

Detektion und Interpretation von Wirbelstromsignalen in mehrlagigen Strukturen

Gerhard MOOK, Fritz MICHEL
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Werkstoff- und Füge­technik, PF 4120, 39016 Magdeburg
e-mail: mook@ovgu.de

Kurz­fassung. Im Her­stellungsprozess mehrlagiger Strukturen kann es bei der Schichterzeugung zu lokalen Anomalien in der Deckschicht kommen. Unabhängig vom Schädi­gungspotential dieser Anomalien dient ihr Auftreten als ein Kriterium zur Optimierung der Anlagenparameter. Voraussetzung zur Nutzung dieses Kriteriums ist jedoch ihr sicherer zerstörungsfreier Nachweis.

Wegen seiner hohen Aussagekraft und guten Automatisierbarkeit bietet sich dazu das Wirbelstromverfahren an. Der Forschungsbedarf ergibt sich aus der Kombination unterschiedlicher elektrischer Eigenschaften von Grund- und Schichtwerkstoff und den schwer prognostizierbaren Signaleigenschaften. So ist zu klären, welche Signale beim Aufbringen einer gut leitfähigen Deckschicht auf eine schlecht leitfähige Unterlage und umgekehrt zu erwarten sind und mit Hilfe welcher Sensorik diese optimal detektiert und interpretiert werden können.

Der Beitrag gibt eine Einführung in die Signalbildung und vergleicht diese mit praktischen Ergebnissen.

1. Einführung

Die Prüfung von Schichtsystemen stellt hohe Anforderungen an jedes zerstörungsfreie Prüfverfahren. Für die Wirbelstromprüfung trifft dies in besonderem Maße zu, da die Wirbelstromdichte und damit die Prüfempfindlichkeit in Oberflächennähe viel größer als in den darunter liegenden Bereichen ist (Skin­effekt). Zunächst muss sichergestellt werden, dass im Grundwerkstoff eine hinreichende Wirbelstromdichte existiert, die Messsignale mit auswertbarem Signal-Rausch-Verhältnis ermöglicht. Dabei spielt der Ort der Gewinnung des Messsignals eine wichtige Rolle. Neben den bekannten koaxialen Sensoren finden immer mehr Halbtransmissionsensoren Anwendung, die zur Gruppe der koplanaren Sensoren gehören [1-3].

Eine andere Herausforderung besteht in der Interpretation der Signale. Werden Defekte im Grundwerkstoff gesucht, widerspiegeln sich auch immer die Eigenschaften der Deckschicht im Messsignal. Für deren Unterdrückung gibt es kein allgemeingültiges Rezept.

Werden dagegen Defekte in der Deckschicht gesucht, wird durch hohe Prüffrequenzen versucht, den Einfluss des Grundwerkstoffs zu unterdrücken. Dies funktioniert dann nicht mehr, wenn ein Defekt in der Deckschicht den Skin­effekt soweit reduziert, dass das Feld in den Grundwerkstoff eindringen kann. Damit bekommt der Grundwerkstoff einen unerwarteten Anteil am Signalbildungsprozess. Bei näherer

Betrachtung zeigt sich, dass sich dadurch gewohnte Signalrichtungen in der XY-Ebene dramatisch verändern können.

2. Sensoren für mehrlagige Strukturen

Am häufigsten findet man in der Wirbelstromprüfung koaxiale Sensoren. Bei diesem Typ sind Sende- und Empfangswicklung auf einer gemeinsamen Achse untergebracht. Bild 1 zeigt links exemplarisch einen derartigen Sensor. Häufig werden Ferritkerne genutzt, um die Spuleninduktivität trotz der niedrigen Frequenzen hoch zu halten. Das Empfindlichkeitsprofil, genauer, die Punktspreizfunktion, hat die Form eines Kraters. Direkt unter den Windungen besitzt der Sensor seine höchste Empfindlichkeit.

Anders der koplanare Sensor, auch Halbtransmissionssensor genannt, der in Bild 1 rechts dargestellt wird. Seine Punktspreizfunktion besitzt die Form eines Sombreros, dessen Spitze zwischen Sender und Empfänger liegt [1, 3], unabhängig davon, welcher Abstand zwischen Sender und Empfänger besteht. Wie verhält es sich mit der Prüftiefe beider Sensortypen?

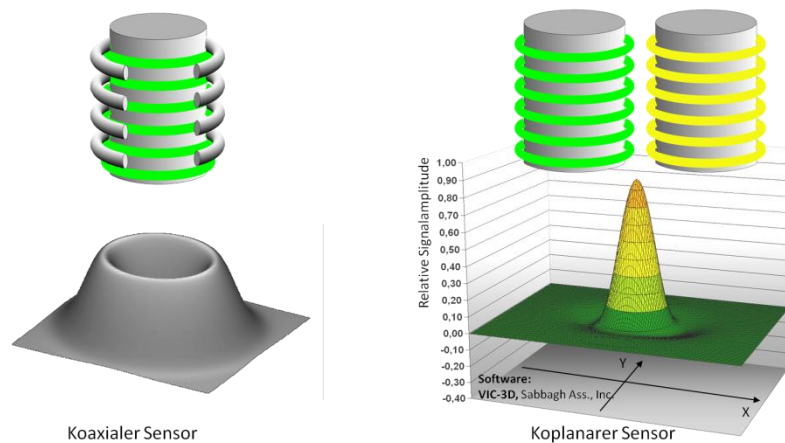


Bild 1: Aufbau und Punktspreizfunktionen des koaxialen und des koplanaren Sensors

Bild 2 vergleicht die Verteilung der magnetischen Feldlinien bei beiden Sensortypen. Auf die Darstellung der Wirbelstromverteilung wird verzichtet, da sie in beiden Fällen prinzipiell identisch ist. Während die Empfangswicklung des koaxialen Sensors von fast allen Feldlinien der Sendewicklung durchsetzt wird, „sieht“ der koplanare Empfänger nur diejenigen Feldlinien, die auch in große Materialtiefen vorgedrungen sind. Die restlichen Feldlinien erreichen ihn nicht. Somit ergibt sich für den koplanaren Empfänger der Vorteil, dass der gesamte Fluss, der ihn erreicht, Informationen aus großer Materialtiefe trägt. Da dieser Fluss gering ist, kann das Messsignal hoch verstärkt werden [4-9].

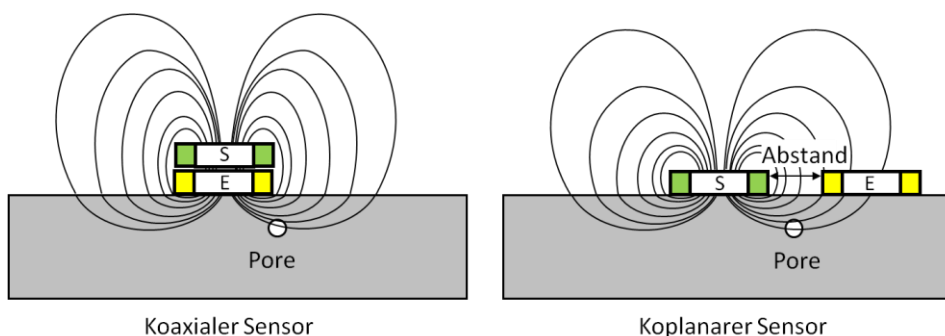


Bild 2: Die Empfangsspule registriert verschiedene Flussanteile der Sendespule

Der koaxiale Empfänger dagegen wird von einem starken Fluss durchsetzt, von dem nur ein geringer Teil bis in tiefe Regionen vorgedrungen ist. Diesen herauszufiltern ist kaum möglich.

Ein weiterer Vorteil des koplanaren Sensors ist seine innewohnende Arrayfähigkeit. Natürlich kann auch der koaxiale Sensor in Arrays angeordnet werden, es ergeben sich aber keine Abbildungsvorteile gegenüber dem Einzelsensor [10, 11]. Bild 3 zeigt, dass eine Zeile aus koaxialen Sensoren nur die Ortsauflösung des Einzelsensors reproduziert. Zwischen den Sensoren entstehen Lücken. Der koplanare Sensor kann in zwei Zeilen angeordnet werden, eine stellt die Sender, die andere die Empfänger dar. Durch gezieltes Ansteuern von Sender-Empfängerpaaren wandert der Empfindlichkeitspunkt, der eigentliche Sensor, um einen halben Schritt vorwärts. Die blassroten Punkte in Bild 3 deuten dieses Verhalten an. Es entsteht eine Sensorzeile mit doppelter Dichte und entsprechend höherer Ortsauflösung.

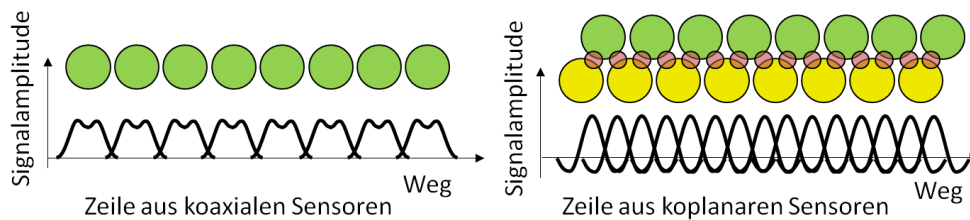


Bild 3: Ortsauflösung eines Arrays aus koaxialen und koplanaren Sensoren

Die offensichtlichen Vorteile des koplanaren Sensors hinsichtlich Prüftiefe und Abbildungsfähigkeit geben Veranlassung, sein Signalverhalten mit dem des koaxialen Sensors zu vergleichen.

3. Isotropie der Empfindlichkeit

Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass die Empfindlichkeit des koaxialen Sensors isotrop ist, während der koplanare Sensor eine ausgeprägte Vorzugsorientierung besitzt. Diese wirkt sich nur bei anisotropen Materialeinflüssen aus. So kann z.B. die Faserorientierung in CFK bestimmt werden, da hier die elektrische Leitfähigkeit stark anisotrop ist [12, 13]. Bei der Prüfung auf Poren spielt die Anisotropie so gut wie keine Rolle, Risse dagegen sind prinzipiell orientiert, hier wirkt sich die Sensoranisotropie stark aus.

4. Vergleich typischer Signale

Zunächst werden bekannte Signale des Tastsensors verglichen. Dazu gehören das Abhebesignal, die Signale von Oberflächenrissen, verdeckten Poren und Wandreduktionen. Hier sollten sich bereits bestimmte Vor- und Nachteile der beiden Sensortypen erkennen lassen.

4.1 Abhebesignal (Lift-off)

Das Abhebesignal ist das meistgenutzte Bezugssignal bei der Arbeit mit dem Tastsensor. Der koaxiale Sensor liefert ein weitgehend geradliniges Signal, das sich erst bei größerem Abstand krümmt. So kann dieses Signal auf den negativen Teil der x-Achse gedreht werden und liefert nur vernachlässigbar kleine y-Anteile. Bild 4 zeigt als Beispiel eine Sammlung von Abhebesignalen verschiedener nicht ferromagnetischer Werkstoffe.

Beim Halbtransmissionssensor ist das Abhebesignal viel stärker gekrümmt, wobei die Krümmung auch hier mit zunehmendem Abstand stärker wird. Soll der Abhebeeinfluss durch Phasenselektion unterdrückt werden, darf sich der Abstand zum Prüfobjekt nur in geringem Maße ändern. Kann dies nicht gewährleistet werden, müssen andere Unterdrückungsverfahren angewandt werden.

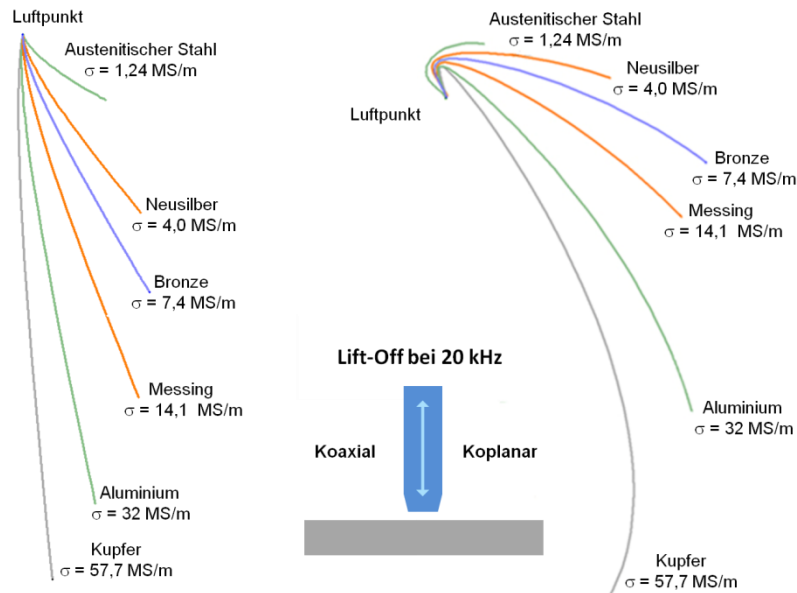


Bild 4: Abhebesignale (Lift-Off) des koaxialen (links) und koplaren Sensors (rechts) von nicht ferromagnetischen Werkstoffen

4.2 Oberflächenrisse

Oberflächenrisse sind mit dem koaxialen Sensor an ihrem nach links oben gerichteten Signal zu erkennen. Sie erzeugen also eine nennenswerte y-Komponente, die zur Charakterisierung des Fehlers herangezogen werden kann. Der Winkel zum Lift-off entscheidet über die Bemerkbarkeit des Rissignals und kann durch die Frequenzwahl optimiert werden. Besser erkennbar wird das Rissignal durch eine zusätzliche y-Verstärkung (y-Spreizung), die den Winkel zum Lift-off größer erscheinen lässt. Hier ist das weitgehend lineare Lift-off-Signal von großer Wichtigkeit, damit durch die Achsspreizung keine abhebebedingten y-Anteile entstehen.

Der koplare Sensor liefert zwar auch gegenüber dem Lift-off phasengedrehte Signale, an eine Achsspreizung ist jedoch nur bei geringen Lift-off-Werten denken. Die Unterscheidbarkeit von Lift-off- und Rissignal ist schlechter als beim koaxialen Sensor.

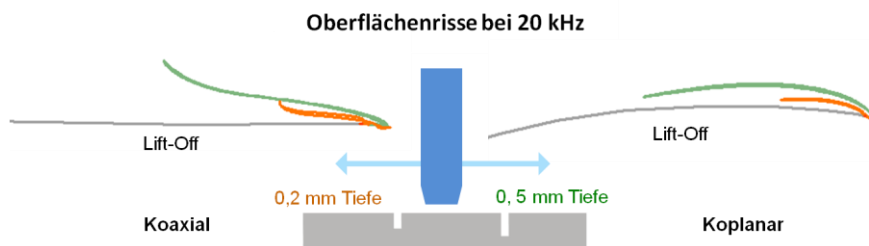


Bild 5: Oberflächenrisssignale des koaxialen (links) und koplaren Sensors (rechts) an Aluminium

4.3 Verdeckte Poren

Die Detektion und Bewertung verdeckter Poren spielt in der Leichtmetall-Gussteilprüfung eine zunehmende Rolle. Der koaxiale Sensor liefert stark gekrümmte Signale, deren Amplitude direkt über der Pore einbricht. Das liegt daran, dass eine mittig unter dem Sensor positionierte Pore von den Wirbelströmen umflossen wird und deren Dichte oder Verlauf kaum ändert. Erst bei außermittiger Porenlage wird der Wirbelstromverlauf nennenswert beeinflusst und ein auswertbares Signal entsteht.

Hier zeigt der koplanare Sensor seine Stärken. Liegt die Pore mittig zwischen Sender und Empfänger, beeinflusst sie den Wirbelstromverlauf sehr stark. Ein Teil der Wirbelstromfäden wird in Richtung Empfangsspule verzerrt, so dass ein deutliches Messsignal ohne Einbruch entsteht. Der Phasenwinkel zum Lift-off ist groß, die Spreizung der Signale unterschiedlich tief liegender Poren ist auswertbar.

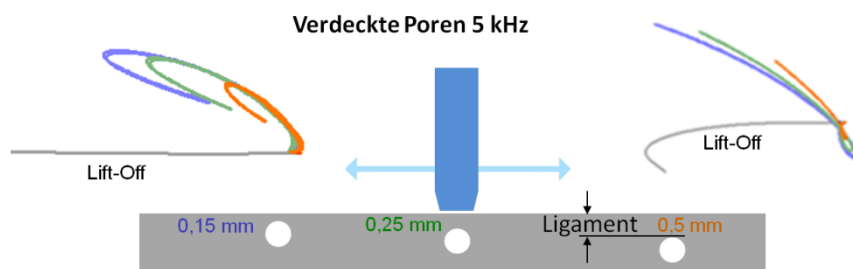


Bild 6: Signale verdeckter Poren in Aluminium. Links: koaxialer Sensor, rechts: koplanarer Sensor

4.4 Wandreduktion

Ähnlich wie Poren können auch Korrosionsprozesse die Restwanddicke verringern. Diese zu bestimmen, wird in vielen Wirbelstromanwendungen angestrebt. Der koaxiale Sensor liefert ein sehr deutliches, gegenüber dem Lift-off stark phasengedrehtes Signal, das gut bewertbar ist. Der koplanare Sensor erzeugt ein weniger stark gedrehtes Signal, das an schroffen Wanddickenübergängen zusätzliche Komponenten enthält, die die Interpretation erschweren.

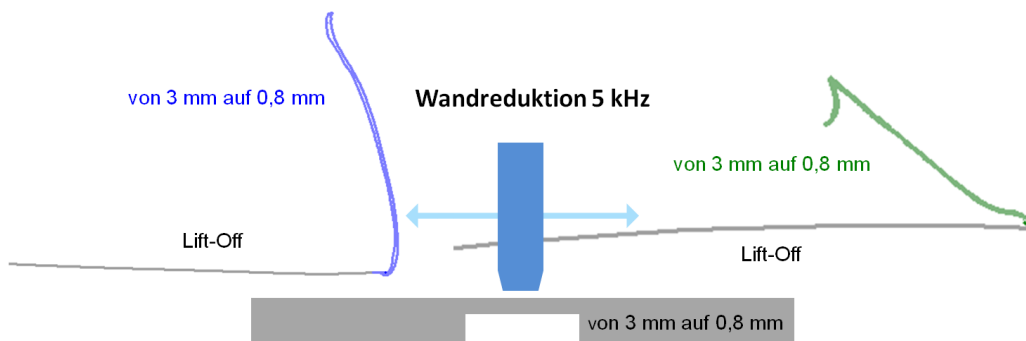


Bild 7: Signale einer Wandreduktion in Aluminium. Links: koaxialer Sensor, rechts: koplanarer Sensor

5. Signale aus Schichtsystemen

Aus der Vielzahl technisch relevanter Schichtsysteme seien hier zwei Systeme ausgewählt, die zu interessanten Erkenntnissen geführt haben. Zum einen handelt es sich um ferromagnetische Beschichtungen auf nicht ferromagnetischem Grundwerkstoff und zum anderen um schlecht leitende Beschichtungen auf gut leitendem Grundwerkstoff. In letzterem Falle sind beide Werkstoffe nicht ferromagnetisch. Die zu lösenden Aufgaben bestehen in der Schichtdickenbestimmung und der Detektion und Charakterisierung von Anomalien.

5.1 Dickenbestimmung ferromagnetischer Schichten auf nicht ferromagnetischem Grundwerkstoff

Die Dicke der ferromagnetischen Beschichtung liegt unterhalb eines halben Millimeters, so dass eine niederfrequente Wirbelstromprüfung möglich erscheint. Es ist die Frage zu beantworten, ob sich das Abhebesignal vom Schichtdickeneinfluss trennen lässt oder nicht. Bild 8 zeigt links die Signale des koaxialen Sensors im Überblick und im Detail. Aus dem Überblicksbild ist zu erkennen, dass der koaxiale Sensor nur dann einen weitgehend geradlinigen Lift-off liefert, solange das Material entlang der Wirktiefe eine konstante Permeabilität besitzt. Ändert sich die Permeabilität in Tiefenrichtung, wird der Lift-off krummlinig. Schichtdicken- und Lift-off-Einfluss lassen sich nur in Schichtdickenbereichen gut unterscheiden, wo in beiden Werkstoffen ein hinreichend starkes Wirbelstromfeld herrscht. Sehr geringe und sehr große Schichtdicken liefern Signalrichtungen, die vom Lift-off kaum zu trennen sind.

Die Lift-off-Signale des koplarenen Sensors sind in jedem Schichtdickenbereich stark gekrümmt, was ihre Unterdrückung erschwert. Der Schichtdickeneinfluss besitzt jedoch stets eine andere Richtung als der Lift-off, so dass er in jedem Dickenbereich gut vom Lift-off unterscheidbar ist.

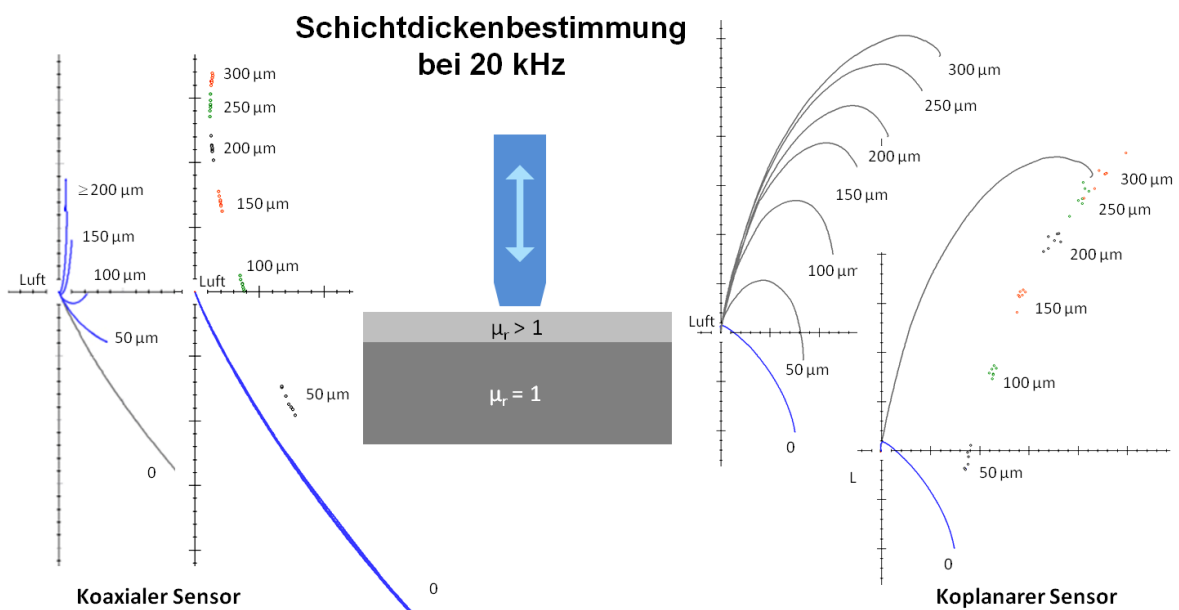


Bild 8: Abhebe- und Schichtdickeneinfluss auf das Wirbelstromsignal. Die Maßangaben beziehen sich auf die Schichtdicke, die Abhebesignale sind auf den Luftpunkt gerichtet.

Links: koaxialer Sensor, rechts: koplarenen Sensor

5.2 Risse in schlecht leitenden Schichten auf gut leitendem Grundwerkstoff

Schichtsysteme aus nicht ferromagnetischen Werkstoffen sind wirbelstromtechnisch bis zu einigen Millimetern Tiefe bildgebend prüfbar. Aufgrund unterschiedlicher Leitfähigkeiten von Schicht- und Grundwerkstoff kann es zu ungewöhnlichen Signalkonstellationen kommen.

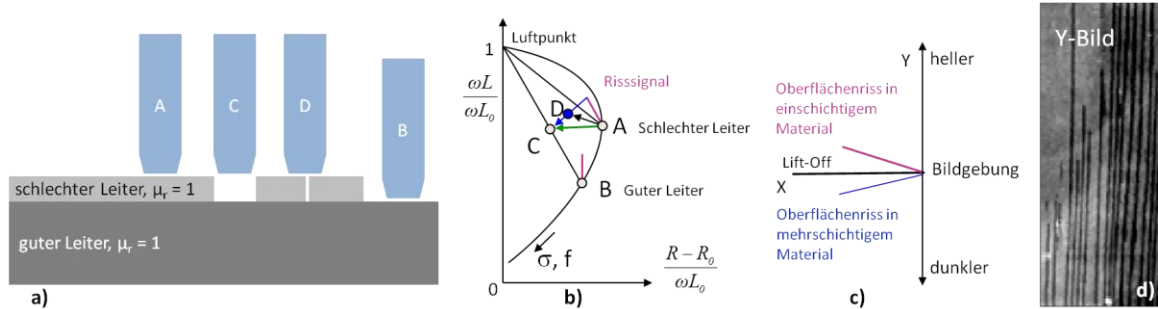


Bild 9: Einfluss von Rissen in schlecht leitender Beschichtung auf besser leitendem Grundwerkstoff, a) Prüfsituationen: Sensor auf der rissfreien Schicht (A), Sensor auf dem Grundwerkstoff (B), Sensor mit Lift-off über dem Grundwerkstoff (C), Sensor auf Riss in der Beschichtung (D), b) Signale in der normierten Impedanzebene, c) Signale in der XY-Ebene auf dem Gerätebildschirm, d) Wirbelstrom-Y-Bild einer rissbehafteten Beschichtung

Bild 9a) zeigt die relevanten Situationen eines Tastsensors über einer rissbehafteten Schicht. In der normierten Impedanzebene in Bild 9b) sind die entsprechenden Impedanzwerte dargestellt. Die Sensorpositionen A und B liefern Signale auf der Frequenz-Leitfähigkeitslinie (σ, f) bei einem Lift-off nahe Null. Zwischen der Lift-off- und der Leitfähigkeitslinie in Richtung Luftpunkt liegen die Signale von Oberflächenrissen (magenta). Dreht man die Lift-off-Linie in den negativen Teil der x-Achse der XY-Ebene eines Wirbelstromgerätes (Bild 9c), so liefern die Oberflächenrisse positive y-Komponenten. Würde man ein Wirbelstrombild generieren, zeichneten sich die Risse als helle Linie ab.

Risse in einer schlechter als das Grundmaterial leitenden Deckschicht generieren eine negative y-Komponente, so dass sie sich als dunkle Linien im Wirbelstrombild 9d) abzeichnen. Warum ist das so? Der Riss in der Deckschicht behindert die Wirbelstromausbreitung in ihr. Die Ströme müssen zumindest teilweise in den Grundwerkstoff abtauchen. Im Extremfalle einer lokal fehlenden Deckschicht (Position C des Bildes 9a) entsteht ein Impedanzwert, der auf der Lift-off-Linie vom Punkt B aus liegt. Ein Riss, wie er in Position D skizziert ist, muss die Wirbelstromausbreitung in der Deckschicht nicht vollständig unterbinden und erzeugt somit lediglich eine Impedanzveränderung in Richtung des Punktes D, ohne diesen zu erreichen. Auf dem Gerätebildschirm 9c) ist dennoch ein Signal mit negativer y-Komponente zu erkennen, aus dem die dunklen Risslinien im Wirbelstrombild 9d) entstehen.

6. Schlussfolgerungen

Koaxiale und koplanare Sensoren besitzen spezifische Stärken und Schwächen. Der konkrete Einsatzfall muss über ihre Anwendung entscheiden. Die Stärken des koaxialen Sensors liegen in seinem weitgehend linearen Lift-off-Signal, seiner Orientierungsunabhängigkeit und der großen Phasenaufspreizung verdeckter Wandreduktionen. Die Stärken des koplanaren Sensors sind die hohe Prüftiefe, die sehr empfindliche Detektion verdeckter Poren, die guten Abbildungseigenschaften mit einer „freundlichen“ Punktspreizfunktion und einer die flächenbezogene Spulendichte übersteigenden Sensorpunktdichte.

Bei der Untersuchung von ferromagnetischen Schichten auf nicht ferromagnetischem Grundwerkstoff liefert der koplanare Sensor besser trennbare Lift-off- und Schichtdickensignale als der koaxiale Sensor.

Bei der Rissprüfung von Schichtsystemen können mit beiden Sensorarten unerwartete Signalkonstellationen entstehen, die bis zur Umkehr der bekannten Signalrichtung reichen und im Einzelfall aufgeklärt werden müssen.

Referenzen

- [1] Thomas, H.-M.; Weigelt, G.: Anwendung von Wirbelstromverfahren zur quantitativen Bestimmung der Tiefenausdehnung von Korrosionsschäden an Aluminiumstrukturen. DECHEMA-Abschlussbericht 11L08-4, Mai 1991
- [2] Reimche, W.; Duhm, R.; Zwoch, S.; Bernard, M.; Bach, F.: Development and Qualification of a Process-Oriented Nondestructive Test Method for Weld Joints to Operate With Remote Field Eddy Current Technique. 9. ECNDT, Berlin, 25.-29.9.2006, paper Fr.1.7.2
- [3] Mook, G.; Hesse, O.; Uchanin, V.: Deep Penetrating Eddy Currents and Probes. 9. ECNDT, Berlin, 25.-29.9.2006, paper 176
- [4] Mook, G.; Simonin, J.; Michel, F.; Luther, M.; Borchert, C.: Visualisierung von Randschichtfehlern in Aluminiumguss. Berichte der DGZfP-Jahrestagung, 14.-16.5.2007, Fürth, V17
- [5] Feist, W. D.; Mook, G.; Hinken, J. H.; Simonin, J.; Wrobel, H.: Electromagnetic detection and characterization of tungsten carbide inclusions in non-ferromagnetic alloys. *Advanced Engineering Materials* 7 (2005) 9, pp 841-846
- [6] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.; Krüger, M.; Luther, M.: Visualization of Hidden Anomalies. 2nd Dresden Airport Seminar: Reliability, Testing, Monitoring of Aerospace Components. Airport Dresden, 15. November 2006
- [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] Mook, G.; Michel, F.; Simonin, J.; Krüger, M.; Luther, M.: Subsurface Imaging using Moving Electromagnetic Fields and Surface Acoustic Waves, 4th International Conference in Non-Destructive Testing, Stuttgart, Germany, April 2-4, 2007
- [10] Scholz, A. 1990. Sondenmatte - neuer Weg für die Oberflächenprüfung mit Wirbelstrom. DGZfP-Jahrestagung Trier 21.-23.5.1990
- [11] Leclerc, R.; Samson, R.: Eddy Current Array Probes for Aircraft Applications, 15th WCNDT, Rome, 15-21 October 2000
- [12] Lange, R.; Mook, G.: Structural Analysis of CFRP Using Eddy Current Methods. *NDT&E international* 27 (1994) 5, S. 241-248
- [13] Mook, G.; Lange, R.; Koeser O.: Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents. *Composites Science and Technology* 61 (6) (2001) pp.865-873