

Wirbelstromarrays für hohe Bildschärfe

Gerhard MOOK, Juri SIMONIN

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

Kurzfassung. Der Beitrag stellt neueste Entwicklungen zur Steigerung der Abbildungsschärfe vor. Dazu werden zwei prinzipiell verschiedene Wege beschrieben. Der erste Weg basiert auf der Verdichtung der Sensorenmatrix und der zweite auf dem MicroScanning, das Zwischenbilder liefert, die die Lücken zwischen den Sensoren auffüllen. Soll die Prüfzeit akzeptabel bleiben, muss die Bildwiederholfrequenz hinreichend hoch sein. Darüber hinaus muss die Verschiebung des Arrays zwischen zwei Bildern präzise erfasst werden, ohne den Prüfvorgang zu behindern.

1. Einführung

Die Wirbelstromarrays der Universität Magdeburg zeichnen sich durch den direkten Anschluss an den USB-Port eines Notebooks aus. Die komplette Elektronik wurde in den Sensorkopf integriert. Ohne den Sensor mechanisch zu bewegen, wird der Randschichtbereich bis zu einigen Millimetern Tiefe auf Fehlstellen wie Risse oder Poren untersucht. Dazu genügt die einseitige Zugänglichkeit des Bauteils, Koppelmittel werden nicht benötigt [1-5].

2. Vom Sensor zum Array

2.1 Betriebsarten und Abbildungseigenschaften

Für die bildgebende Wirbelstromprüfung sind bei der Sensorauswahl zunächst die Abbildungseigenschaften interessant. Der Halbtransmissionssensor in der linken Spalte des Bildes 1 zeigt eine Punktspreizfunktion, die optischen Systemen nahekommmt. Es existiert ein einziges scharf ausgeprägtes Maximum, das von einer „Hutkrempe“ mit inversem Vorzeichen umgeben ist. Dagegen liefert der axiale Einzelsensor (parametrischer bzw. transformatorischer Absolutsensor) eine kraterartige Punktspreizfunktion, die unschärfere und gelegentlich schwerer zu interpretierende Bilder produziert.

Werden Zylinderkernspulen zu einem Array angeordnet, können sie sowohl als Einzelsensoren als auch als Halbtransmissionssensoren betrieben werden. In jedem Falle verteilt sich das Magnetfeld der Sendespule auf alle sechs Nachbarspulen. Theoretisch greift es auch durch weiter entfernte Spulen.

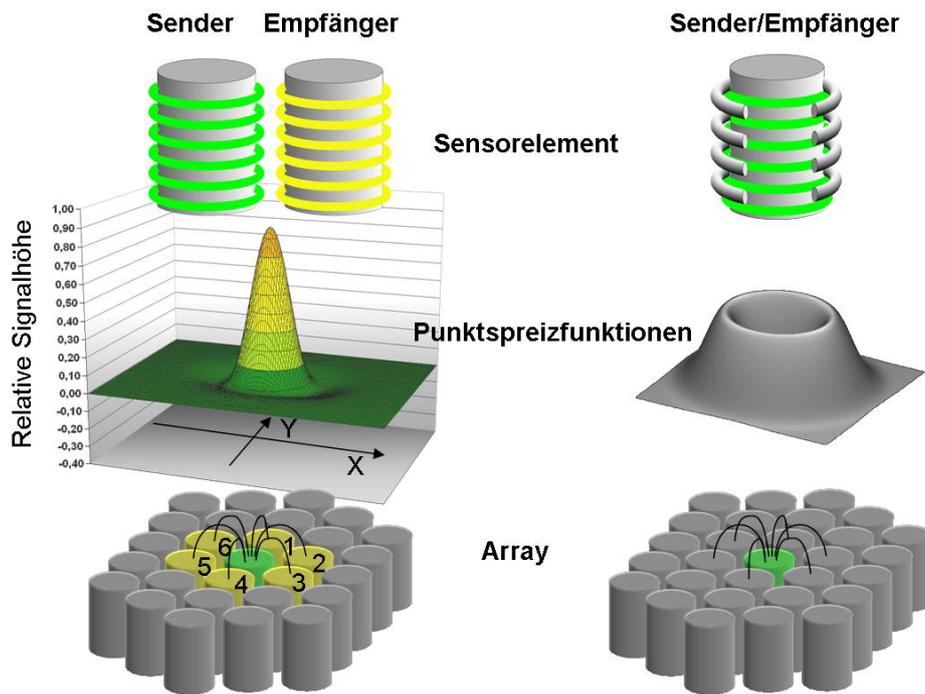


Bild 1: Bimodale Sensoren, ihre Punktspreizfunktionen und ihre Kaskadierung zum Array. Linke Spalte: Halbtransmissionssensor, rechte Spalte: Axialer Einzelsensor (parametrisch oder transformatorisch)

Basierend auf einer Reihe von Voruntersuchungen [6-9] wurde der Halbtransmissionssensor (auch Fernfeld- bzw. Pitch-Catch-Sensor genannt) näher betrachtet. Bild 2 zeigt die Punktspreizfunktion in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Spulen (Spacing).

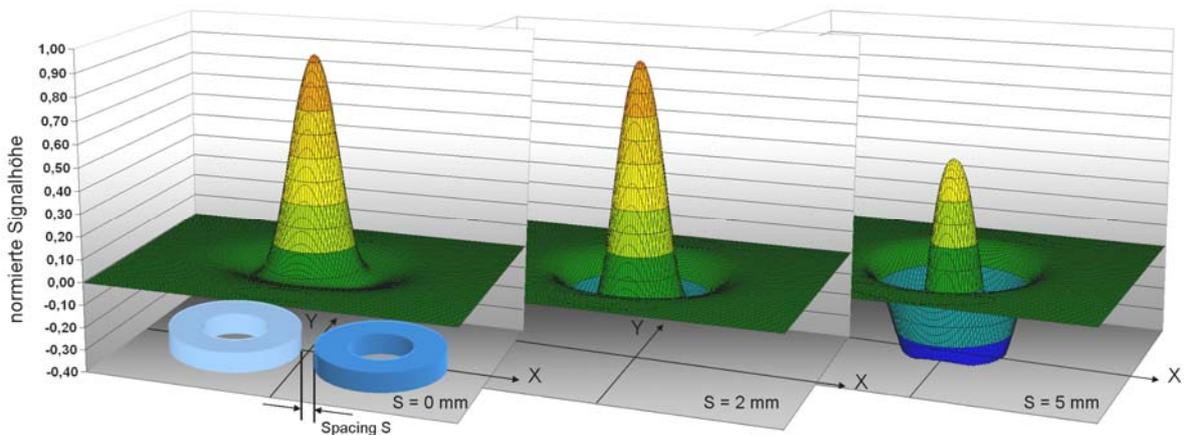


Bild 2: Punktspreizfunktion des Halbtransmissionssensors in Abhängigkeit vom Spacing (berechnet mit VIC-3D, Sabbagh Ass. Inc.)

Die Punktspreizfunktion erinnert an einen Mexikanerhut, dessen Oberteil wenig, die Krempe jedoch stärker vom Spacing abhängt. Aus dem auch bei größerem Spacing scharf ausgeprägten Maximum resultieren recht gute Abbildungseigenschaften.

2.2 Signale in der Messebene

Das elektromagnetische Wechselfeld der Sendespule dringt nach den bekannten Gesetzen in den Werkstoff ein. Im Gegensatz zum axialen Einzelsensor wertet die Empfangsspule des Halbtransmissionssensors jedoch nur einen Teil des Gesamtfeldes aus, der in tiefer

liegende Werkstückbereiche vorgedrungen ist. Bild 3 macht diesen Gedanken anhand verdeckt liegender Fehler deutlich.

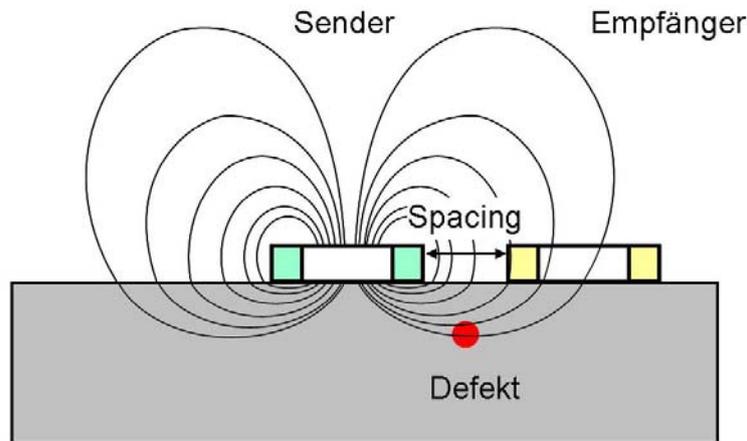


Bild 3: Halbtransmissionssensor und Verlauf der magnetischen Feldlinien

Da nicht nur der Fehlernachweis sondern häufig auch eine Fehlerbewertung gefordert ist, müssen Signalkriterien gefunden werden, die die Quantifizierung gefundener Fehler ermöglichen. Von axialen Einzelsensoren bekannte Kriterien sind die Signalamplitude, die Amplitude einer Signalkomponente oder der Signalwinkel in der Messebene. Für den Halbtransmissionssensor zeigt Bild 4 theoretische und praktische Ergebnisse an verdeckten Fehlern.

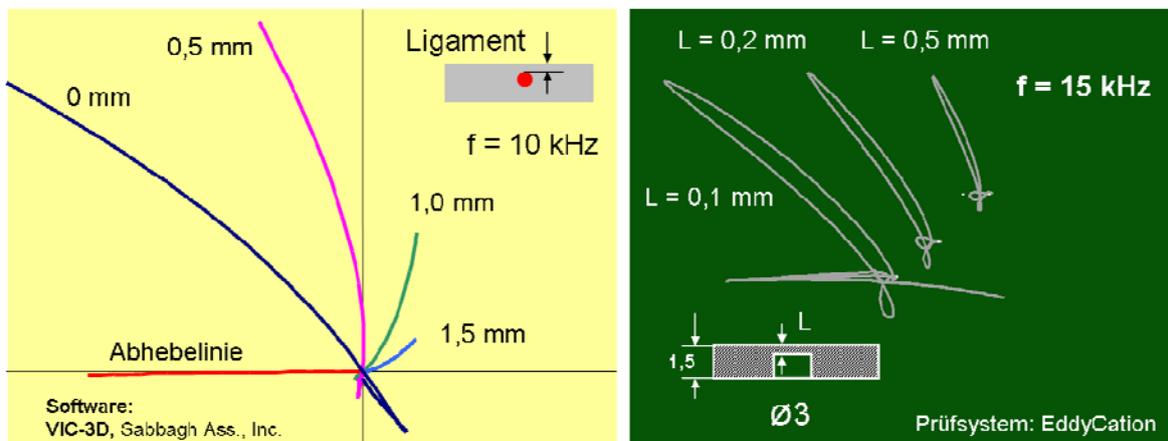


Bild 4: Vergleich berechneter und gemessener Signale des Halbtransmissionssensors an verdeckten Fehlern.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Abhebeeffect anfangs linear, später nichtlinear wird und dass sich die Signale überdeckter Fehler anhand der Amplitude und Phasenlage unterscheiden lassen und somit gute Voraussetzungen für eine Fehlerbewertung gegeben sind.

Die Vor- und Nachteile der beiden Sensormoden lassen sich wie folgt zusammenfassen. Der axiale Einzelsensor besitzt einen weitgehend geradlinigen Lift-off, alle Fehlerarten sind gut detektierbar und er ist orientierungsunabhängig. Die Prüftiefe und die Abbildungseigenschaften sind eher mäßig. Der Halbtransmissionssensor besitzt eine hohe Prüftiefe, gute Abbildungseigenschaften und eignet sich besonders für lokale Defekte. Dem stehen der krummlinige, stark exemplarabhängige Lift-off und die Orientierungsabhängigkeit gegenüber.

2.3 Folgen der Kaskadierung

Im Gegensatz zum Betrieb eines einzelnen Sensors treten bei kaskadierten Zylinderkernspulen benachbarte Spulen immer in eine Wechselwirkung. Das von der Sendespule ausgehende Magnetfeld durchsetzt auch die benachbarten Kerne. Bild 5 zeigt diesen Umstand für den Halbtransmissionsbetrieb. In Bild 5a) konzentriert sich das Magnetfeld der Sendespule (grün) auf den Kern der Empfangsspule, die Empfindlichkeit dieses Sensors sei 100%. Bei zeilenartiger Anordnung im Bild 5b) verteilt sich das Sendefeld auf zwei Nachbarn, wobei zu jedem Zeitpunkt nur einer als Empfänger aktiv ist. Der Magnetfluss durch den passiven Empfänger bleibt ungenutzt. Damit reduzieren sich der nutzbare Fluss und die Empfindlichkeit auf 50%. Bei zwei versetzten Sensorzeilen mit vier Nachbarn verbleiben 25% und bei einer kompletten Matrix nur noch rund 17% der Empfindlichkeit. Durch diese Aufteilung des Flusses verringert sich der Effekt der Flussverstärkung durch die Ferritkerne. Obwohl gegenüber der Luftspule noch ein Empfindlichkeitsgewinn besteht, rückt die Luftspule in den Bereich des Sinnvollen.

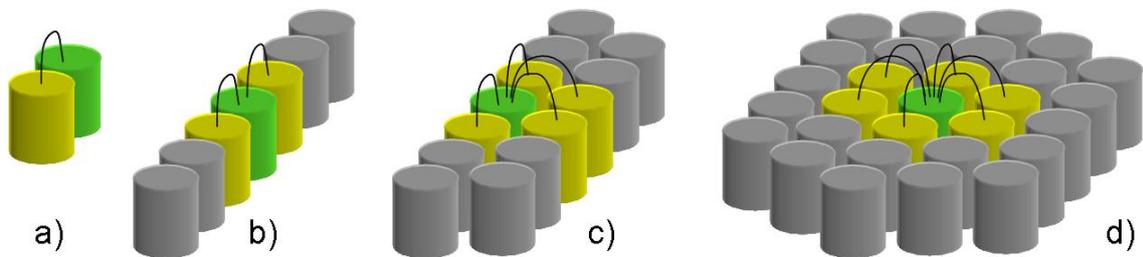


Bild 5: Aufteilung des Magnetflusses auf a) einen, b) zwei, c) vier und d) sechs Nachbarkerne

Soll die Verteilung des Flusses auf die Nachbarspulen vermieden werden, bieten sich Schalenkernspulen an, die jedoch aufgrund ihrer Baugröße eine geringere Ortsauflösung liefern. Bezüglich der Abbildungsqualität spielt die Ortsauflösung jedoch eine wichtige Rolle. Im Einzelsensorbetrieb entspricht jede Spule einem Sensor, der mit der bekannten Punktpreisfunktion abbildet. Entlang einer Zeile überlagern sich diese Funktionen wie in Bild 6 oben dargestellt.

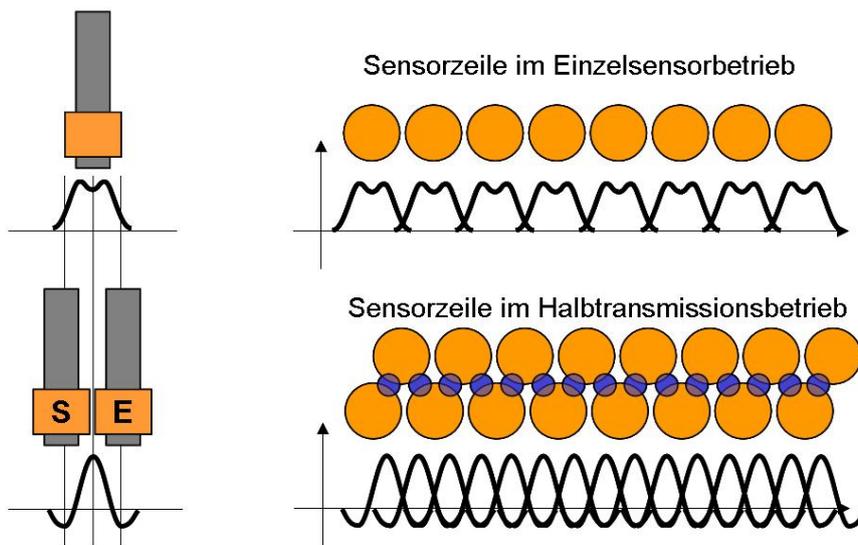


Bild 6: Ortsauflösung im Einzelsensorbetrieb (oben) und Halbtransmissionsbetrieb (unten)

Im Halbtransmissionsbetrieb liefern zwei versetzte Spulenzeilen eine einzige Sensorzeile mit einer Auflösung von einem halben Spulenabstand (Bild 6 unten). Die Ortsauflösung ist also höher. Bedenkt man darüber hinaus die schärfere Punktspreizfunktion, ergibt sich ein besseres Wirbelstrombild.

3. Bimodales Array

Bild 7 zeigt ein ebenes 2D-Array mit einer aktiven Fläche von 14 x 12 mm. Die gesamte Wirbelstrom- und Multiplexelektronik befindet sich im Array-Gehäuse (20 x 40 x 80 mm), so dass die Verbindung zum Notebook auf ein USB-Kabel reduziert werden konnte, über das auch die Stromversorgung erfolgt. Das Array setzt sich aus 60 Spulen mit 1-mm-Ferritkernen zusammen, die sowohl sende- als auch empfangsseitig separat ansteuerbar sind. Jede Spule kann sowohl senden als auch empfangen (Halbtransmissionsbetrieb) und auch beides gleichzeitig (Einzelsensorbetrieb). Somit verteilen sich über die aktive Fläche des Arrays 60 parametrische und 150 Halbtransmissionssensoren, die zusammen 210 Sensoren bilden und die Fläche mit einer Ortsauflösung von ca. 1 mm abbilden. Mit 0,625 ms Sensormesszeit wird das komplette Array im Einzelsensorbetrieb in 40 ms abgefragt, so dass sich eine Bildrate von 25 Bilder pro Sekunde (Videotakt) ergibt. Bei Komplettabfrage aller Sensoren sinkt die Rate auf 7,5 Bilder pro Sekunde.



Bild 7: Das 60-Spulenarray am Notebook. Es deckt ohne mechanische Bewegung eine Fläche von 14 x 12 mm ab und findet Platz in einem Gehäuse BxTxH = 40 x 20 x 80 mm.

Im Beitrag [5] werden weitere Arrays vorgestellt, darunter ein Array mit 256 Sensoren in ebener und gekrümmter Ausführung. Außerdem werden Anwendungsmöglichkeiten für die Arraytechnik erläutert.

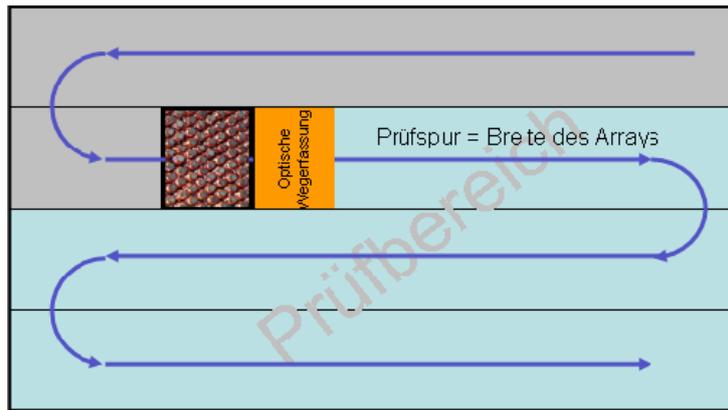


Bild 10: Aufbau des Ergebnisbildes eines Prüfbereiches durch zeilenweises Abtasten mit Hilfe des Arrays

Bild 11 zeigt das Bedien- und Anzeigefenster für die entstehenden Live-Bilder des Arrays. Gut sichtbar sind die im Halbtransmissionsmode steigende Ortsauflösung (Fenster 3 und 4 gegenüber 1 und 2).

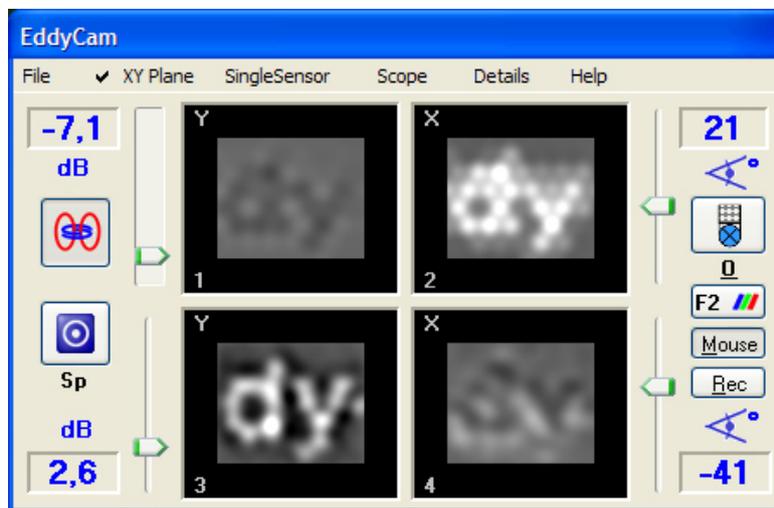


Bild 11: Bedienfeld und Live-Bilder des Arrays. Oben: Y- und X-Komponenten des Bildes im Einzelsensormode, unten: Y- und X-Komponenten des Bildes im Halbtransmissionsmode,

Die Ergebnisbilder des gesamten Prüfbereiches sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle1: Gegenüberstellung der Ergebnisbilder verschiedener Betriebsarten und Prüfsituationen (vgl. Bild 8)

	Prüfung von der Vorderseite	Prüfung von der Rückseite
Halbtransmissionsbetrieb		
Einzel-sensor-betrieb		

Fazit

Das Wirbelstromarray mit einer Bildwiederholfrequenz von bis zu 25 Bildern pro Sekunde und integrierter Positionserfassung bietet erstmals die komfortable Möglichkeit, neben der Einzelbilddarstellung der Fläche unter dem Array auch einen ganzen Prüfbereich manuell lückenlos abzutasten und das Ergebnis visuell darzustellen. Die Auflösung liegt durch das Prinzip des MicroScanning höher als die Sensordichte.

Dabei liefert der Einzelsensor zwar die geringere Auflösung, doch die hohe Bildwiederholfrequenz erlaubt einen zügigen Sensorvorschub von bis zu 200 mm/s. Wird eine Inhomogenität im Bild vermutet, kann diese im langsameren Halbtransmissionmode näher untersucht und schärfer abgebildet werden.

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, Beitrag Mo.2.A.3
- [2] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.: Wirbelstrom-Bewegtfeldsensoren - Potenziale für die industrielle Anwendung, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, DACH-Jahrestagung, St. Gallen, 28.-30.4.2008, Mo.3.B.1
- [3] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.; Krüger, M.; Luther, M.: Subsurface Imaging using Moving Electromagnetic Fields and Surface Acoustic Waves. In: Busse, G.; v. Hemelrijck, D.; Solodov, I.; Anastasopoulos, A.: Emerging Technologies in Non-Destructive Testing, Taylor & Francis, London, Leiden, New York, Philadelphia, Singapore, 2008, S. 275 -280
- [4] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.: Electromagnetic imaging using probe arrays, 17th World Conference on Non-destructive Testing, paper 380, Shanghai, Oct. 25-28, 2008
- [5] 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
- [6] Mook, G.; Hesse, O.; Uchanin, V.: Deep Penetrating Eddy Currents and Probes. 9. ECNDT, Berlin, 25.-29.9.2006, paper 176
- [7] Yashan, A.; Bisle, W.; Meier, Th.: Inspection of Hidden Defects in Metal-Metal Joints of Aircraft Structures Using Eddy Current Technique with GMR Sensor Array. Proc. 9th ECNDT, Berlin, 2006, paper Tu.4.4.4
- [8] Vacher, F.; Gilles-Pascaud, C.; Decitre, J.M.; Fermon, C.; Pannetier, M.; Cattiaux, G.: Non Destructive Testing with GMR Magnetic Sensor Arrays. Proc. 9th ECNDT, Berlin, 2006, paper Tu.4.4.2
- [9] Reimche, W. et al.: Development and Qualification of a Process-Oriented Nondestructive Test Method for Weld Joints to Operate with Remote Field Eddy Current Technique. Proc. 9th ECNDT, Berlin, 2006, paper Fr.1.7.2
- [10] Mook, G.; Rost, P.; Simonin, J.: Niederfrequente Wirbelstrom-Arrays mit Videotakt, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, DGZfP-Jahrestagung, Erfurt, 10.-12.5.2010, Beitrag Mo.3.A.2