

Bildgebende Verfahren zur Prüfung auf oberflächennahe Fehler mittels Wirbelstrom-Sensorarrays

Gerhard MOOK, Fritz MICHEL, Juri SIMONIN,
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Kurzfassung. Bisherige Versuche, Wirbelstrombilder zu erzeugen, die ähnlich einem Röntgenbild Aussagen über die lokale Verteilung bestimmter physikalischer Eigenschaften zulassen, waren häufig an aufwändige Mechaniken und langen Messzeiten gebunden.

Der Beitrag stellt Sensorarrays vor, die in der Lage sind, oberflächennahe Fehler schnell und unkompliziert abzubilden. Beide Komponenten des Wirbelstromsignals werden aufgezeichnet. Kernstück ist ein volldigitales Wirbelstromsystem unter Verwendung von mikroelektronischen Großserienkomponenten.

1. Einführung

Bild 1 zeigt, wie zur Wirbelstrom-Bildgewinnung ein Sensor systematisch über die Oberfläche bewegt wird und welche Signalkomponenten aufgezeichnet und als Grauwertverteilung dargestellt werden.

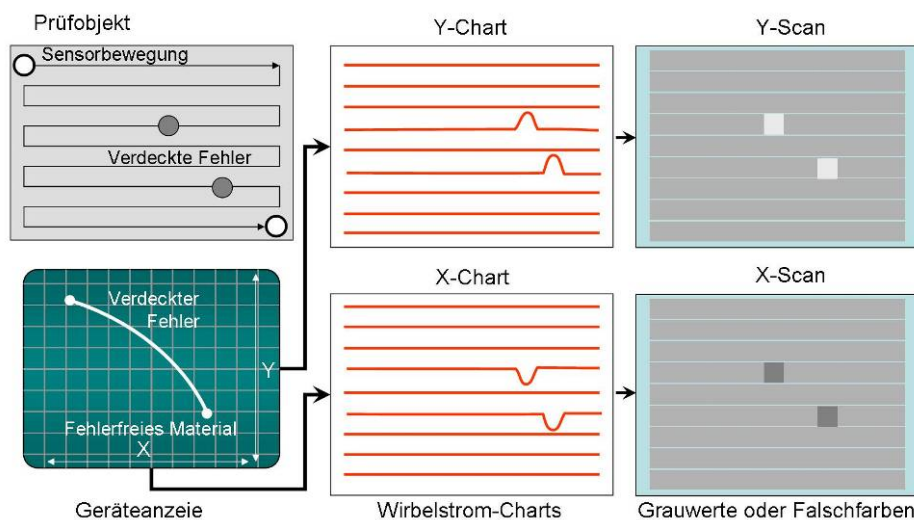


Bild 1: Wirbelstrom-Bildgewinnung mit scannendem Einzelsensor

Um die aufwändige Scanmechanik zu vermeiden, werden Zeilen- und Flächensensoren entwickelt [1-13].



2. Sensorzeilen

Anstelle des Abtastens der Oberfläche mit einem einzigen Sensor werden mehrere Sensoren zu einem Bewegungsfeldsensor kombiniert, dessen Elemente durch eine spezielle Elektronik multiplex angesteuert werden. Im Rahmen des BMBF-geförderten Wachstumskern-Projektes AL-CAST wurden zunächst 32 und später 64 Sende- und Empfangsspulen zu einem Zeilensensor kombiniert, dessen Gehäuse auch die Ansteuerelektronik enthält. Über den USB-Port wird der Sensor an ein Notebook angeschlossen, das gemeinsam mit der Ansteuerelektronik und der Software ein volldigitales Wirbelstromprüfgerät bildet. Bild 2 zeigt den Zeilensensor und den Geräteaufbau schematisch.

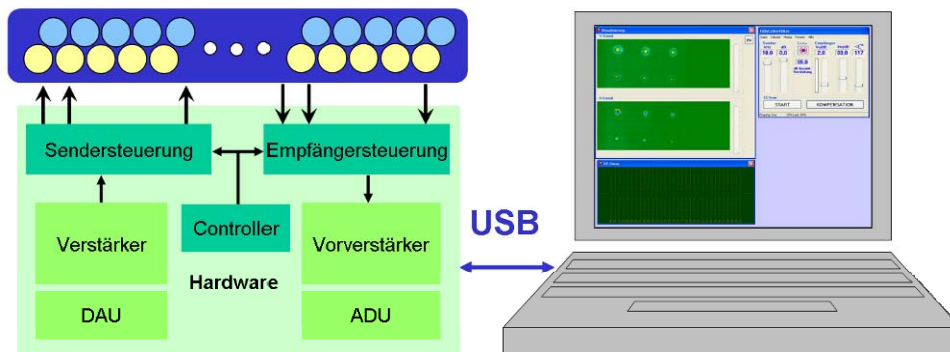


Bild 2: Schematischer Aufbau der Wirbelstromsensorzeile

Bild 3 gestattet einen Blick auf die Sensorzeilen. Zu erkennen sind die einzelnen Zylinderkernspulen und ihre Anordnung.



Bild 3: Links: Sensorzeile 32, 1,5-mm-Ferritkerne, Halbtransmission, Spulenabstand 3 mm, Gesamtpurbreite 45 mm, Sensorabstand ca. 1,5 mm. Rechts: Sensorzeile 64, 1,05-mm-Ferritkerne, Halbtransmission, Spulenabstand 2 mm, Gesamtpurbreite 61 mm, Sensorabstand ca. 1 mm

Zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit wurde ein graviertes Aluminiumblech mit 1 mm Dicke verwendet (Bild 4 links). Die Buchstaben und Ziffern simulieren Defekte unterschiedlicher Art und Orientierung. Die erste Zahl jeder Zeile zeigt die Schrifthöhe in Millimeter. Wird ein Zeilensensor über dieses Blech bewegt (Bild 4 rechts), entstehen die im Folgenden gezeigten Wirbelstrombilder.

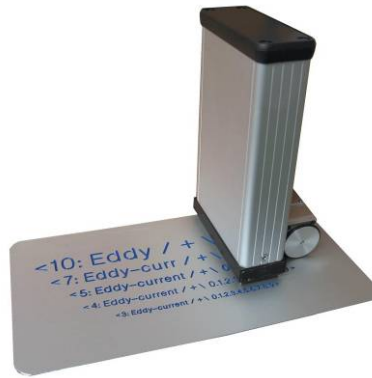
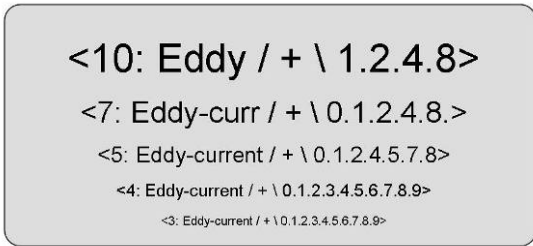


Bild 4: Links: Aluminiumblech mit Gravuren als Testfehler. Die erste Zahl der Zeile gibt die Schriftgröße in Millimeter an. Rechts: Zeilensensor 64 mit Wegaufnehmer über dem Testkörper

Liegt die Gravur oben (Bild 5a), wird mit der Sensorzeile 32 bis hinunter zur Schriftgröße 5 mm ein lesbares Bild erzeugt. Im Teilbild b) ist die Schrift auch durch ein fehlerfreies 1-mm-Al-Blech hindurch zu erkennen. Die Teilbilder c) und d) zeigen die Schrift von der Gegenseite aus. Die größte Überdeckung ergibt sich in Teilbild d), wo die verdeckten Schriftzüge durch ein Zusatzblech hindurch untersucht werden. Das Signal-Rausch-Verhältnis nimmt deutlich ab.

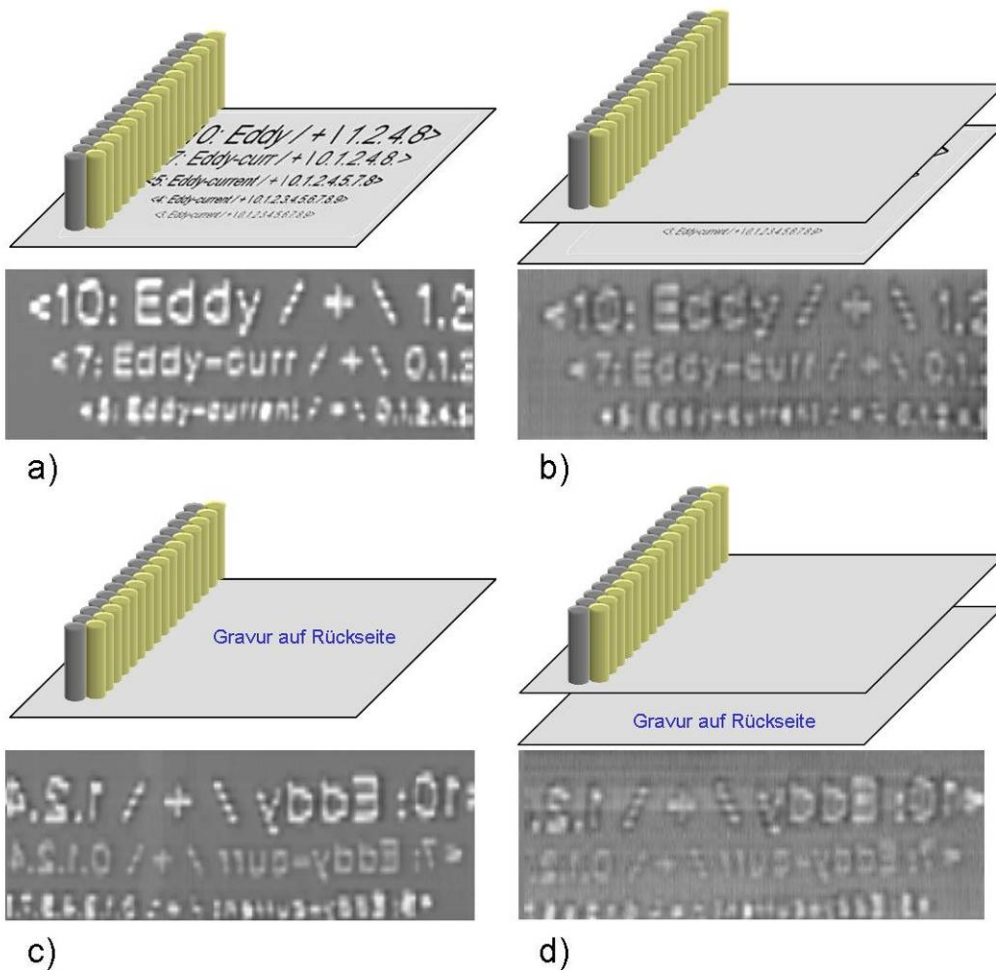


Bild 5: Ergebnisse an Aluminiumblech mit Gravuren als Testfehler.

Bild 6 vergleicht die Ortsauflösung beider Sensorzeilen. Der deutliche Gewinn bei der Sensorzeile 64 ist gut erkennbar. Die 3-mm-Schrift ist gerade noch lesbar.

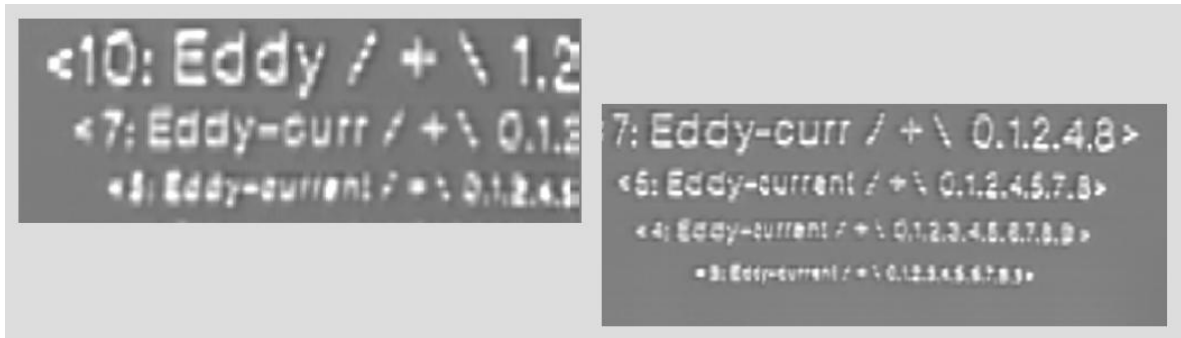


Bild 6: Vergleich der Ortsauflösung von Sensorzeile 32 (links) und Sensorzeile 64 (rechts)

Bild 7 zeigt als praktisches Anwendungsbeispiel der Sensorzeile 32 ein Aluminium-Druckgussteil, auf dessen Oberfläche visuell keine Anomalien erkennbar sind (Bild 7a). Der Zeilensensor macht jedoch charakteristisch geformte Strukturen sichtbar (Bild 7b), die erst nach dem Abarbeiten von 1 mm Randschicht auch optisch wahrnehmbar werden (Bild 7c).

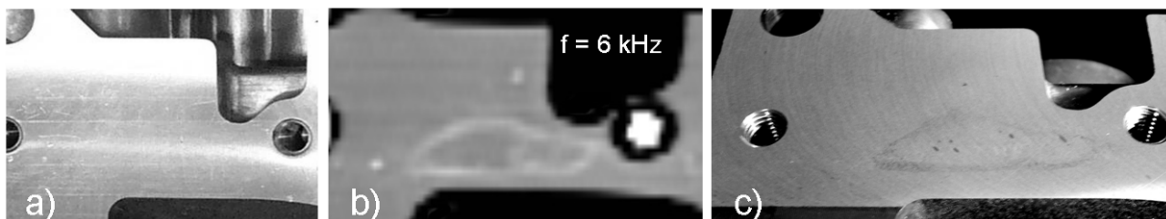


Bild 7: Visualisierung verdeckter Anomalien in Aluminiumguss, a) Foto des Prüfbereiches, b) elektromagnetische Signatur des Prüfbereiches, c) Foto nach dem Abarbeiten von 1 mm Randschicht

Bild 8 vergleicht identische Prüfbereiche zweier Druckgussteile. Die Bauteilaußenkontur sowie 5 Bohrungen liefern charakteristische Formanzeigen. Dazwischen zeigen sich jedoch helle punkt- und linienförmige Bereiche, die auf verdeckte Anomalien hinweisen.

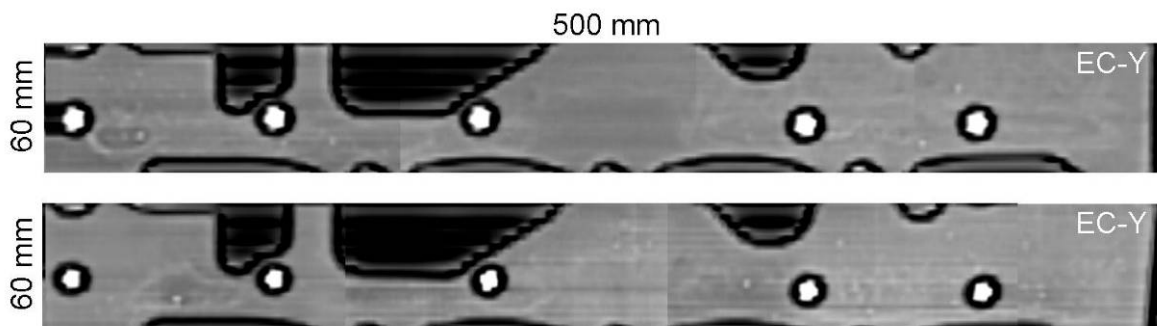


Bild 8: Visualisierung verdeckter Anomalien in zwei Zylinderkurbelgehäusen aus Aluminium-Druckguss. Neben der Geometrie sind helle Signaturen zu erkennen, die auf verdeckte Anomalien schließen lassen.

Bild 9 stellt Ergebnisse an einem anderen Aluminiumdruckgussteil mit offenen und verdeckten Poren dar (Markierung). Die übrigen Bildelemente zeigen die Bauteilgeometrie.

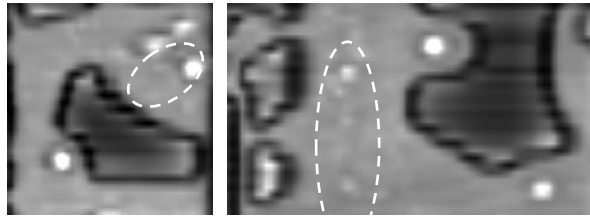


Bild 9: Wirbelstrombilder offener und verdeckter Poren in Aluminiumdruckguss

Die Signale verschieden überdeckter Fehler lassen sich anhand der Amplitude und Phasenlage unterscheiden und bieten somit gute Voraussetzungen für eine Fehlerbewertung.

Die Herstellung gekrümmter Sensorzeilen für konvexe Bauteilbereiche ist möglich. Damit ergeben sich Prüfmöglichkeiten, die bisher an der Machbarkeit oder dem Aufwand gescheitert sind. Bild 10 zeigt schematisch mögliche Anwendungen gekrümmter Sensorzeilen.

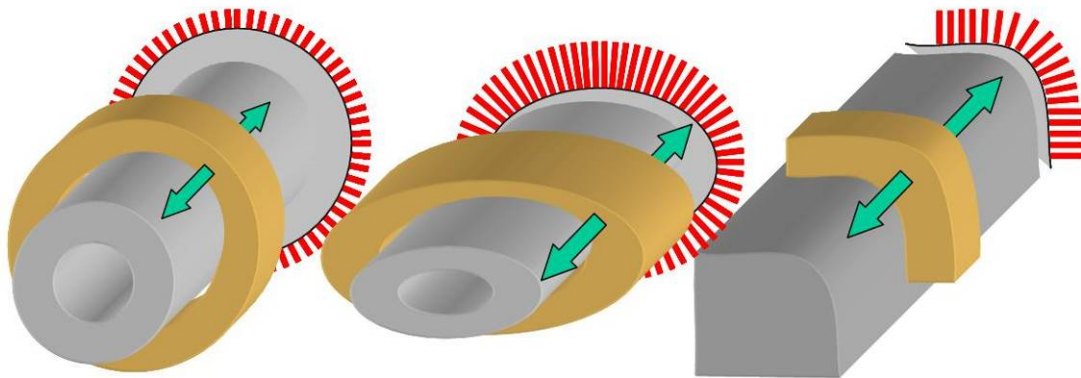


Bild 10: Mögliche Anwendungen gekrümmter Sensorzeilen

3 Sensorarrays

Ohne prinzipielle Veränderungen der Ansteuerelektronik gegenüber der Sensorzeile lassen sich 2D-Arrays aufbauen und beliebige Abfragemuster der Sensoren sowohl in Einzel- als auch im Halbtransmissionsmodus implementieren. Jedes Element des Arrays kann sowohl senden, empfangen und auch beides gleichzeitig. Für ein Array aus 16x16 Elementen ergibt sich bei Abfrage aller Einzelemente sowie aller unmittelbaren Nachbarn (Halbtransmission) eine Bildaufbauzeit von 0,64 Sekunden.

3.1 Ebene Arrays

Bild 11 zeigt ein ebenes Array über dem gravierten Aluminiumblech. Ohne es zu bewegen, entstehen die Wirbelstrombilder. Mit einer Auflösung von ca. 1,5 mm wird so eine Fläche von 38 x 44 mm lückenlos gescannt. Allein diese Eigenschaft macht die Anwendung von Arrays attraktiv. Bei wiederkehrenden Inspektionen können die Bilder verglichen und der Schädigungsfortschritt bewertet werden.

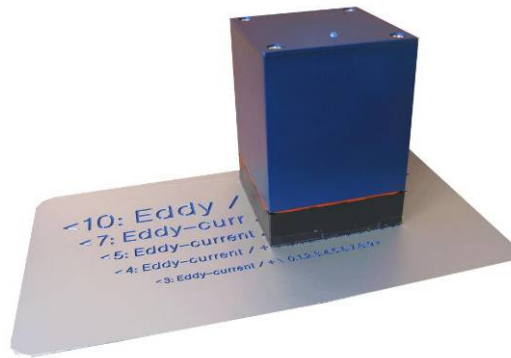


Bild 11: Das 2D-Array liefert ein komplettes Wirbelstrombild in 0,64 Sekunden

Bild 12 stellt in den linken 4 Frames Wirbelstrombilder dar, die mit einem Versatz des Arrays von 0,5 mm gewonnen wurden. Jedes dieser Bilder lässt noch den Ort der einzelnen Sensoren erkennen. Die Abbildungsqualität ist mäßig. Überlagert man einzelne Bilder im Sinne des MicroScannings [14], ergibt sich ein klares Bild der Gravur, das die Abbildungsqualität der Zeilensensoren übertrifft.

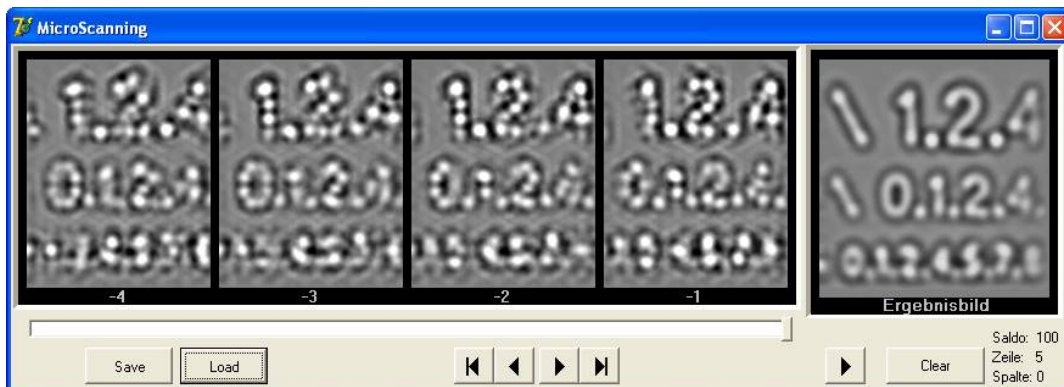


Bild 12: Halbtransmissionsbetrieb des 2D-Arrays. Links: Sequenz aus aufeinanderfolgenden Wirbelstrombildern bei minimalem Versatz des Arrays. Rechts: Gewichtet gemittelttes Ergebnisbild nach dem Prinzip des MicroScannings [14]

Für das MicroScanning wird jedoch die Erfassung der Position des Arrays benötigt. Dafür gibt es mehrere Lösungsvarianten. Neben mechanischen Wegaufnehmern kommen auch optische Sensoren, wie sie in Computermäusen verwendet werden, infrage. Diese Sensoren ermitteln die Verschiebung dadurch, dass sie zwei aufeinanderfolgende Bilder der Unterlage nach einem kombinierten Algorithmus aus 2D-Korrelation und Differenzbildtechnik auf den Versatz hin auswerten. Voraussetzung ist eine optisch erkennbare Struktur der Unterlage. Fehlt diese, ist der Sensor blind. Dieser Effekt ist auf glatten ungemusterten Oberflächen beobachtbar.

Dieses Prinzip der relativen Positionsbestimmung lässt sich auch mit dem Wirbelstromarray selbst realisieren, so dass kein weiterer Sensor benötigt wird. Voraussetzung ist allerdings, dass das Prüfobjekt eine Struktur aufweist, die im Wirbelstrombild erkennbar ist. Das können auch die Materialfehler selbst sein. Ist das Objekt strukturlos und fehlerfrei, ist der Sensor blind. Das heißt, in fehlerfreien Bereichen ist kein MicroScanning möglich. Unter Umständen kann man damit leben, da ja auch kein Fehler vorhanden ist, der detektiert und charakterisiert werden muss. Taucht ein Fehler auf, funktioniert auch automatisch das MicroScanning.

Wird dagegen eine komplette Abbildung des Prüfbereiches unabhängig vom Vorhandensein bestimmter Strukturen oder Fehler verlangt, kann ein optischer Sensor eingesetzt werden, der im Falle der Beleuchtung mit Laserlicht so gut wie unabhängig von den optischen Eigenschaften der Oberfläche arbeitet. Wie mit Hilfe eines solchen Wirbelstromarrays ein großer Prüfbereich bildgebend erfasst werden kann, zeigt Bild 13. Wird der Sensor schnell bewegt, ist die Bildqualität mäßig. Gibt es Anhaltspunkte für eine Fehlstelle, liefert eine langsamere Sensorbewegung automatisch bessere Bilder. Damit ist eine optimale Kombination aus Prüfgeschwindigkeit und Abbildungsqualität gewährleistet.

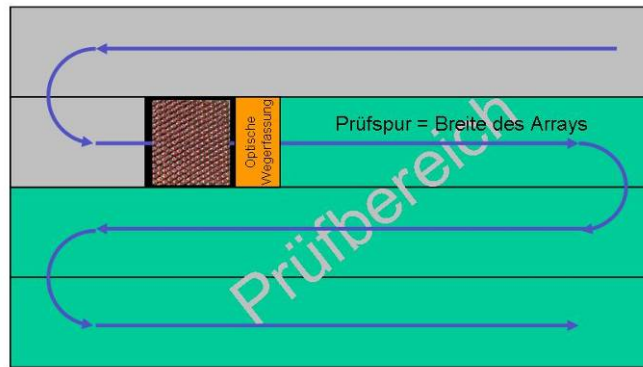


Bild 13: Prinzip der Abbildung eines großen Prüfbereiches mit Hilfe eines Arrays. Ein z. B. optischer Sensor ermittelt die Verschiebung des Arrays und ist die Basis für das MicroScanning.

3.2 Freiformarrays

Für nicht ebene Oberflächen wurde eine Technik entwickelt, die es erlaubt, in der Negativform des Prüfbereiches 256 Spulen anzuordnen. Es entsteht ein robuster Formkörper, der manuell oder robotisch auf dem Prüfobjekt platziert werden kann. Bild 14 zeigt links das Sensorarray und einen halbkugelförmigen Testkörper mit verdeckten Bohrungen. In der Mitte sind 4 Wirbelstrombilder unterschiedlicher Testfehler zusammengestellt, die im parametrischen Mode gewonnen wurden. Das Foto rechts zeigt den kompletten Sensor auf dem Testkörper.

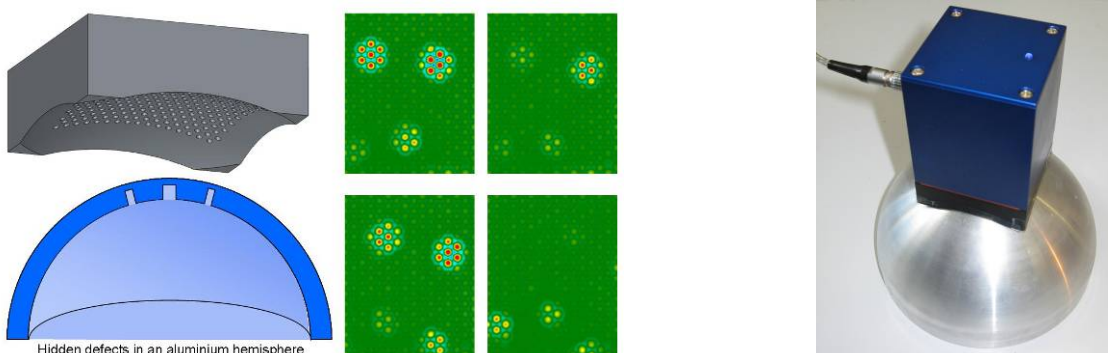


Bild 14: Wirbelstrom-Freiformarray zur bildgebenden Prüfung nicht ebener Bauteilbereiche. Links: Array und Testkörper, Mitte: Wirbelstrombilder verdeckter Testfehler, rechts: Foto der Prüfsituation

Weitere Anwendungen von Freiformarrays werden in Bild 15 angedeutet. Links ist eine Bauteilecke dargestellt, auf die ein entsprechend geformtes Array aufgesetzt werden kann. In der Mitte ist die Idee der Prüfung von Butzen dargestellt, wobei das Array über die Butze gestülpt wird und diese vollflächig prüft. Auch für komplizierte Freiformflächen wie Turbinenschaufeln erscheint die Arraytechnik geeignet.

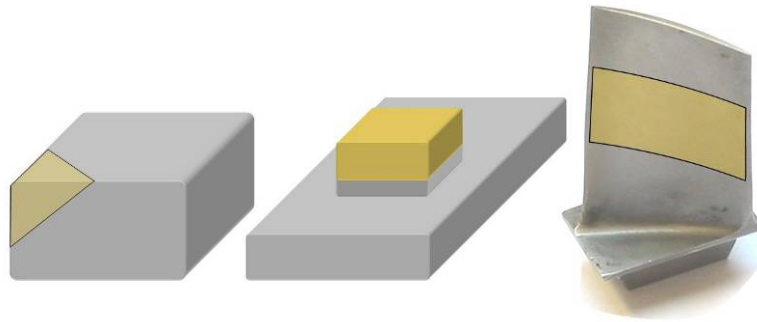


Bild 15: Wo weder mechanisch gescannt noch per Sensorzeile geprüft werden kann, können Freiformarrays zum Zuge kommen. Der Prüfbereich ist gelb gekennzeichnet.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Innovativen Regionalen Wachstumskerns AL-CAST, auf dessen Ergebnissen die vorgestellte Arbeit beruht.

Referenzen

- [1] Scholz, A.: Sondenmatte - neuer Weg für die Oberflächenprüfung mit Wirbelstrom. Proc. DGZfP Annl. Conf. Trier May 1990. pp. 218-22.
- [2] Grimberg, R.; Savin, A.; Leitoiu, S.; Bruma, A.; Steigmann, R.; Udpa, L.; Udpa, S.: Automated Eddy Current Data Analysis. 4th International Conference on NDT, Hellenic Society for NDT, Chania, Crete-Greece, 11-14 October 2007
- [3] Pelletier, E.; Grenier, M.; Chahbaz, A.; Bourgelas, T.: Array Eddy Current for Fatigue Crack Detection of Aircraft Skin Structures. Proc. Vth International Workshop, Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials. Québec City (Canada), 2-4 Aug. 2005
- [4] Sollier, T.; Talvard, M.; Aïd, M.: Use of EC Sensor Arrays on Thin Films. Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IV), S.S. Upda et al. (Eds.), IOS Press, 2000
- [5] Gilles-Pascaud C.; Lorecki B.; Pierantoni M.: Eddy Current Array Probe Development for Nondestructive Testing. 16th World Conference on NDT, Montreal, Canada, Aug 30 - Sep 3, 2004
- [6] Joubert, P.-Y.; Le Diraison, Y.; Pinassaud, J.; Satie, L.: Eddy Current Imager for the Detection of Buried Flaws in Large Metallic Structures. Proc. 9th ECNDT, Berlin, 2006, paper Tu.3.6.1
- [7] Perez, L.; Dolabdjian, C.; Waché, C.W.; Butin, L.: Advance in magnetoresistance magnetometer performances applied in eddy current sensor arrays. 16th World Conference on NDT, Montreal, Canada, Aug 30 - Sep 3, 2004
- [8] Decitre, J.-M.; Premel, D.; Mangenet, G.; Juliac, E.; Feist, W.D.: Flexible EC Array Probe for the Inspection of Complex Parts developed within the European VERDICT Project. Proc. 9th ECNDT, Berlin, 2006, paper Tu.4.4.3
- [9] Meilland, P.: Novel Multiplexed Eddy-Current Array for Surface Crack Detection on Rough Steel Surface. Proc. 9th ECNDT, Berlin, 2006, paper Tu.4.8.1
- [10] 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
- [11] Zilberstein, V.; Goldfine, N.; Washabaugh, A.; Weiss V.; Grundy, D.: The use of fatigue monitoring MWM-arrays in production of NDI-Standards with real fatigue cracks for reliability studies. 16th World Conference on NDT, Montreal, Canada, Aug 30 - Sep 3, 2004
- [12] Lafontaine, G.; Samson, R.: Eddy Current Array Probes for Faster, Better and Cheaper Inspections. NDTnet, October 2000, Vol. 5 No. 10
- [13] 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
- [14] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.: Wirbelstrom-Sensorarrays, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, DGZfP-Jahrestagung, Münster, 18.-20.5.2009, P20