

Randschichtprüfung mit bildgebenden Wirbelstromverfahren - Neue Wege zur Fehlerdetektion und -bewertung

Gerhard MOOK

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

Kurzfassung. Wirbelstrombilder sind wesentlich aussagekräftiger als Signal-darstellungen in der Impedanzebene. Sie zeigen Leitfähigkeits- und Permeabilitäts-kontraste über dem Prüfbereich. Fehler in der Randschicht der Bauteile werden direkt abgebildet und können bei entsprechender Phasen- und Amplitudenkodierung des Messsignals relativ einfach bewertet werden.

Der Vortrag stellt volldigitale Wirbelstromarrays vor, die direkt an den USB-Port eines Notebooks angeschlossen werden. Die komplette Elektronik wurde in den Sensorkopf integriert. In der niederfrequenten Variante mit relativ großen Ferrit-kernspulen bieten sie hohe Prüftiefen.

1. Einführung

Wirbelstromsignale besitzen einen großen Informationsgehalt. Es ist jedoch nicht immer einfach, diesen auszuschöpfen, da sich Einflüsse verschiedener Material- und Geometrie-parameter überlagern. Bild 1 zeigt die bei der Arbeit mit Tastsensoren vorkommenden Signale im Überblick.

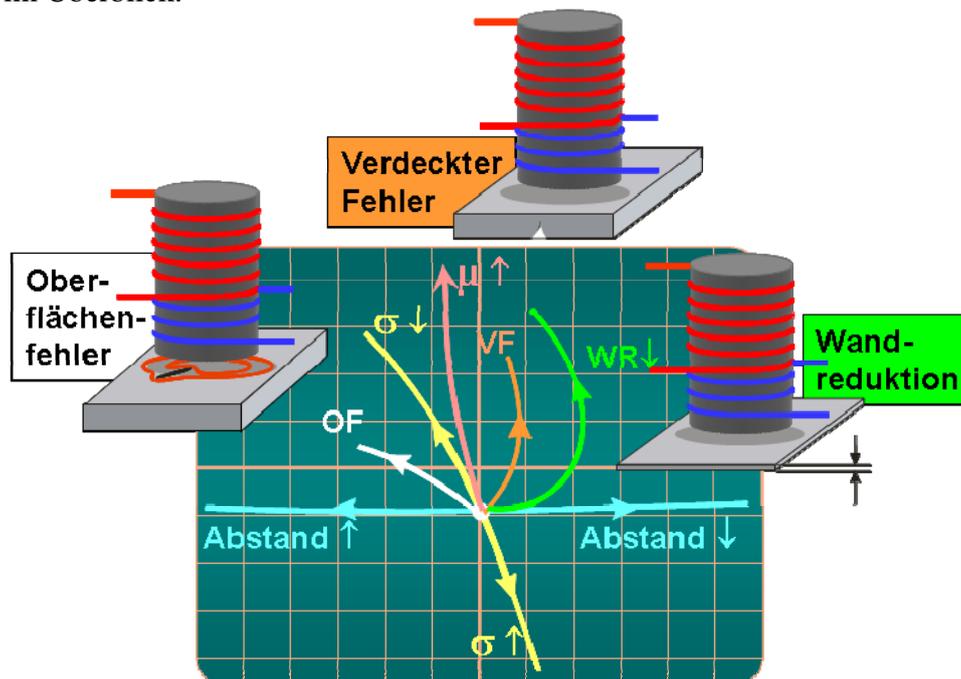


Bild 1: Wirbelstromsignale eines Tastsensors an nichtferromagnetischem Material

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. Bild 2 zeigt, wie ein Sensor zeilenweise über die Bauteiloberfläche bewegt wird. Die auf dem Gerätebildschirm entstehenden Signale werden komponentenweise aufgezeichnet und in Grau- oder Falschfarbenbilder codiert.

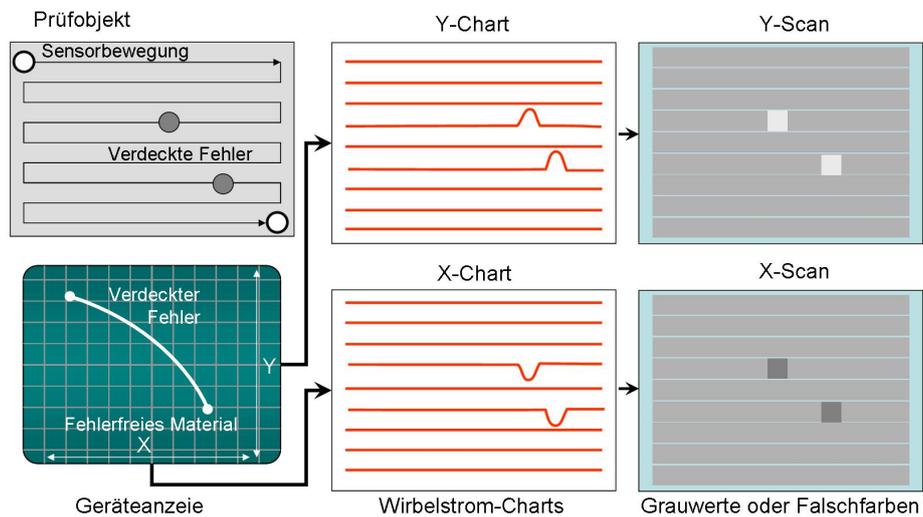


Bild 2: Wirbelstrom-Bildgewinnung mit scannendem Einzelsensor

Als Beispiel für die hohe Aussagekraft eines Wirbelstrombildes zeigt Bild 3 einen zweilagigen Aluminiumtestkörper, in den diverse Bohrungen in die Deck- und Bodenlage eingebracht wurden. In der XY-Ebene sind alle Signalwege aufgezeichnet, die beim Scannen anfielen. Es gehört einiges Wissen und Erfahrung dazu, um diese Signale richtig zu interpretieren. Das Wirbelstrombild dagegen gibt einen sofortigen Überblick über den Ort, Form und ungefähre Größe der Inhomogenität. Lediglich die Tiefeninformation, die im XY-Bild steckt, wird hier nicht wiedergegeben.

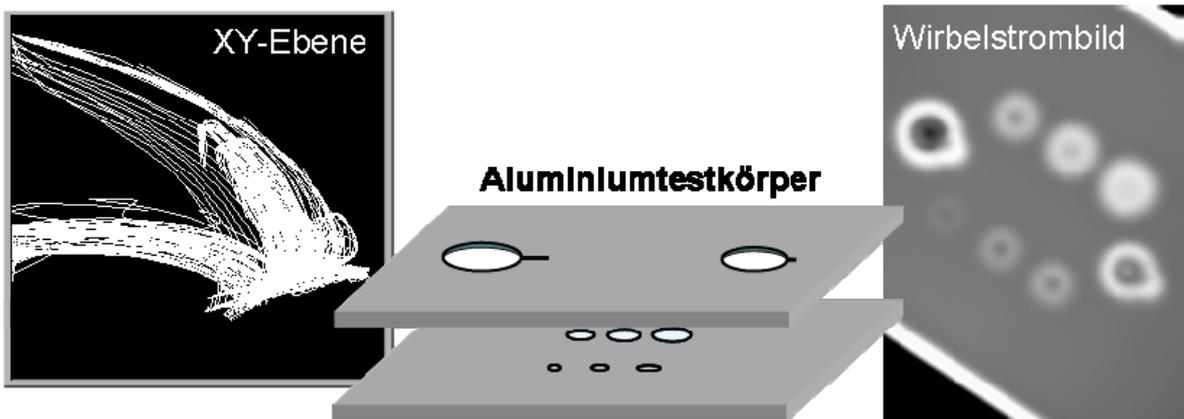


Bild 3: Wirbelstromsignal eines zweilagigen Aluminium-Testkörpers mit diversen Testfehlern. Im Original sind die Testfehler nicht sichtbar, da der Testkörper gespachtelt und lackiert wurde.

Die bei mechanischem Scannen entstehenden Bilder sind von hoher Qualität, die Scanner jedoch meist sehr teuer, langsam und wenig flexibel. Um die aufwändige Scanmechanik zu vermeiden, wurden und werden Zeilen- und Flächensensoren entwickelt [1-13].

2. Sensorzeilen

2.1 Aufbau

Anstelle des Abtastens der Oberfläche mit einem einzigen Sensor werden mehrere Sensoren zu einem Sensorarray kombiniert, dessen Elemente durch eine spezielle Elektronik multiplex angesteuert werden. Der Beitrag [14] der vorliegenden Berichte-CD zeigt, welche Sensoren und Betriebsarten für Arrays geeignet sind.

Im Rahmen des BMBF-geförderten Wachstums-kern-Projektes AL-CAST wurden zunächst 32 bzw. 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 4 zeigt den Zeilensensor und den Geräteaufbau schematisch. Ein Messrad, das ebenfalls am USB-Port betrieben wird, zeichnet die Vorwärtsbewegung der Sensorzeile auf.

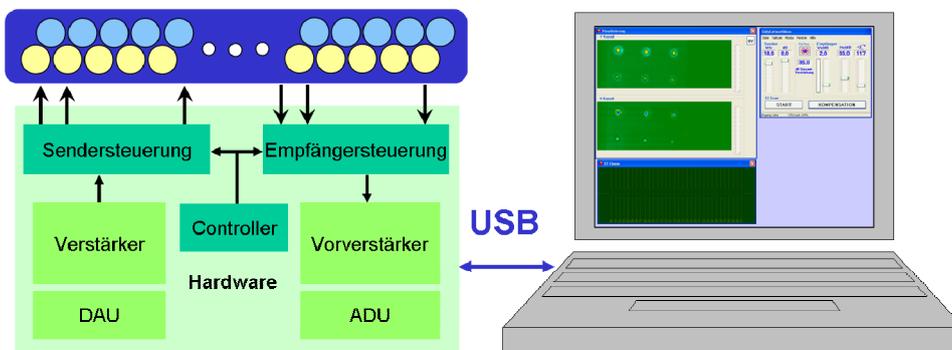


Bild 4: Schematischer Aufbau der Wirbelstromsensorzeile

Bild 5 gestattet einen Blick auf die Sensorzeilen. Zu erkennen sind die einzelnen Zylinderkernspulen und ihre Anordnung.



Bild 5: 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

2.2 Ortsauflösung und Prüftiefe

Zur Einschätzung von Ortsauflösung und Tiefenwirkung wurde ein graviertes Aluminiumblech mit 1 mm Dicke verwendet (Bild 6 links). Die Buchstaben und Ziffern

simulieren Defekte unterschiedlicher Art und Orientierung. Die erste Zahl jeder Zeile zeigt die Schriftgröße in Millimeter. Wird ein Zeilensensor über dieses Blech bewegt (Bild 6 rechts), entstehen die im Folgenden gezeigten Wirbelstrombilder.

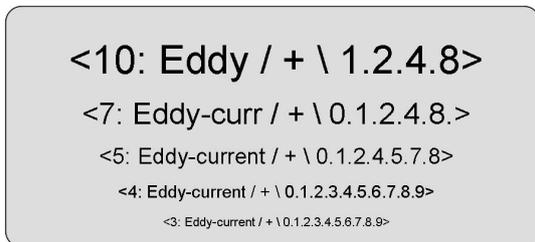


Bild 6: Links: Aluminiumblech mit Gravuren als Testfehler. Die erste Zahl der Zeile gibt die Schriftgröße in Millimeter an. Rechts: Zeilensensor 64 mit Wegaufnehmer über dem Testkörper

Liegt die Gravur oben (Bild 7a), 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.

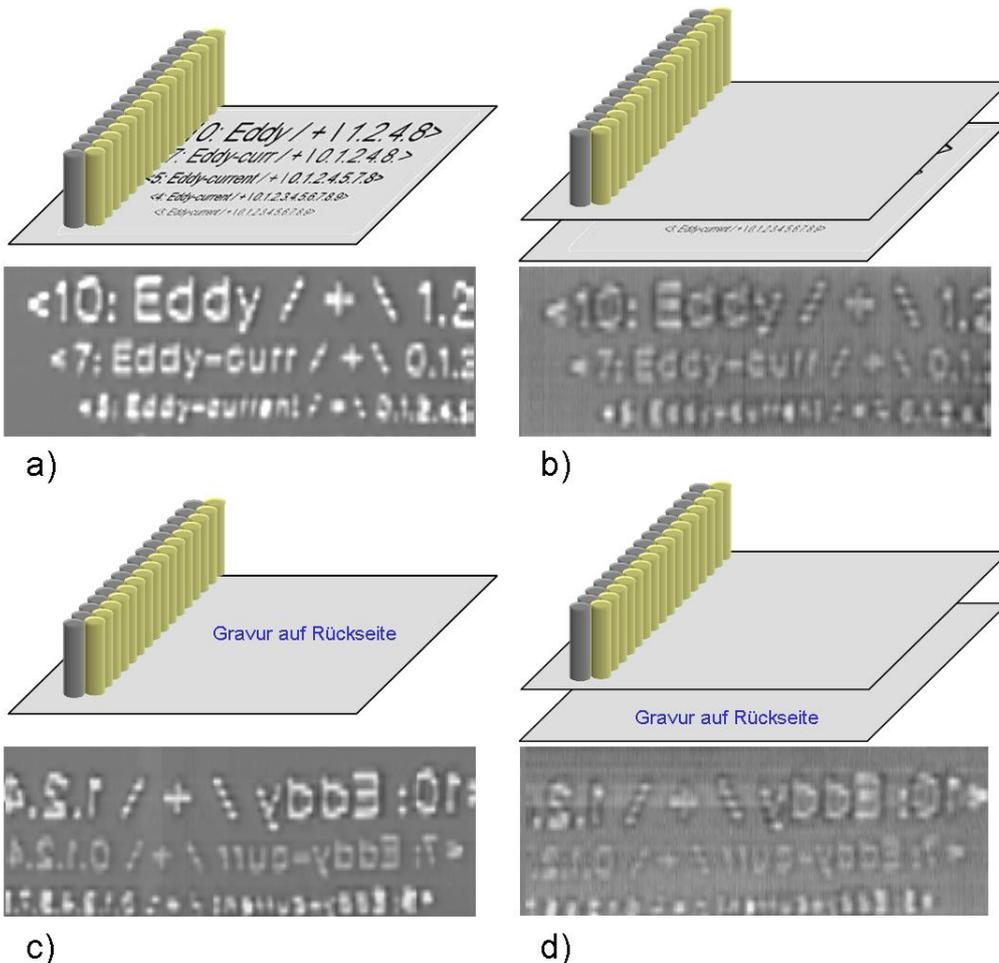


Bild 7: Ergebnisse an Aluminiumblech mit Gravuren als Testfehler.

Bild 8 vergleicht die Ortsauflösung beider Sensorzeilen. Der deutliche Gewinn bei der Sensorzeile 64 ist gut erkennbar. Die 3-mm-Schrift ist gerade noch lesbar.

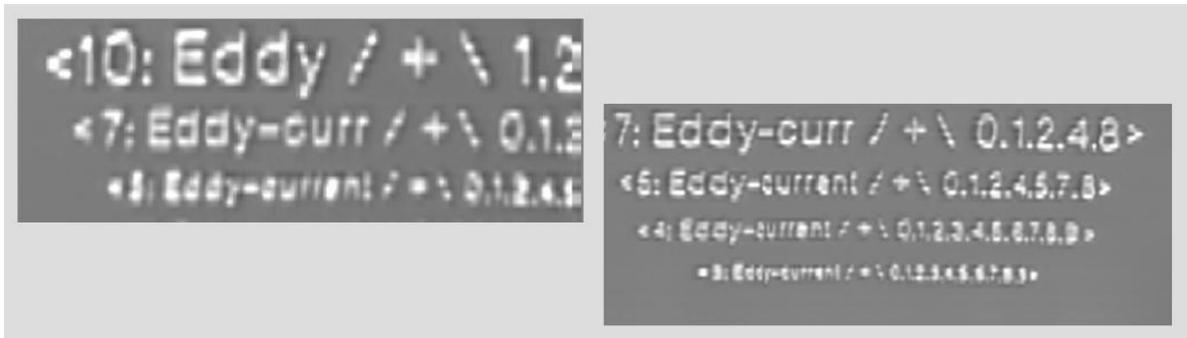


Bild 8: Vergleich der Ortsauflösung von Sensorzeile 32 (links) und Sensorzeile 64 (rechts)

2.3 Realfehler

Bild 9 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.

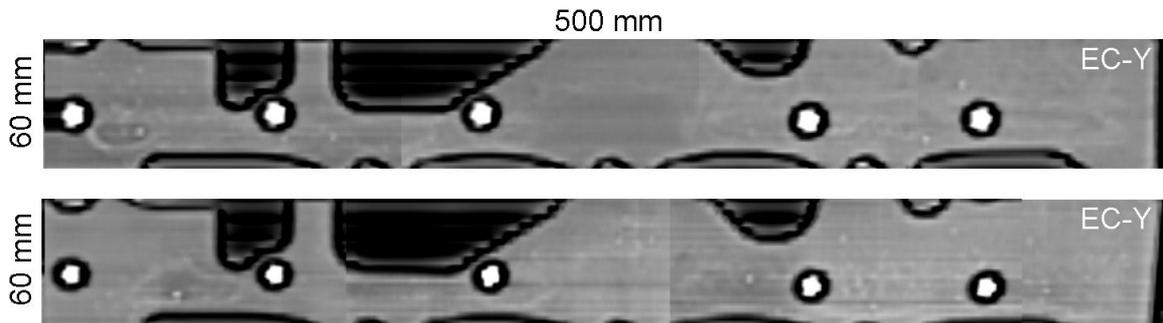


Bild 9: Visualisierung verdeckter Anomalien in zwei Zylinderkurbelgehäusen aus Aluminium-Druckguss. Neben der Geometrie sind helle Signaturen zu erkennen, die auf verdeckte Anomalien schließen lassen.

Bild 10 stellt Ergebnisse an einem anderen Aluminiumdruckgussteil mit offenen und verdeckten Poren dar (Markierung). Die übrigen Bildelemente zeigen die Bauteilgeometrie.

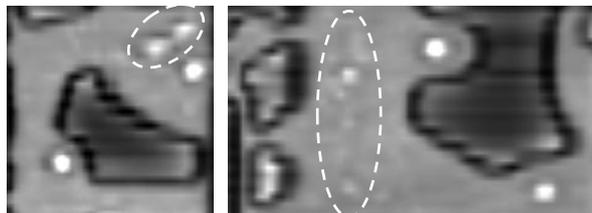


Bild 10: Wirbelstrombilder offener und verdeckter Poren in Aluminiumdruckguss

2.4 Fehlerbewertung

Anhand der bislang gezeigten Ergebnisse kann die Fehlerform und -größe bewertet werden, woraus sich Hinweise auf die Fehlerart ergeben. Die im Wirbelstromsignal enthaltene

Phaseninformation über das Ligament (Dicke der Fehlerüberdeckung, Fehlertiefenlage) wird jedoch nicht dargestellt.

Um diese Information zu visualisieren, bieten sich Farbdarstellungen an, die zunächst an einem Aluminiumblech mit verdeckten Flachbodenbohrungen erprobt wurden. Die Ligamente der Bohrungen bewegen sich zwischen 0,1 und 0,5 mm, die Durchmesser zwischen 1 und 3 mm. Bild 11 zeigt das Abtastprinzip und das Ergebnis in Form des EC-Y-Bildes. Alle Bohrungen sind erkennbar. Hinter der Farbcodierung verbirgt sich zunächst nur die Amplitude der Y-Komponente des Wirbelstromsignals.

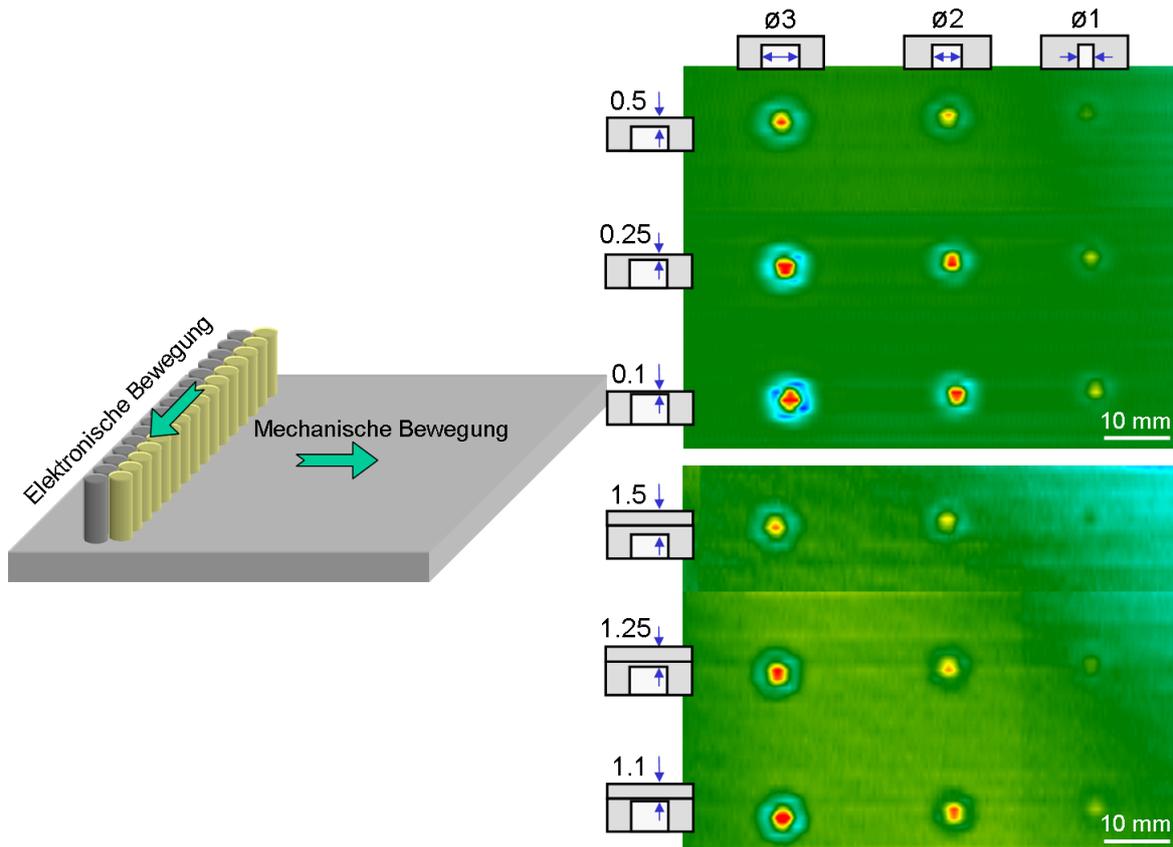


Bild 11. Visualisierung von verdeckten Flachbodenbohrungen in einem Aluminiumblech. Links: linearer Bewegungsfeldsensor, rechts: EC-Y-Ergebnisbilder

Für detailliertere Auswertungen wäre es sinnvoll, das Fehlerligament als Farbe zu kodieren, um sofort eine Aussage über die Restwanddicke treffen zu können. Das Fehlerligament spiegelt sich in der Phasenlage des Fehlersignals wieder. Wie die Phasenlage in eine Falschfarbendarstellung umgesetzt werden kann, zeigt Bild 12. Links sind die Signale dreier verdeckter 1-mm-Bohrungen zu erkennen. Das geringste Ligament hat das am weitesten links liegende Signal mit der größten Amplitude zur Folge. Mit Vergrößerung des Ligaments nimmt die Signalamplitude ab und die Phasenlage in Uhrzeigersinn zu. Gleiche Fehler erzeugen also mit zunehmendem Ligament kleinere Signalamplituden mit zunehmender Phasenverschiebung. Für eine sinnvolle Farbkodierung kann nun die Phasenlage als Farbwert und die Signalamplitude als Farbsättigung dargestellt werden. Die maximale Farbsättigung muss allerdings mit zunehmender Phasenlage bei immer kleineren Amplituden erreicht werden.

Um eine sinnvolle Phasenauswertung durchführen zu können, muss das Signal eine gewisse Mindestamplitude besitzen, die es aus dem Rauschen abhebt [11]. Diese Mindestamplitude kann interaktiv eingestellt werden.

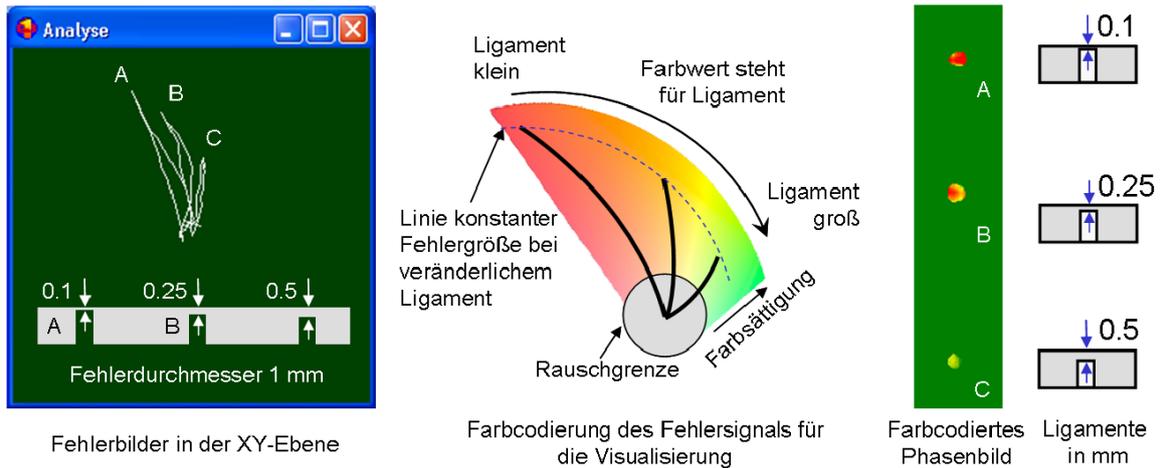


Bild 12: Anzeigen der drei 1-mm-Flachbodenbohrungen in der XY-Ebene. Zur Visualisierung werden die Signale in Farbwert und Farbsättigung codiert.

Bild 13 zeigt als praktisches Beispiel ein Aluminiumussteil, auf dessen Oberfläche visuell keine Anomalien erkennbar sind (Bild 13a). Der Bewegungsfeldsensor macht jedoch charakteristisch geformte Strukturen sichtbar (Bild 13b und c), die erst nach dem Abarbeiten von 1 mm Randschicht auch optisch wahrnehmbar werden (Bild 13d).

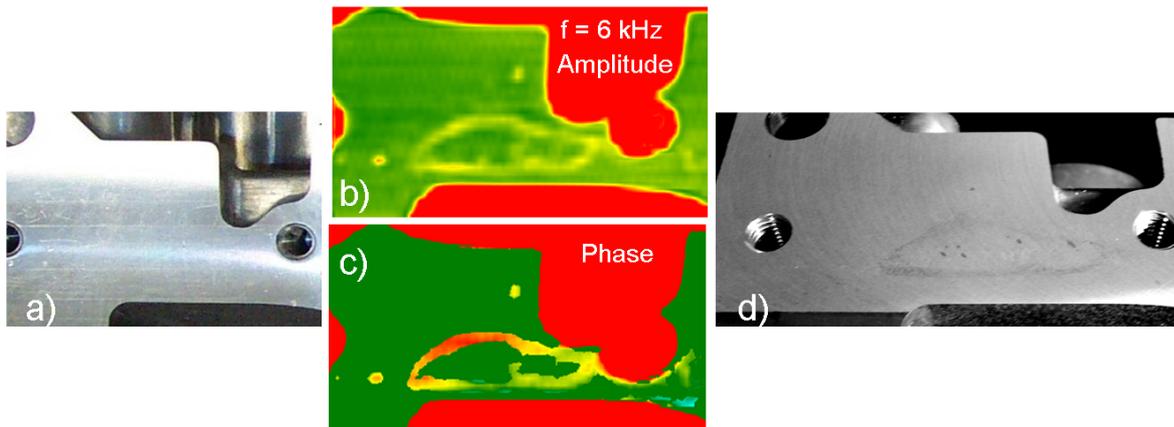


Bild 13. Visualisierung verdeckter Anomalien in Aluminiumguss, a) Foto des Prüfbereiches, b) und c) elektromagnetische Signatur des Prüfbereiches, d) Foto nach dem Abarbeiten von 1 mm Randschicht

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 14 zeigt schematisch mögliche Anwendungen gekrümmter Sensorzeilen. Über die Entwicklung eines gekrümmten Arrays für die Rohrrinnenprüfung berichtet der Beitrag [15] auf der vorliegenden Berichte-CD.

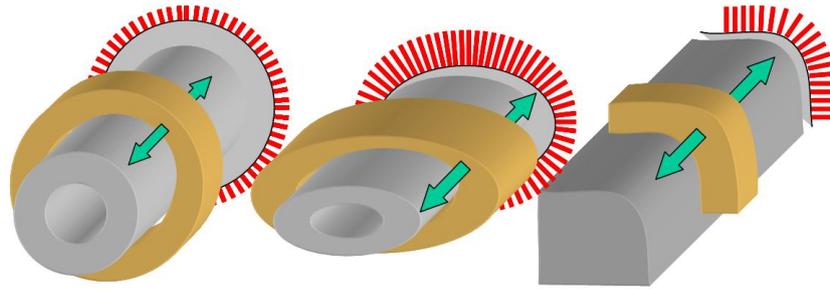


Bild 14: Mögliche Anwendungen gekrümmter Sensorzeilen

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 Einzelelemente sowie aller unmittelbaren Nachbarn (Halbtransmission) eine Bildaufbauzeit von 0,64 Sekunden.

3.1 Ebene Arrays

Bild 15 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 15: Das 2D-Array liefert ein komplettes Wirbelstrombild in 0,64 Sekunden

Bild 16 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.

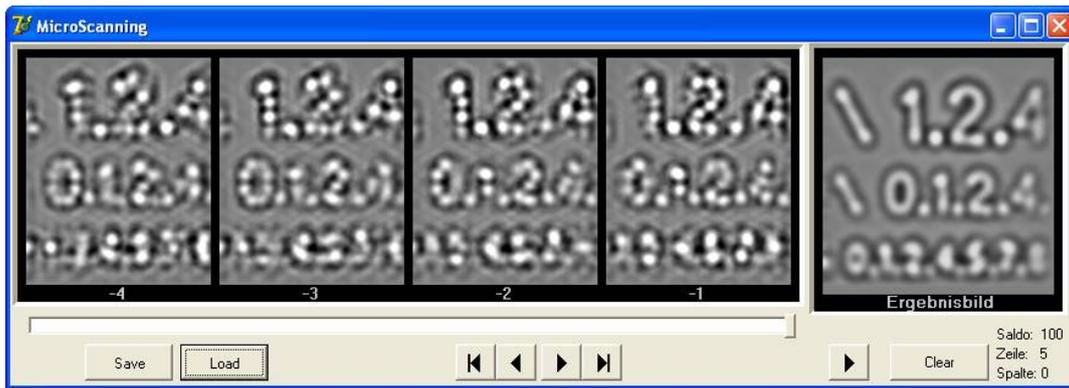


Bild 16: Halbtransmissionsbetrieb des 2D-Arrays. Links: Sequenz aus aufeinanderfolgenden Wirbelstrombildern bei minimalem Versatz des Arrays. Rechts: Gewichtet gemittelttes Ergebnisbild nach dem Prinzip des MicroScannings [14]

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 17. Wird der Sensor schnell bewegt, ist die Bildqualität gering. Gibt es Anhaltspunkte für eine Fehlstelle, liefert eine langsamere Sensorbewegung automatisch bessere Bilder. Damit ist eine optimale Kombination aus Prüfgeschwindigkeit und Abbildungsqualität gewährleistet. Der Umsetzung dieses Gedankens widmet sich der Beitrag [15] auf der vorliegenden Berichte-CD.

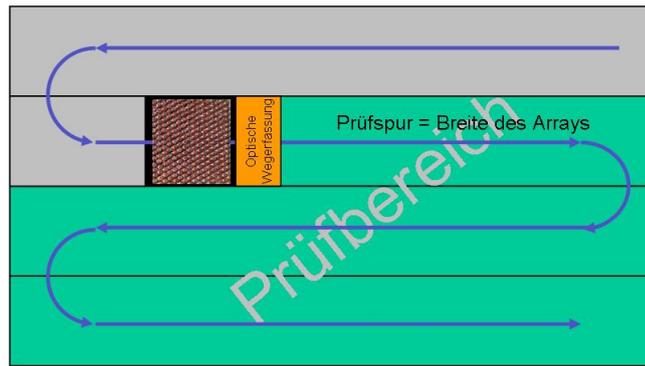


Bild 17: Prinzip der Abbildung eines großen Prüfbereiches mit Hilfe eines Arrays. Ein z. B. optischer Sensor ermittelt die Verschiebung des Arrays und ist die Basis für das MicroScanning (siehe auch [15]).

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 18 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.

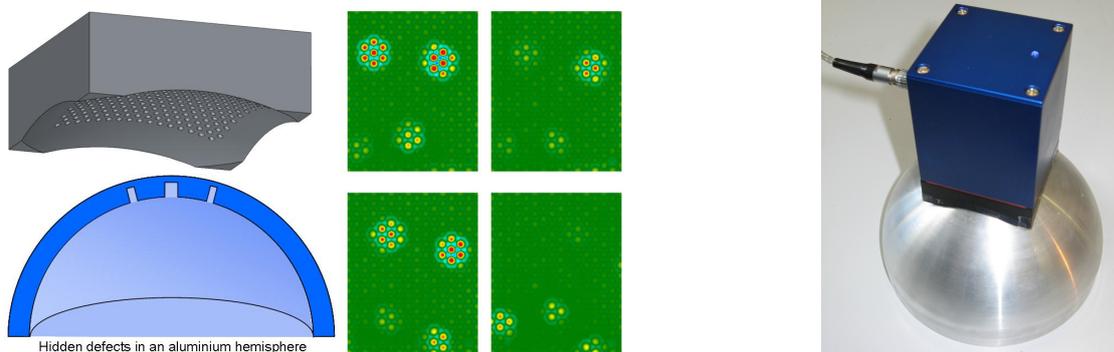


Bild 18: Wirbelstrom-Freiformarray zur bildgebenden Prüfung nicht ebener Bauteilbereiche. Links: Array und Testkörper, Mitte: Wirbelstrombilder verdeckter Testfehler, rechts: Foto der Prüfsituation

Weitere Anwendungen von Freiformarrays werden in Bild 19 angedeutet. Links ist eine Bauteillecke dargestellt, auf die ein entsprechend geformtes Array aufgesetzt werden kann. Auch für komplizierte Freiformflächen wie Turbinenschaufeln erscheint die Arraytechnik geeignet.

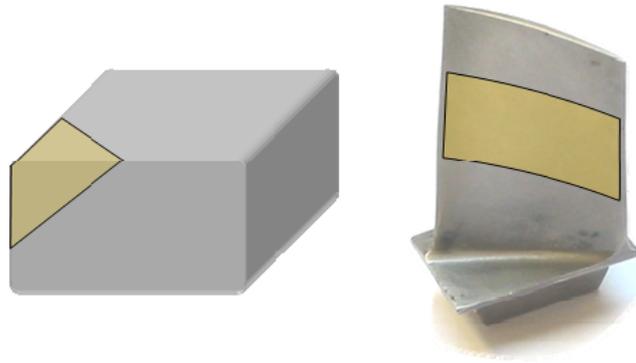


Bild 19: Wo weder mechanisch gescannt noch per Sensorzeile geprüft werden kann, können Freiformarrays zum Zuge kommen. Der Prüfbereich ist gelb gekennzeichnet.

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.; Aid, 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.; Lakhani, 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
- [15] Mook, G.; Rost, P.; Michel, F.; Simonin, J.: Niederfrequente Wirbelstrom-Arrays mit Videotakt, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, DGZfP-Jahrestagung, Erfurt, 10.-12.5.2010, Mo.3.A.2