle zur Wahl der Prüfmethode

Werkstoff		Anwendbare Prüfmethode	Normenteil
<b>nicht ferromagnetisch</b>			
Lochfraß Schwingungsschäden Mechanische Schäden Risse (eingeschränkt) Erosion Ausdünnung, großflächig	Konventionelle Wirbelstromprüfmethode	Teil 2: Rohre aus nicht ferromagnetischen Werkstoffen	
	Differenzverfahren		
	Absolutverfahren		
<b>ferromagnetisch</b>			
Lochfraß, kleinvolumig Schwingungsschäden Mechanische Schäden Risse (eingeschränkt)	Wirbelstromprüfmethode mit Gleichfeldvormagnetisierung	Teil 3: Rohre aus ferromagnetischen Werkstoffen – Methode mit Gleichfeldvormagnetisierung	
	Differenzverfahren		
Erosion Ausdünnung, großflächig Lochfraß, großvolumig Schwingungsschäden Mechanische Schäden Risse (eingeschränkt)	Wirbelstrom Fernfeldprüfmethode	Teil 4: Rohre aus ferromagnetischen Werkstoffen – Fernfeldmethode	
	Absolutverfahren		
	Differenzverfahren		

In der Folge entstanden bereits der allgemeine Teil 1 sowie der Teil 2 des Normvorschlags für die Prüfung von Wärmetauscherberührungen aus nicht ferromagnetischen Werkstoffen. Diese Vorschläge für die ersten 2 Teile wurden beim DIN als Normungsantrag eingereicht und als Norm-Projekt angenommen.

#### **4. Aktueller Stand der Arbeiten**

Das Norm-Projekt DIN 54018 Teil 1 und 2 ist aktuell noch beim DIN in der Bearbeitung und wird voraussichtlich im Frühjahr 2023 im Norm-Entwurfs-Portal veröffentlicht. Die Arbeitsgruppe arbeitet an den Teilen 3 und 4, beide Teile für Rohre aus ferromagnetischen Werkstoffen, um diese dann ebenfalls beim DIN einzureichen.

#### **Referenzen**

- [1] Improved Eddy-Current Inspection for Steam Generator Tubing  
C.V. Dodd and J.R. Pate  
Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, 1990
- [2] Eddy Current Testing Manual on Eddy Current Method  
Volume 1, V.S. Cecco, G. van Drunen and F.L. Sharp  
Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario, November 1981
- [3] DIN 54141-1:1982
- [4] Patentschrift DE2949828A1, Juni 1981
- [5] Remote field eddy current for examination of ferromagnetic tubes  
Mackintosh, D.D.; Russell, D.E.; Atherton, D.L.; Schmidt, T.R.  
Materials Evaluation, Vol. 54, Issue 6, June 1996
- [6] Methodische Entwicklung von Fernfeld-Wirbelstromsonden zur Prüfung ferromagnetischer Stahlrohre  
Henner Ostermeyer 1997