

Niederfrequente Wirbelstrom-Arrays mit Videotakt

Gerhard MOOK¹, Peter ROST², Fritz MICHEL¹, Jouri SIMONIN¹

¹ Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, www.ovgu.de/iwzfzp

² BASF SE, GTM/AA-L443, 67056 Ludwigshafen

Kurzfassung. Zur schnellen Bildgewinnung wurden Wirbelstromarrays mit einer Bildwiederholfrequenz von 25 Bildern pro Sekunde entwickelt. Niedrige Prüffrequenzen und Ferritkernspulen erlauben den Blick unter die Oberfläche. Die gesamte Messelektronik wurde so weit miniaturisiert, dass sie im Sensorgehäuse Platz findet.

Zur ortsrichtigen Darstellung bei der manuellen Prüfung größerer Prüfbereiche mittels 2D-Array wurde ein Positionsgeber in den Sensorkopf integriert, der darüber hinaus die Bildverbesserung per MicroScannings ermöglicht.

Für die bildgebende Innenprüfung von Wärmetauscherrohren wurde ein mehrkanaliges System entwickelt, das direkt am USB-Port eines Laptops betrieben wird und seine Signale digital über 30 Meter Schubschlauch überträgt. Erste Ergebnisse werden vorgestellt.

1. Ebenes 2D-Array

1.1 Grundgedanken

Die manuelle bildgebende Wirbelstromprüfung setzt schnelle Bildfolgen voraus, um größere Prüfbereiche effizient abzutasten. Für die Randschichtprüfung bieten sich Sensorarrays auf der Grundlage von Ferritkernspulen an, wie sie in [1] der vorliegenden Berichte-CD beschrieben werden. Die Anzahl der Sensoren sowie die Signalbildungszeit pro Sensor bestimmen die Bildwiederholfrequenz. Die Signalbildungszeit wiederum ist eine Funktion der Sensorgröße und des gewünschten Signal-Rausch-Verhältnisses. Für eine hohe Ortsauflösung werden viele kleine Sensoren benötigt, die bei schneller Abfrage nur ein geringes Signal-Rausch-Verhältnis liefern.

Die Anforderungen an das Signal-Rausch-Verhältnis sinken jedoch bei bewegten Bildern. Ist die Bildwiederholfrequenz so hoch, dass das Auge fließende Bewegungen wahrnimmt, toleriert es Rauschen problemlos. Man denke an die unterschiedlichen Anforderungen an Fotos und Filmbilder.

Führt man eine „Wirbelstrom-Videokamera“ über den Prüfbereich, so sollte ein ruhendes Bild erscheinen, da sich die Materialeigenschaften nicht ändern. Taucht eine Fehlstelle auf, so bewegt sie sich durch das Bild, was der Mensch trotz Hintergrundrauschen unschwer bemerkt.

Im Folgenden wird ein Array aus 60 Ferritkernspulen mit 1 mm Kerndurchmesser vorgestellt. Es beherrscht sowohl den Einzelsensor- als auch den Halbtransmissionsbetrieb

[2] und besitzt eine Abbildungsfläche von ca. $14 \times 12 \text{ mm}^2$. Da es sich um ein starres Array handelt, liegt es nur auf ebenen bzw. leicht gekrümmten Oberflächen abhebbar auf.

Zur Bilddarstellung auf dem Bildschirm eines Notebooks wird diese Fläche etwa im Originalmaßstab abgebildet. Um größere Flächen abzutasten, müssen die entstehenden Bilder ortsrichtig zusammengefügt werden. Dazu wird ein Positionssensor benötigt, der unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit hinreichend genau ist.

1.2 Positionssensor

Bewegt sich das Array pro Bildtakt um weniger als eine Arraybreite vorwärts, überlagern sich aufeinanderfolgende Bilder. Um sichtbare Bildstörungen zu vermeiden und auch die Idee des MicroScannings umzusetzen [3], sollte der Positionssensor eine Ortsauflösung von einem Zehntel des Sensorabstandes besitzen, in unserem Falle also $0,1 \text{ mm}$. Die Genauigkeit der Wegmessung über einige Zentimeter hinweg wirkt sich in der geometrierichtigen Darstellung visualisierter Fehlstellen aus. Hier sind unter Umständen Kompromisse zulässig.

Aus der Vielzahl der möglichen Verfahren der Positionsbestimmung eines handgeführten Sensors scheiden die meisten allein wegen ihrer Unhandlichkeit aus. Seilzüge bedeuten Einschränkungen hinsichtlich der Oberflächenkrümmung und setzen Befestigungspunkte voraus. Rollkugeln im Sensorkopf machen diesen klobig und verschmutzen schnell. Ultraschallortungssysteme, wie sie für das Aufzeichnen von Stiftbewegungen auf einem Whiteboard verwendet werden (ultrasonic whiteboard), haben nicht die erforderliche Auflösung und setzen zur Triangulation mehrere fest positionierte Ultraschallempfänger voraus.

Optische Systeme mit LED-Beleuchtung, wie sie zum Beispiel in optischen Computermäusen verwendet werden, kooperierten erfahrungsgemäß nicht mit allen Oberflächen. Auf glatten und strukturarmen Oberflächen kann die Funktion aussetzen. Diese Situation hat sich mit Einführung der Laserbeleuchtung gebessert. Hier wird das Specklemuster, das ein nicht fokussierter Laserstrahl auf jeder Oberfläche erzeugt, genutzt. Dieses Specklemuster wird mit einem CMOS-Array aufgezeichnet und hinsichtlich der Ortsverschiebung ausgewertet. Bild 1 zeigt, wie dazu die zweidimensionale Korrelations-technik genutzt werden kann.

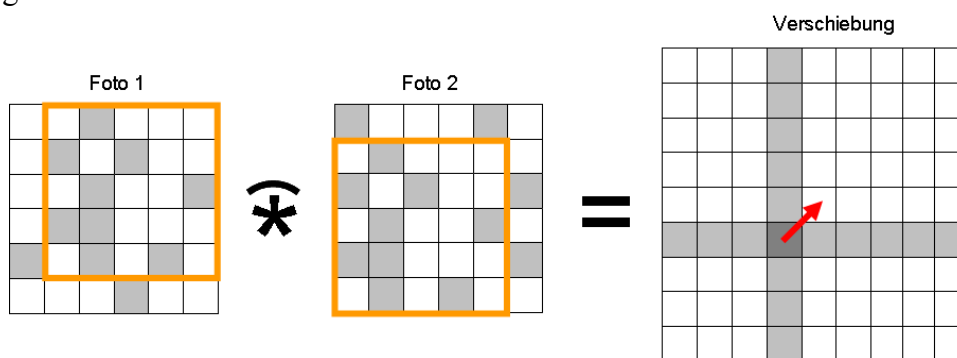


Bild 1: Prinzip der Ermittlung der Verschiebung zwischen zwei Bildern mit Hilfe der zweidimensionalen Kreuzkorrelationsfunktion

Das gerahmte Pixelmuster im Foto 1 hat sich in Foto 2 um ein Pixel nach links und ein Pixel nach unten bewegt. Diese Verschiebung wird ermittelt und gefolgert, dass sich die Maus um 1 Pixel nach rechts oben bewegt haben muss.

Ein solcher lasergestützter Sensor kann in das Gehäuse des Wirbelstromarrays integriert und mitbewegt werden. Das Führen des Arrays erfordert etwas Übung, da es nicht verdreht werden darf. Zwar könnte der optische Sensor prinzipiell auch Verdrehungen

erkennen, die Software des Signalprozessors einer Computermaus ist darauf jedoch nicht programmiert. Wegen des hohen Aufwandes wurde auf das Erstellen einer eigenen Software verzichtet.

1.3 Bildaufbau

Das Wirbelstromarray liefert 4 Live-Bilder, je zwei aus dem Einzelsensorbetrieb und dem Halbtransmissionsbetrieb. Aus diesen Bildern kann eines gewählt werden, das zum Aufbau des Ergebnisbildes des Prüfbereiches beitragen soll, indem es entsprechend der vom optischen Sensor gelieferten Array-Position in das Ergebnisbild eingerechnet. Bild 2 zeigt die Entstehung des Ergebnisbildes durch laufenden Einbau des Live-Bildes der Y-Komponente des Halbtransmissionsmodes. Dazu werden Filteroperationen im Zeit- und Ortsbereich durchgeführt.

Das Array liefert ein Bild, das von einem verstärkungsabhängigen Rauschen überlagert ist. Steht das Array still, kann durch Zeitfilterung (Tiefpass) das Rauschen reduziert und somit das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert werden. Bewegt sich das Array langsam, gibt es gleichbleibende Bildteile, die ortsrichtig gemittelt werden. Bei dieser Ortsfilterung reduziert sich nicht nur das Rauschen im überlappenden Bereich, sondern das Bild verbessert sich durch das Prinzip des MicroScanning, indem die Lücken zwischen den Sensoren aufgefüllt werden.

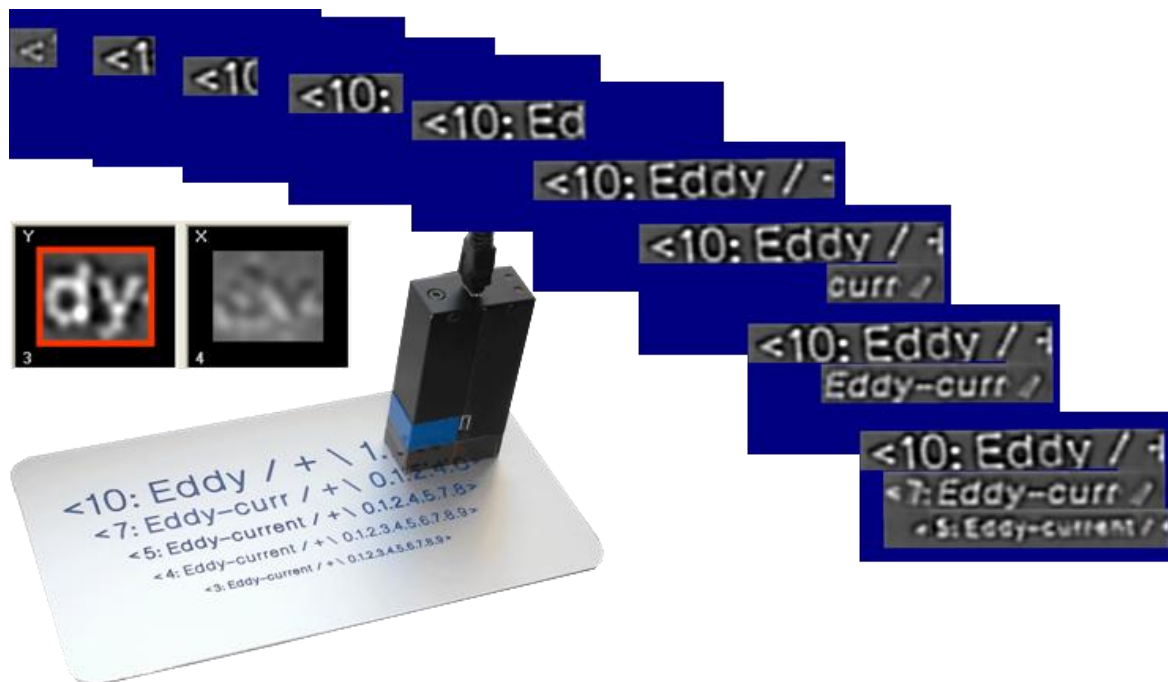


Bild 2: Entstehung des Ergebnisbildes aus den Live-Bildern der Y-Komponente des Halbtransmissionsmodes (rot umrandet). Das Wirbelstromarray wird manuell über das gravierte Testblech geführt.

2. Bildgebende Rohrrinnenprüfung

2.1 Grundgedanken

Zur Prüfung von Wärmetauschern werden Wirbelstrom-Innendurchlaufsensoren eingesetzt, die sehr empfindlich viele Fehlerarten detektieren und bewerten. Dem Vorteil einer hohen Prüfgeschwindigkeit steht der Nachteil der fehlenden Umfangsauflösung gegenüber. Falls

diese erforderlich ist, können Miniatur-Rotiersensoren oder Arrays eingesetzt werden, deren Frequenzbereich ab ca. 50 kHz Prüffrequenz beginnt [4, 5]. Es besteht jedoch Bedarf an geringeren Prüffrequenzen mit höheren Eindringtiefen, um die gesamte Wanddicke der Rohre prüfen zu können.

Bild 3 stellt die Prüfsituation bei Wärmetauschern dar. Bei einigen Wärmetauscher-typen werden die Rohre in den Rohrboden eingeschweißt. Das Schweißgut kann dabei den Rohreinlauf verengen. Bei der Prüfung mit dem Durchlaufsensor wird dieser entsprechend kleiner gewählt, so dass die Verengung passiert werden kann. Die Prüfeempfindlichkeit geht zwar wegen des geringeren Füllfaktors zurück, jedoch reicht das erzielbare Signal-Rausch-Verhältnis immer noch aus.

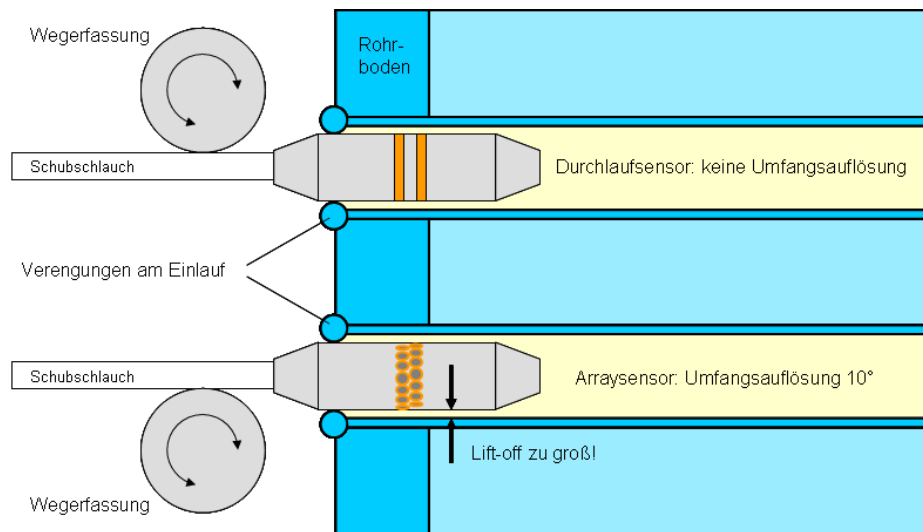


Bild 3: Durchlauf- bzw. Arraysensoren werden am Schubschlauch durch die Nadelrohre des Wärmetauschers bewegt und müssen unter Umständen Verengungen am Einlauf überwinden.

Sensorarrays bestehen aus kleinen Tastsensoren, deren Empfindlichkeit mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche (Lift-off) schnell abnimmt. Um diesen Lift-off klein zu halten und dennoch die Einlaufverengung zu überwinden, kann das Array geteilt werden. Jeder Teil taucht radial ein und legt sich nach Durchlaufen der Verengung wieder an die Rohrwand an.

Bei Durchlaufsensoren werden der Sendestrom und die Messsignale über den Schubschlauch in analoger Form zu einem separaten Wirbelstromgerät transportiert, an das häufig ein Laptop zur Datenerfassung, -darstellung und -speicherung angeschlossen ist. Für Sensorarrays ist dieser Weg nicht gangbar, da die Signale vieler Sensoren entsprechend viele Leitungen im Schubschlauch beanspruchen würden. Aus diesem Grund werden die Signale von Sensorarrays im Sensorträger vorverarbeitet und „gemultiplext“ über wenige Leitungen geführt.

Dank der Miniaturisierung der Elektronikhardware in den Arrays der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg entstand der Wunsch nach Integration der gesamten Elektronikhardware in den Sondenträger. Bild 4 zeigt den Prototyp des Sensorarrays.



Bild 4: Niederfrequentes Sensorarray für die Rohrenprüfung mit eintauchfähigen Köpfen.

Jeder der 4 federnd gelagerten Köpfe trägt ein Array aus 10 Schalenkernspulen, die über Multiplexer zu 9 Halbtransmissionssensoren verschaltet sind. Die Wirkbreite jedes Halbtransmissionssensors deckt einen Winkelbereich von 10° ab. Die Signale der Sensoren werden vom Kopfträger aus über Flexbänder auf die Grundplatte geführt, die in einem rohrförmigen Gehäuse mündet. Dieses beherbergt die komplette Hardware, die die Signale aufbereitet, digitalisiert und bis zu 30 m weit transportiert. Hier wird das vieradrige Kabel direkt an den USB-Port eines Notebooks geführt. An einen weiteren Port wird der inkrementelle Wegaufnehmer angeschlossen, der die Sensorposition in Axialrichtung bestimmt.

Die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit ergibt sich aus der Abfragegeschwindigkeit der Arrays und erreichte bei einer Auflösung von 1 mm in Vorschubrichtung ca. 120 mm/s.

Die Software übernimmt die Demodulation und Zuordnung der Signale zu den einzelnen Köpfen und der Position im Array. Bild 5 zeigt einen der Köpfe und die entsprechende Signaldarstellung auf dem Bildschirm. Zusätzlich zum Array wurde ein größerer Schalenkern zur Ermittlung der Wanddicke des Rohres eingebaut. Die Signale aller 4 Köpfe werden in einer XY-Ebene farbcodiert dargestellt.

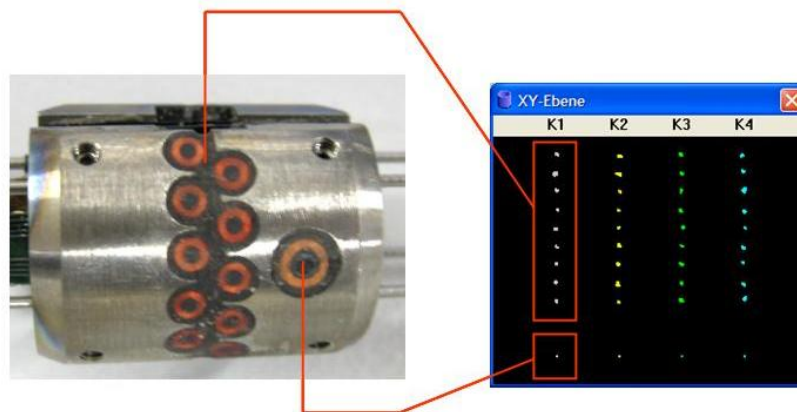


Bild 5: Links: Titankopf mit Sensorarray und Wandsensor. Rechts: Darstellung der Signale aller Sensoren in einer XY-Ebene.

In der C-Bild-Darstellung werden sowohl die X- als auch die Y-Komponenten der Punktbewegung erfasst und ortsrichtig abgebildet. Bild 6 zeigt ein Beispiel, in dem Testbohrungen zu erkennen sind. Im oberen Bildteil wird die Y-Komponente über dem Umfang als Abwicklung dargestellt, im unteren die X-Komponente. Die schmalen Zeilen darunter zeigen die Signale der Wandsensoren als Grauwert.

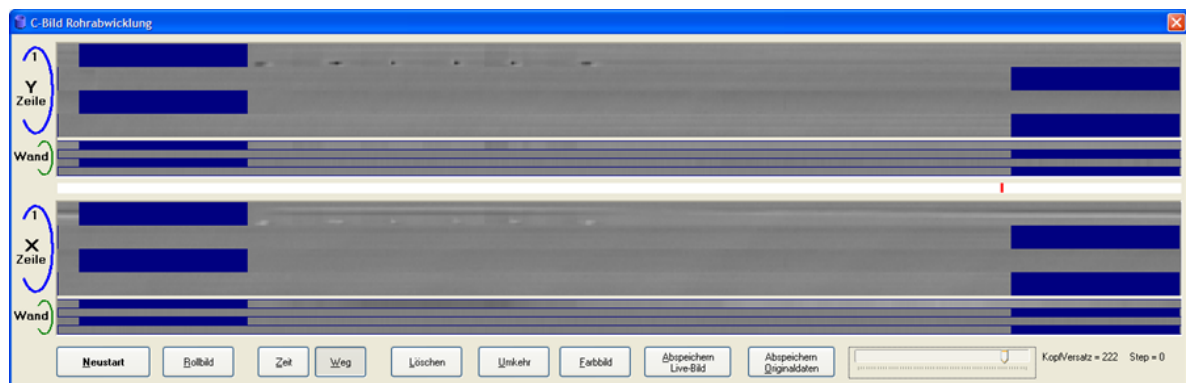


Bild 6: C-Bild-Darstellung der Rohrwand in Form einer Abwicklung. Die Testfehler sind sowohl im Y- als auch im X-Bild zu erkennen.

Zu Dokumentations- und Analysezwecken können die Originaldaten abgespeichert werden. Die erste Version einer Analysesoftware (Bild 7) visualisiert die Originaldaten, aus denen ein Abschnitt zur Auswertung ausgewählt wird. Für diesen vergrößerten Abschnitt können nachträglich die Verstärkung, Spreizung und Phase optimiert werden. Mit dem Mauszeiger kann eine Linie ins Bild gezeichnet werden, die dem Weg eines virtuellen Wirbelstromsensors entspricht. Auf diese Weise kann das Signalbild in der XY-Ebene entlang diese Weges rekonstruiert und bewertet werden.

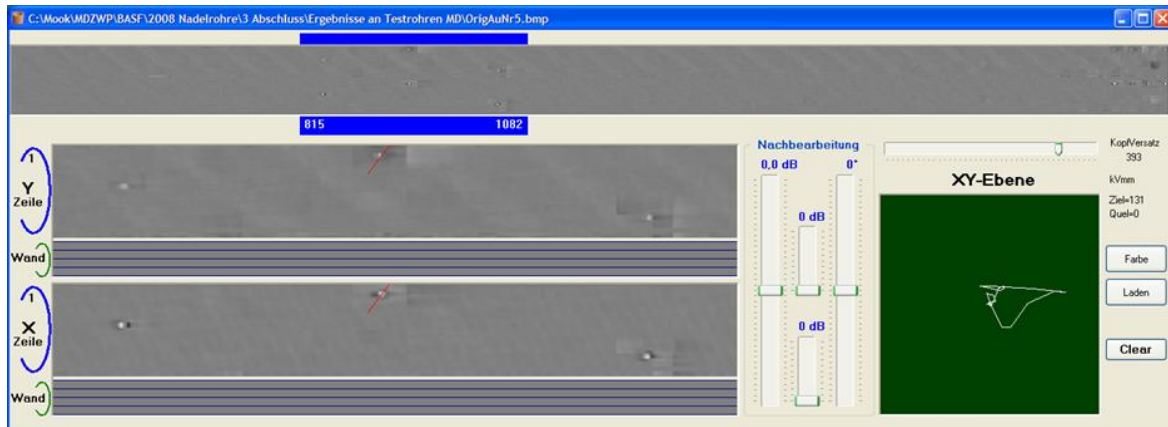


Bild 7: Analysefenster mit vergrößertem Ausschnitt aus den Originaldaten eines Testrohres. Neben der nachträglichen Optimierung von Verstärkung und Phase ist die Rekonstruktion der Signalbilder in der XY-Ebene möglich.

Fazit

Sowohl das ebene als auch das gekrümmte Array zeigen die Machbarkeit einer schnellen Wirbelstrombildgewinnung. Das lückenlose Abtasten des Prüfbereiches bei gleichzeitigem visuellen Eindruck von Form, Größe und Lage einer Inhomogenität erleichtert die Interpretation der Signale, beschleunigt die Prüfung und macht sie sicherer.

Referenzen

- [1] Mook, G.: Randschichtprüfung mit bildgebenden Wirbelstromverfahren - Neue Wege zur Fehlerdetektion und -bewertung, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, DGZfP-Jahrestagung, Erfurt, 10.-12.5.2010, Mo.2.A.3
- [2] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.: Wirbelstromarrays für hohe Bildschärfe, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, DGZfP-Jahrestagung, Erfurt, 10.-12.5.2010, P24
- [3] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.: Bildgebende Verfahren zur Prüfung auf oberflächennahe Fehler mittels Wirbelstrom-Sensorarrays, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, DGZfP-Jahrestagung, Münster, 18.-20.5.2009, Mo.3.B.1
- [4] Sullivan, S.P.; Cecco, V.S.; Obrutsky, L.S.; Lakhan, J.R.; Park, A.H.: Validating Eddy Current Array Probes for Inspecting Steam Generator Tubes. NDTnet 1998 January, Vol 3 No.1
- [5] Benson, J.: Eddy Current Data Qualify Parameters for Inspection of Steam Generator Tubes. Vol. 4 Array Probes, EPRI-Report, October 2002