

# Elektromagnetischer Bewegungsfeldsensor zur Bildgewinnung

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

**Kurzfassung.** Der Beitrag stellt einen induktiven Zeilensensor vor, der auf einem kostengünstigen volldigitalen Wirbelstromgerät basiert. Die auf ein Minimum reduzierte Hardware wird als USB-Box an ein Notebook angeschlossen, das die Signalgenerierung, -erfassung, -aufbereitung und -darstellung übernimmt. Die Leistungsfähigkeit des Sensors wird anhand von Testkörpern und Originalteilen gezeigt. So sind verdeckte Poren mit Ligamenten bis über 1 mm sicher nachzuweisen. Der Sensor kann mit einer Geschwindigkeit von mehr als 10 mm pro Sekunde über die Oberfläche bewegt werden und zeichnet beide Signalkomponenten auf. Die gewonnenen Bilddaten können analysiert und gespeichert werden und stehen für vergleichende Auswertungen zur Verfügung.

## 1. Einführung

Das Wirbelstromverfahren ist in der Lage, nicht nur die Bauteiloberfläche auf Fehlstellen wie Risse oder offene Poren zu untersuchen, sondern auch einige Millimeter tief in das Material hinein zu „schauen“. Dazu genügt die einseitige Zugänglichkeit des Bauteils, Koppelmittel werden nicht benötigt. Im Gegensatz zur Röntgentechnik oder Thermografie muss jedoch zur Bildgewinnung ein Sensor systematisch über die Oberfläche bewegt werden, wozu aufwändige Scanner verwendet werden. Schritte auf dem Weg zum bildgebenden Wirbelstromsensor bilden Zeilen- und Flächensensoren, die die prinzipielle Machbarkeit der elektronischen Feldbewegung demonstrieren [1, 2]. Ihr Nachteil ist jedoch der hohe Systempreis.

Dank der in den letzten Jahren rasant gestiegenen Rechenleistung moderner Prozessoren sind heute selbst Notebooks in der Lage, komplexe Operationen wie die Demodulation von Wirbelstromsignalen, deren Aufbereitung und grafische Darstellung in Echtzeit auszuführen.

## 2. Sensorelement

### 2.1 Punktspreizfunktion

Für die bildgebende Wirbelstromprüfung sind bei der Sensorauswahl zunächst die Abbildungseigenschaften interessant. Vergleicht man diesbezüglich unterschiedliche Sensoren [3, 4], so zeigt sich, dass die bekanntesten Sensoren komplizierte Punktspreizfunktionen besitzen, die die Bildinterpretation schwierig gestalten.

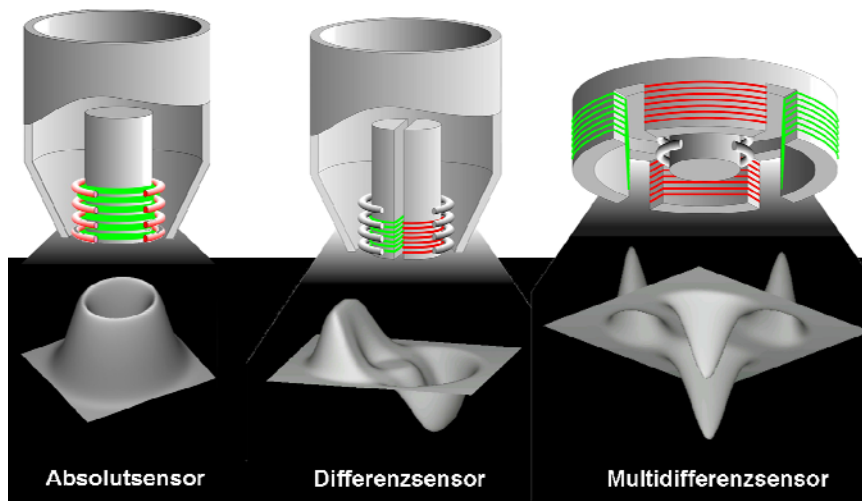


Bild 1: Punktspreizfunktionen gängiger Wirbelstromsensoren

Basierend auf einer Reihe von Voruntersuchungen [5-8] wurde der Halbtransmissionssensor (auch Fernfeld- bzw. Pitch-Catch-Sensor genannt) näher betrachtet. Er besteht aus einer nicht axialen Anordnung von Sendespule und Empfangsspule und hat sich zum Beispiel in der Flugzeugprüfung bewährt. Bild 2 zeigt das Prinzip und seine Punktspreizfunktion in Abhängigkeit vom Abstand zwischen den Spulen (Spacing).

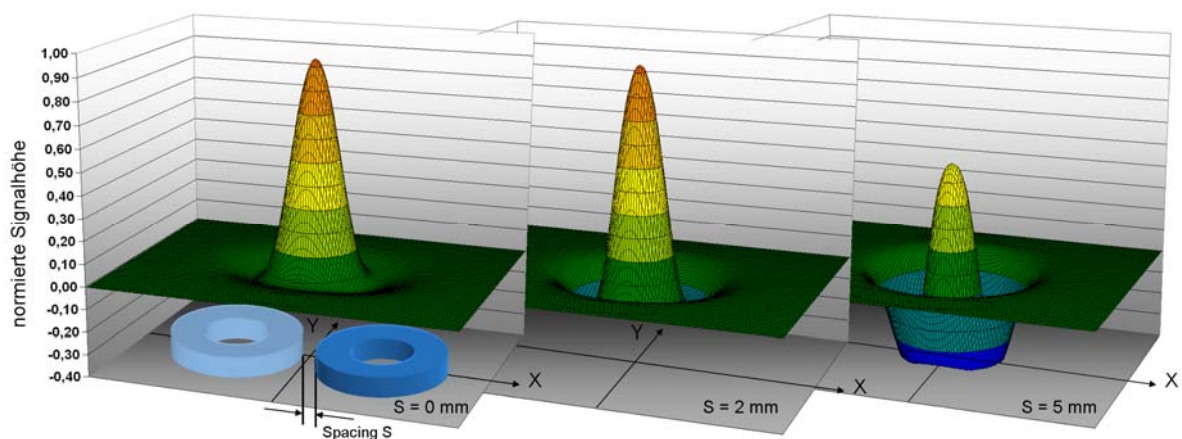


Bild 2: Punktspreizfunktion des Halbtransmissionssensors in Abhängigkeit vom Spacing (berechnet mit VIC-3D, Sabbagh Ass. Inc.)

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 gute Abbildungseigenschaften, die eine Bildnachbearbeitung entbehrlich machen.

## 2.2 Signale in der Messebene

Das elektromagnetische Wechselfeld der Sendespule dringt nach den bekannten Gesetzen in den Werkstoff ein. Die Empfangsspule wertet jedoch nur einen Teil des Gesamtfeldes aus, der entsprechend der Prüfaufgabe, einen bestimmten Werkstückbereich durchsetzt hat. Bild 3 macht diesen Gedanken anhand verdeckt liegender Fehler deutlich.

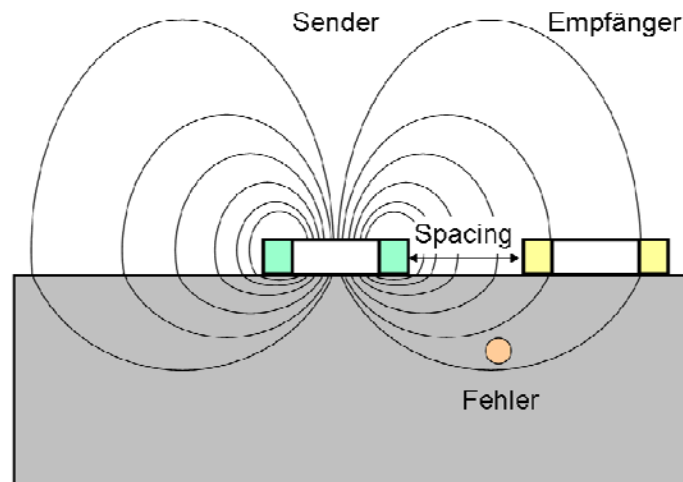


Bild 3: Nicht axiale Sender-Empfängeranordnungen und Verlauf der magnetischen Feldlinien

Nur derjenige Teil des Gesamtfeldes ist von Interesse, der bis in das fehlergefährdete Gebiet vorgedrungen ist und dank der Verknüpfung mit dem Wirbelstromfeld Informationen über mögliche Fehler trägt.

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

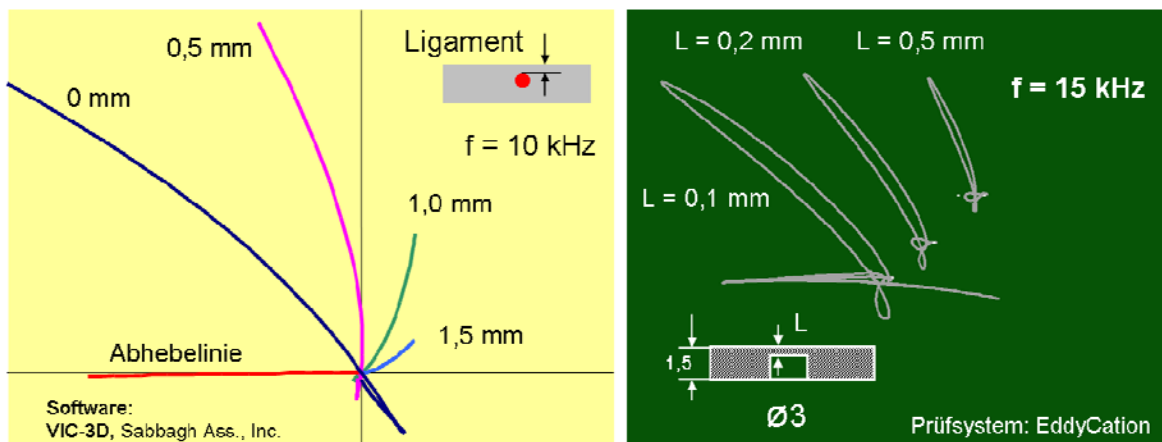


Bild 4: Vergleich berechneter und gemessener Signale verdeckter Fehler.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich sowohl der Abhebeeffect beherrschen als auch die Signale verschieden überdeckter Fehler anhand der Amplitude und Phasenlage unterscheiden lassen und somit beste Voraussetzungen für eine Fehlerbewertung gegeben sind.

### 3. Bildgewinnung

#### 3.1 Prinzip

Zur Bildgewinnung kann ein Einzelsensor Spur für Spur systematisch über die Oberfläche bewegt werden. Der Real- und der Imaginärteil des Messsignals werden ortsgetreu aufgezeichnet und hinsichtlich der interessierenden Werkstoffeigenschaften ausgewertet

[5, 9]. Da zu diesem Zweck die Signalphase häufig gedreht wird, nennt man die entstehenden Bilder nicht Real- und Imaginärteilbild sondern einfach X- bzw. Y-Bild, je nach dem, ob die entstehende X- oder Y-Komponente dargestellt wird.

Die auf diese Weise gewonnenen hochqualitativen Bilder setzen jedoch eine anspruchsvolle Scanmechanik voraus und benötigen viel Scanzeit [10]. Darüber hinaus schränkt die verfügbare Scanmechanik die prüfbare Objektgeometrie auf ebene oder einachsig gekrümmte Oberflächen ein. Kompliziertere Oberflächen müssen nach wie vor manuell ohne Bildgewinnung geprüft werden.

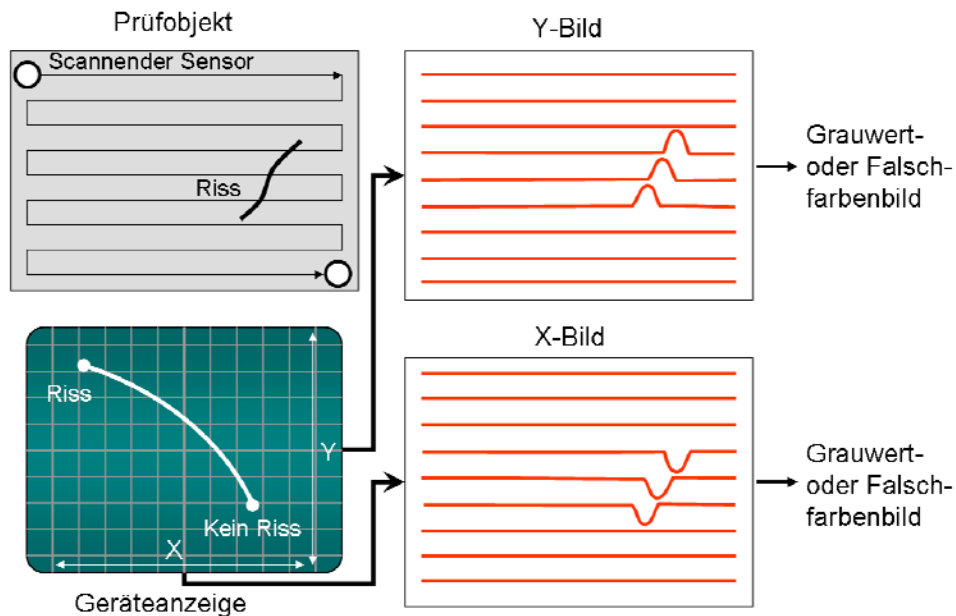


Bild 5: Elektromagnetische Bildgewinnung mittels scannenden Einzelsensors

### 3.2 Elektronische Feldbewegung

Anstelle des Abtastens der Oberfläche mit einem einzigen Sensor können mehrere Sensoren zu einem Bewegungsfeldsensor kombiniert werden, dessen Elemente durch eine spezielle Elektronik simultan oder multiplex angesteuert werden. Im Rahmen des Wachstumskern-Projektes AL-CAST wurden zunächst 32 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 Wirbelstromgerät bildet. Bild 6 zeigt links den Zeilensensor schematisch. Der Durchmesser der Elemente beträgt 2,5 mm, die Ortsauflösung ca. 1,5 mm.

Die Geschwindigkeit der elektronischen Feldbewegung liegt derzeit zwischen 0,4 und 3 m/s. Zur Bildgewinnung wird der Zeilensensor mit Geschwindigkeiten zwischen 6 und 48 mm/s mechanisch verschoben. Für den Handbetrieb kann eine mechanische Wegerfassung ergänzt werden.

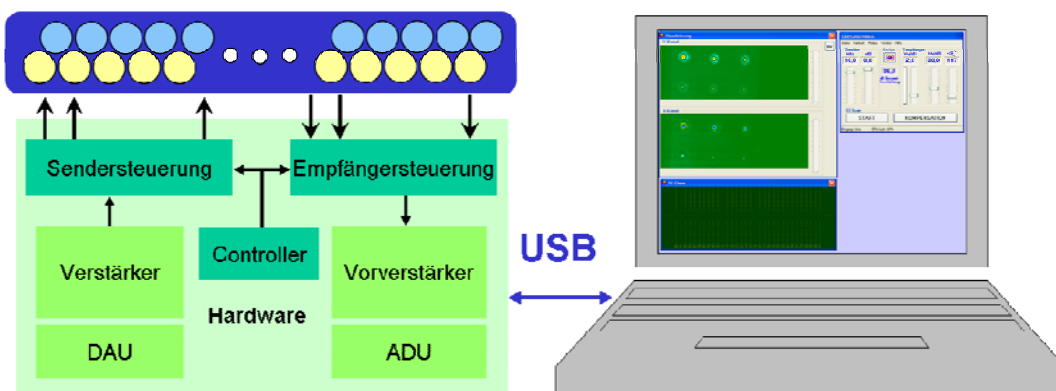


Bild 6: Schematischer Aufbau des elektromagnetischen Bewegungsfeldsensors.

### 3.3 Visualisierung und Auswertung

Die Leistungsfähigkeit des Zeilensensors wurde zunächst an einem Aluminiumblech mit verdeckten Flachbodenbohrungen erprobt. Die Ligamente der Bohrungen bewegen sich zwischen 0,1 und 0,5 mm, die Durchmesser zwischen 1 und 3 mm. Bild 7 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.

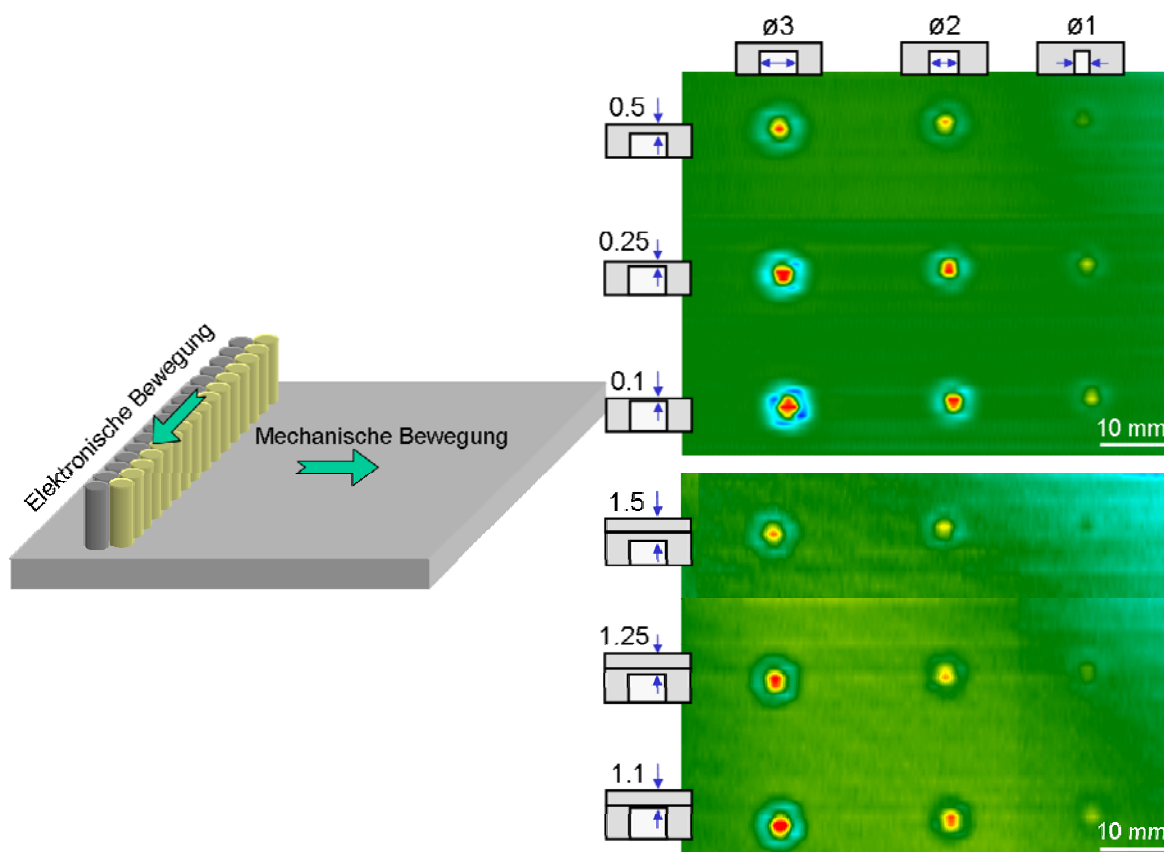


Bild 7. Visualisierung von verdeckten Flachbodenbohrungen in einem Aluminiumblech. Links: linearer Bewegungsfeldsensor, rechts: EC-Y-Ergebnisbilder

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 8. 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.

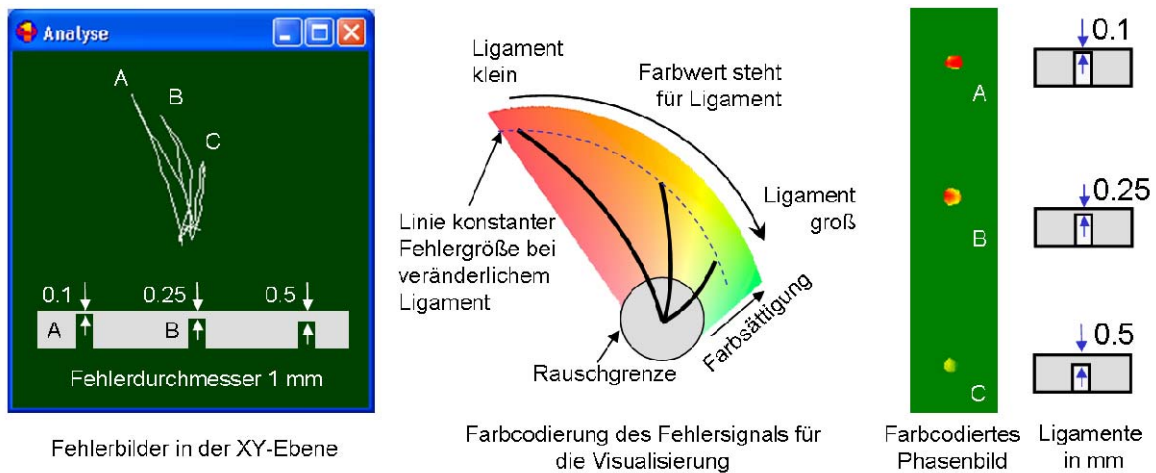


Bild 8: Anzeigen der drei 1-mm-Flachbodenbohrungen in der XY-Ebene. Zur Visualisierung werden die Signale in Farbwert und Farbsättigung codiert.

Bild 9 zeigt als praktisches Beispiel ein Aluminiumgussteil, auf dessen Oberfläche visuell keine Anomalien erkennbar sind (Bild 9a). Der Bewegungsfeldsensor macht jedoch charakteristisch geformte Strukturen sichtbar (Bild 9b und c), die erst nach dem Abarbeiten von 1 mm Randschicht auch optisch wahrnehmbar werden (Bild 9d).

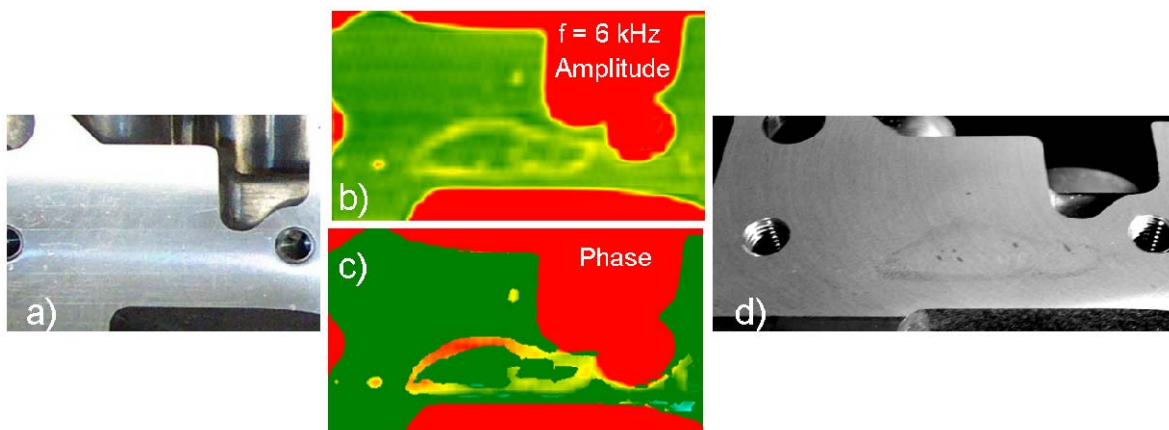


Bild 9. Visualisierung verdeckter Anomalien in Aluminiumguss, a) Foto des Prüfbereiches, b) und c) elektromagnetische Signatur des Prüfbereiches, d) Foto nach dem Abarbeiten von 1 mm Randschicht

Das Prinzip des Bewegungsfeldsensors kann auf ein zweidimensionales Sensorfeld erweitert werden [1]. Bei entsprechender Gestaltung des Sensorträgers können gekrümmte Oberflächen geprüft werden, da eine mechanische Sensorbewegung entfällt. Die

Originalbilddaten können zwecks Dokumentation und späterer Analyse gespeichert werden.

Mit dem vorgestellten Sensor bestehen gute Möglichkeiten, ein leistungsfähiges bildgebendes Wirbelstromsystem kostengünstig auf den Markt zu bringen.

### **Danksagung**

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Innovativen Regionalen Wachstumskerns AL-CAST, in dessen Rahmen die vorgestellten Ergebnisse entstanden.

### **Referenzen**

- [1] Scholz, A. 1990. Sondenmatte - neuer Weg für die Oberflächenprüfung mit Wirbelstrom. DGZfP-Jahrestagung Trier 21.-23.5.1990
- [2] Leclerc, R.; Samson, R.: Eddy Current Array Probes for Aircraft Applications, 15<sup>th</sup> WCNDT, Rome, 15-21 October 2000
- [3] Mook, G.; Simonin, Ju.; Heindörfer, F.: Aspekte der Bildgewinnung und -verarbeitung in der Wirbelstromprüfung. 61. Jahrestagung der DGZfP, 9.-11.5.94, Timmendorfer Strand. Berichtsband Teil 1; S. 255-262
- [4] Mook, G.; Simonin, J.; Zielke, R.; Crostack, H.-A.; Maaß, M.: Testkörper zur Einschätzung des Auflösungsvermögens von Wirbelstromsystemen. Jahrestagung DGZfP 1999, Celle, BB 68/2, S. 751-760
- [5] Thomas, H.-M.; Weigelt, G.: Anwendung von Wirbelstromverfahren zur quantitativen Bestimmung der Tiefenausdehnung von Korrosionsschäden an Aluminiumstrukturen. DECHEMA-Abschlussbericht 11L08-4, Mai 1991
- [6] Mook, G.; Hesse, O.; Uchanin, V.: Deep Penetrating Eddy Currents and Probes. 9. ECNDT, Berlin, 25.-29.9.2006, paper 176
- [7] 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
- [8] Mook, G.: Bildgebende Wirbelstromprüfung. 27. Krajowa Konferencja Badan Nieniszczacych, Miedzyzdroje, 20.-22. Oktober 1998, Berichtsband S. 197-205
- [9] 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
- [10] 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
- [11] Mook, G.; Hesse, O.; Uchanin, V.: Deep Penetrating Eddy Currents and Probes. 9. ECNDT, Berlin, 25.-29.9.2006, paper 176