

Automatische Detektion von Rissen in Stahlbauteilen unter Verwendung von GMR-Sensoren bei der magnetischen Streuflussprüfung

Verena REIMUND, Matthias PELKNER, Andreas NEUBAUER, Hans-Martin THOMAS, Marc von KREUTZBRUCK

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Verena.Reimund@bam.de

Kurzfassung. GMR-Sensor Arrays ermöglichen eine örtlich hoch aufgelöste Messung magnetischer Streufeldamplituden an Stahlbauteilen, bei der abhängig von der Größe der zu prüfenden Oberfläche erhebliche Datenmengen erzeugt werden. Eine automatische Detektion von Rissen kann anschließend mittels digitaler Bildverarbeitung erreicht werden, welche hauptsächlich auf einer Kantenerkennung basiert. Diese wurde anhand einer Magnetometer-Messung getestet, die an einem zylindersymmetrischem Bauteil mit funkenerosiv eingebrachten Rissen geringer Tiefe durchgeführt wurde. Die erzielte Selektion der Defekte wird für eine angestrebte Rekonstruktion der Defektgeometrie benötigt.

Einleitung

Die zerstörungsfreie Prüfung und Evaluierung von ferromagnetischen Bauteilen im Hinblick auf sehr feine Risse erfordert zuverlässige Mess- und Analyseverfahren. Bei Oberflächenverfahren entstehen dabei zumeist zweidimensionale Datensätze, für die sich eine digitale Bildverarbeitung eignet und bereits in vielen unterschiedlichen Prüfverfahren zur automatischen Risserkennung erfolgreich eingesetzt wird [1]. Dabei wird die Nachbarschaftsbeziehung der Messwerte zur Analyse herangezogen. Zudem beeinflusst die Messung bzw. Datengewinnung wesentlich den Erfolg der Risserkennung. Daher sind hochauflösende Messverfahren für sehr feine Risse mit einer Tiefe von wenigen μm nötig.

Hierzu eignet sich das Verfahren des magnetischen Streuflusses, der sich nach erfolgter Magnetisierung des Bauteils an Rissen ausbildet, wie in Abb. 1 (a) schematisch dargestellt. Bei konstanter Magnetisierung senkrecht zum Riss werden die größtmöglichen Streufeldamplituden erzeugt. Eine hochempfindliche Methode zur Streuflusserkennung ist die Magnetpulverprüfung. Eine Automatisierung kann mit berührungslosen optischen Verfahren erfolgen [2]. Jedoch beschränken sich optische Verfahren auf einen

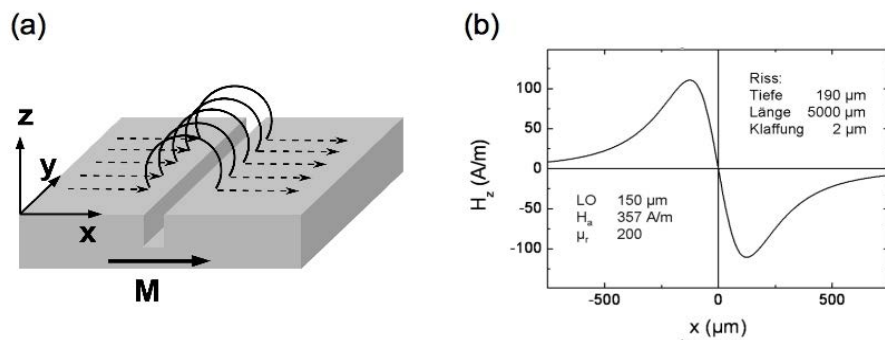


Abbildung 1. Magnetisches Streufeld an einem Riss und ein nach Shcherbinin [3] simuliertes Streufeldsignal (z -Komponente).

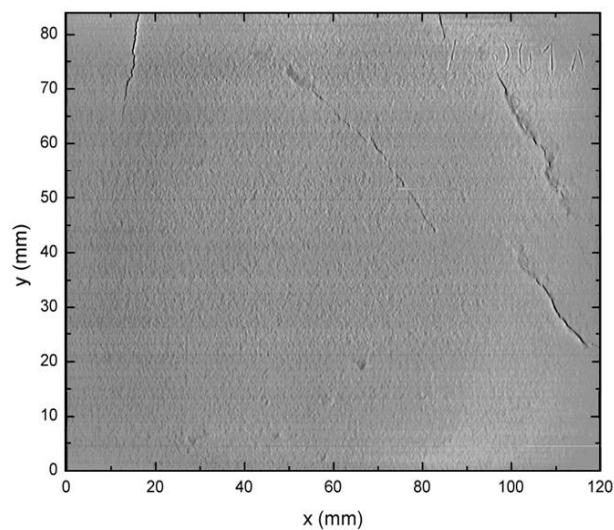


Abbildung 2. Platte mit Härterissen: Scan mit einem GMR-Gradiometer mit einer örtlichen Auflösung von $1\ \mu\text{m}$ in x -Richtung und $30\ \mu\text{m}$ in z -Richtung. Die Platte wurde vor der Messung in x -Richtung aufmagnetisiert.

Kontrastunterschied, wodurch die physikalische Information (Stärke des Streufeldes) verloren geht. Diese ist jedoch für eine spätere Rekonstruktion der Defektgeometrie wichtig.

Magnetfeldsensoren erlauben eine quantitative Messung von magnetischen Streufeldern. Insbesondere eignen sich GMR-Sensoren (engl.: giant magnetoresistance; Riesenmagnetwiderstand) aufgrund ihrer hohen Ortsauflösung. Neben einer hohen Feldempfindlichkeit zeichnet diese Sensoren ihre Miniaturisierbarkeit aus, da der GMR-Effekt kein Volumeneffekt ist. Die sensitive Fläche kann nur wenige μm^2 betragen, wodurch eine hohe Ortsauflösung erreicht wird. Dabei ist ein geringer Abstand zwischen Sensor und Bauteiloberfläche wichtig, da die Streufeldamplituden mit zunehmender Entfernung näherungsweise quadratisch abnehmen. Aufgrund der hohen Feldempfindlichkeit ist es möglich, Magnetfelder unter $1\ \text{kA/m}$ für die Magnetisierung zu verwenden, um genügend große Streufelder an Rissen geringer Tiefe zu erhalten. Dies wurde in dieser Arbeit durch den Einsatz einer lokalen Magnetisierungseinheit verwirklicht. Der für die Messungen verwendete GMR-Sensor (Sensitec GmbH) ist nur in z -Richtung empfindlich. In Abb. 1 (b) ist die erwartete Signalform des magnetischen Streufeldes eines Risses dargestellt [3]. In Abb. 2 ist beispielhaft eine hochauflösende GMR-

Gradiometermessung an einer Platte mit Härterissen dargestellt. Der feine Verlauf der realen Risse kann in dieser 2D-Darstellung erkannt werden.

Wir zeigen, dass mit einem GMR-Magnetometer-Sensor bei einer niedrigen lokalen Feldanregung von etwa 800 A/m das Streufeld feinsten Risse mit einer Tiefe von nur 40 μm detektiert werden konnte. Diese kleinen Defekte in der Oberfläche konnten mit einer anschließenden schnellen Bildverarbeitung automatisch aus einem Datensatz selektiert werden.

Experiment

Für die Messung wurde ein einzelner GMR-Sensor verwendet. Aufgrund der hohen Ortsauflösung ist eine hohe Genauigkeit bei der Positionierung der Prüfsonde zu dem Bauteil erforderlich. Abb. 3 (a) zeigt den verwendeten Messaufbau. Dieser besteht aus einem Rotationstisch (Präzision 10^{-6} deg) und einer lokalen Anregungseinheit, vgl. Abb. 3 (b). Ein Elektromagnet wird aus einem U-Joch zusammen mit einer gleichstromdurchflossenen Spule ($N = 100$ Windungen) gebildet und ergibt zusammen mit dem darin platzierten Sensor die Prüfsonde. Der Elektromagnet wurde mit einem Strom von 1 A betrieben. Bei einem Abstand zwischen U-Joch und Bauteiloberfläche von ungefähr 50 μm lässt sich mittels Finiter Elemente Methode eine lokale Magnetfeldstärke von etwa $H_a = 800$ A/m in Umlaufrichtung abschätzen. Die Prüfsonde wurde mit Hilfe einer Kunststofffolie gleitend an der Oberfläche des Bauteils geführt. Die Rotationsgeschwindigkeit betrug 6 $^\circ/\text{sec}$. Der Abstand zwischen Bauteil und Sensorelement (lift-off) betrug ungefähr 150 μm .

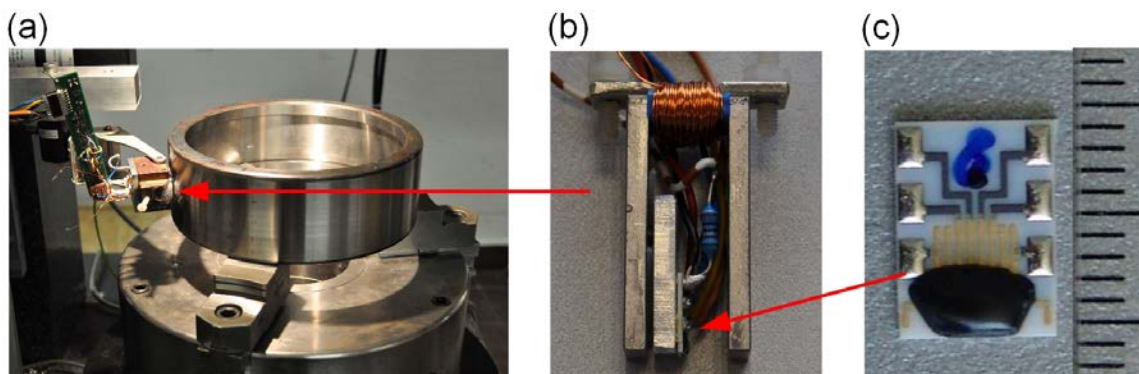


Abbildung 3. (a) Rotationstisch mit Testobjekt und lokaler Anregungseinheit, (b) Lokale Anregungseinheit, (c) Platine mit GMR-Magnetometer.

Bildverarbeitung

Für eine angestrebte Inversion der Messdaten ist die Verwendung von Magnetometer-Sensoren von großem Vorteil, da auch die Kenntnis der Hintergrundfelder für eine vollständige Bewertung der Messsignale herangezogen werden kann. Die Amplituden der magnetischen Streufelder an Rissen können dann im Allgemeinen nicht mit Hilfe einer einfachen Schwellwertbildung sicher detektiert werden. Eine Bildverarbeitung ist daher nötig, um die magnetischen Streufeldsignale aus einem Messdatensatz zu extrahieren.

Es wurden hierzu 2D Filter lokal auf das Originalbild angewendet, die die Beziehung benachbarter Messwerte bewerten. Zum Einen wurde das Median-Filter angewendet, um Impulsauschen zu entfernen. Dieses Rauschen entsteht bei der analogen Datenaufnahme und besitzt keine weiteren physikalischen Informationen. Das Median-Filter ist eine 3x3 Maske, die über das Bild der Messdaten geschoben wird. Dabei wird für

jede Filterposition eine Sortierung der Messwerte vorgenommen und derjenige Messwert, der sich dann an mittlerer Position befindet, wird ausgewählt. Dieser entspricht dem Ergebnispixel, das in das Ergebnisbild eingetragen wird. Das Median-Filter ist richtungsunabhängig und nichtlinear. Anschließend wurde eine Kantendetektion durchgeführt, indem eine Filtermaske mit einem Ausschnitt des Originalbildes gefaltet wurde. Hierzu existiert eine Vielzahl solcher Masken, die beispielsweise die erste oder zweite Ableitung beschreiben. Für die Filterung der vorliegenden Messdaten wurde der Sobel-Operator ausgewählt, dessen Wirkung richtungsabhängig ist. Da die Messung ebenfalls nur empfindlich in eine Richtung war, war eine einmalige Anwendung des Filters ausreichend.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der GMR-Messungen mit der lokalen Anregungseinheit sind in Abb. 4 gezeigt. In Abb. 4 (a) sieht man eine schematische Darstellung der künstlichen Risse, die mit Hilfe einer niederenergetischen Funkerosionsanlage in den ferromagnetischen Lagerschalenring eingebracht wurden. Neben den senkrecht zur Umlaufrichtung verlaufenden Rissen mit unterschiedlichen Tiefen von $40\ \mu\text{m}$ bis $170\ \mu\text{m}$ wurde zusätzlich ein um 45° verdrehter, etwa $42\ \mu\text{m}$ tiefer Riss eingebracht. Die Breite der Risse betrug ca. $90\ \mu\text{m}$ bei einer Länge von einigen Millimetern.

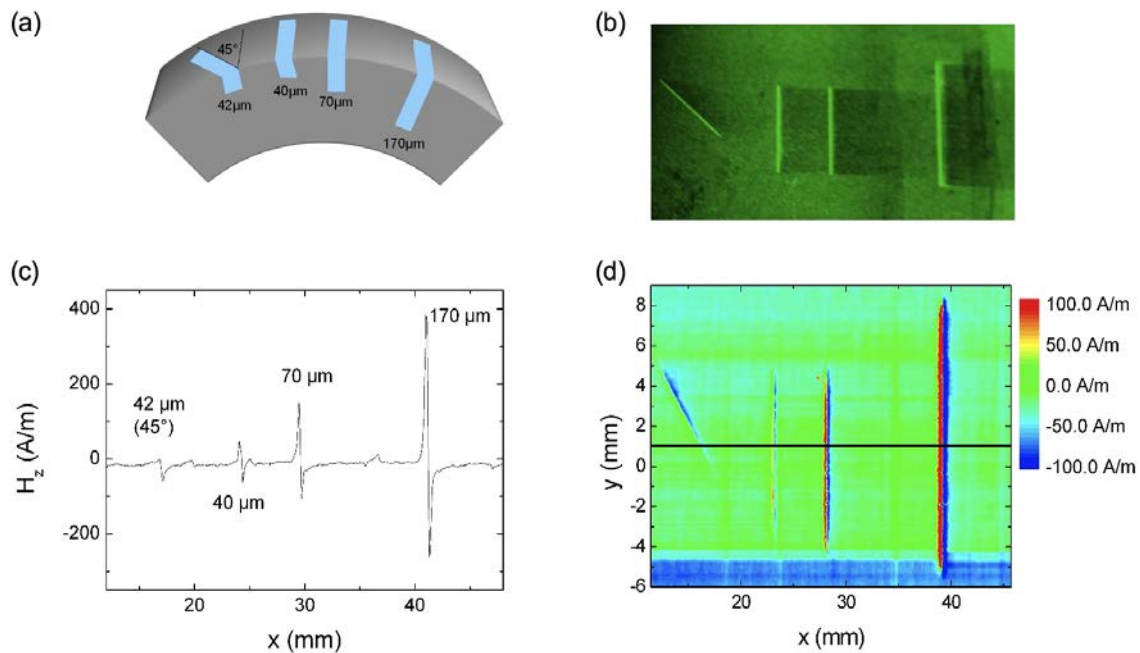


Abbildung 4. (a) Schematische Darstellung des Prüfobjekts mit vier künstlichen Rissen (hellblau). (b) Magnetpulverprüfung der Oberflächenrisse. (c) Normale Streufeldkomponente H_z gemessen mit einem GMR-Magnetometer mit lokaler Anregung. Der Verlauf des Linienscans ist in der Falschfarbendarstellung des Flächenscans (d) durch die schwarze Linie angedeutet. Zur Verdeutlichung der Rissdarstellung ist in (d) der Magnetfeldbereich auf $\pm 100\ \text{A/m}$ reduziert.

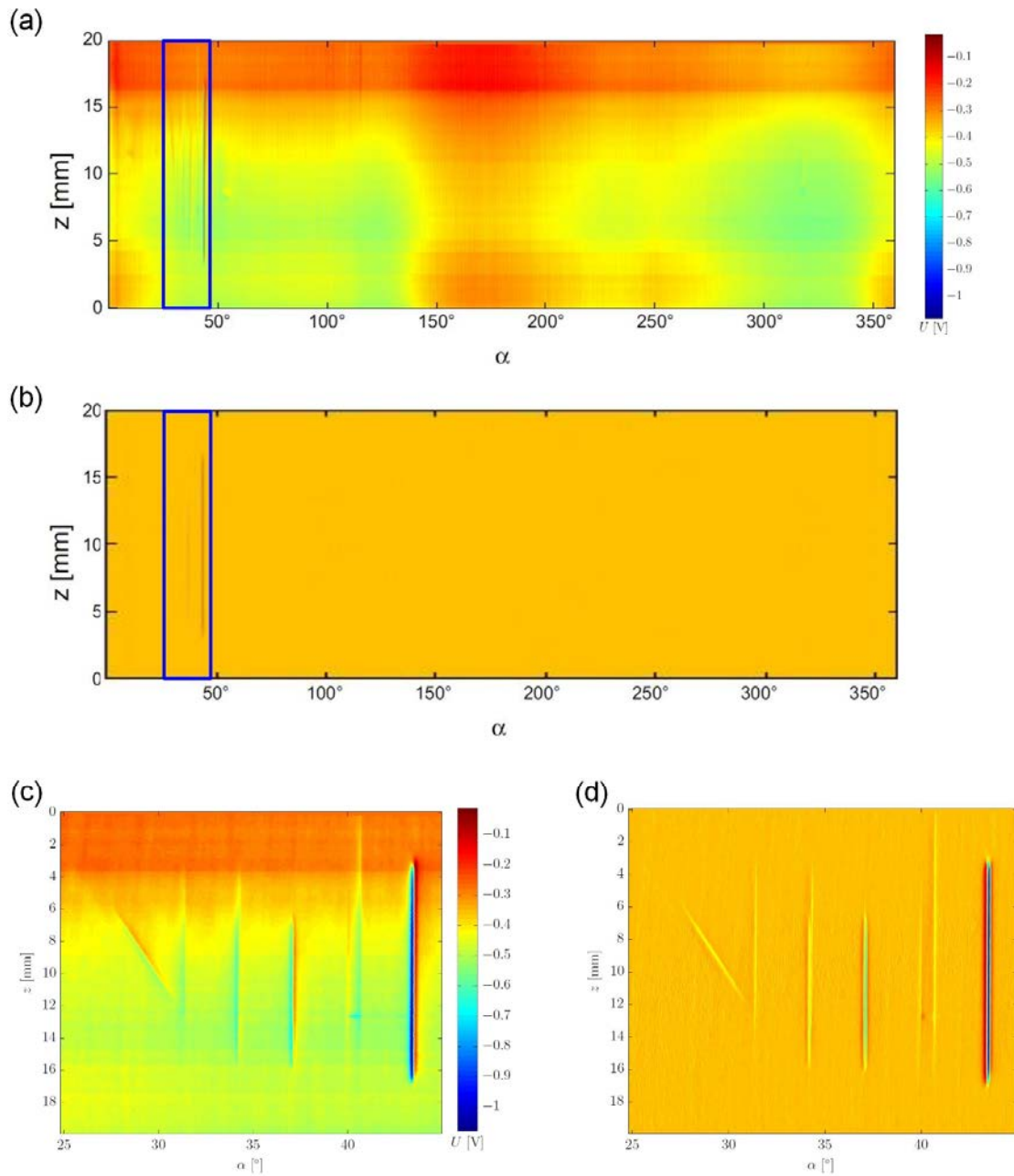


Abbildung 5. (a) Messwerte der äußeren Mantelfläche des Lagerschalenringes. (b) Ergebnis der Bildverarbeitung. Die rot umrahmten Ausschnitte sind in (c) und (d) näher dargestellt. (b) Erkannte Risse und Signalen aufgrund von Abhebeeffecten im Ergebnisbild.

In Abb. 4 (c) ist die Normalkomponente des Magnetfelds entlang der Umlaufrichtung dargestellt. Man erkennt für alle senkrecht zum Feld stehenden Risse sehr deutlich den typischen Signalverlauf (vgl. Abb. 1 (b)). Selbst für den kleinsten Riss mit einer Tiefe von ca. 40 μm erhält man dabei einen Signal-Rauschabstand von mindestens 10 dB. Gründe für die fehlende Symmetrie des Risssignals, d.h. der maximale Feldwert ist größer als der Minimale, sind die Hysterese des Sensors sowie das Überschreiten des linearen Feldbereichs des GMR-Sensors für negative Felder. Der um 45° verkippte, 42 μm tiefe Riss ist in dem Linienscan in Abb. 4 (c) als schwaches Signal zu erkennen. Betrachtet man den Flächenscan der Oberfläche, der in Abb. 4 (d) als Falschfarbenbild gezeigt ist, ist

selbst dieser kleine, verkippte Riss gut zu erkennen. In Abb. 4 (d) wurden die magnetischen Feldwerte nur in einem Bereich von ± 100 A/m gezeigt, um die Darstellung der Risse zu verdeutlichen. Zum Vergleich ist in Abb. 4 (b) eine Darstellung der künstlichen Oberflächenrisse mit der Magnetpulverprüfung gezeigt.

Abb. 5 (a) zeigt einen weiteren Messdatensatz der gesamten Ringoberfläche. Die Rissignale sind aufgrund der Hintergrundfelder nicht klar zu erkennen. Die Stärke der Hintergrundmagnetfelder hängt hier von vorherigen Magnetisierungs- und Entmagnetisierungsvorgängen ab. Weiterhin spiegeln sich die Sensoreigenschaften wider. Abb. 5 (b) zeigt das Gesamtergebnis der Bildverarbeitung. Auffällig ist vor allem, dass der Einfluss der Hintergrundfelder eliminiert worden ist.

Abb. 5 (c) zeigt einen Ausschnitt aus den ursprünglichen Messdaten, die die künstliche Risse sowie zusätzliche Signale bei den Winkeln 32° , 34° und 40° enthält. Diese sind aufgrund von Abstandsschwankungen zwischen der Prüfsonde und der Bauteiloberfläche und der dadurch von der Anregungseinheit erzeugten Streufelder entstanden. Die Ursache dieser Schwankungen war eine Verschmutzung der Risse. Diese Signale hängen von der Geometrie des Joches der lokalen Anregungseinheit ab. Möglicherweise sind diese Beobachtungen wichtig, wenn es zum Einsatz des Verfahrens in einer industriellen Umgebung kommt. Dabei können Verschmutzungen der Bauteiloberfläche nicht gänzlich ausgeschlossen werden. In Abb. 5 (d) ist das Ergebnisbild nach der Bildverarbeitung gezeigt, d.h. nach Anwenden des Median und Sobel Filters. Aus dem Gesamtdatensatz konnten Rissignale mit Hilfe einer Schwellwertbildung selektiert werden. Zusätzlich findet sich auch die erste Ableitung der Signale aufgrund der Abhebeeefekte wieder. Bei Winkel 34° überlagern sich diese mit einem Rissignal. Da sich die Signalform der Abhebeeefekte deutlich von derjenigen der Rissignale unterscheidet, kann in einem letzten Schritt eine Unterscheidung erfolgen. Mit den hier vorgestellten bekannten Verfahren der Bildverarbeitung konnte eine Selektion der interessanten Bereiche aus einem Datensatz mit 195×23207 Werten in 17 Sekunden auf einem Standard-PC (Mem: 3.7GiB, 2 CPUs je 3.16 GHz) erreicht werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz eines GMR-Magnetometers ermöglichte es in Kombination mit einer lokalen Anregungseinheit, die Stärke der Streufelder von künstlichen Rissen mit einer Tiefe von nur $40 \mu\text{m}$ in einem ferromagnetischen Bauteil quantitativ zu bestimmen. In einem nächsten Schritt wurden die ermittelten Daten mit Methoden der Bildverarbeitung näher analysiert, um für eine automatische Prüfung eine Vorsortierung des Datensatzes zu erzielen und eine Selektion der mit Rissen behafteten Bereiche zu gewinnen. Dabei wurde insbesondere eine Verminderung des elektronischen Rauschens betrachtet und eine darauf folgende Kantendetektion angewendet.

Die Grenzen der Detektion müssen zur Gewährleistung einer sicheren Bewertung der Oberfläche eines Bauteils evaluiert werden. Weiterhin muss das Verfahren experimentell verfeinert und näher spezifiziert werden. Dies betrifft vor allem die Erfassung der Position der Prüfsonde in Relation zum Prüfobjekt, was beispielsweise mit einem zusätzlichen Sensor oder eines Sensorsystems realisiert werden kann. Basierend auf dem Vergleich der durch die Positionsänderung, d.h. den Abhebeeefekt, entstandenen Signale mit der charakteristischen Signalform von Rissignalen kann eine Unterscheidung dieser erreicht werden. Weiterhin muss eine Überlagerung dieser Signale mit Rissignalen eindeutig erkannt werden und darf die Detektion eines Risses nicht verhindern. Auch der Einsatz von Arrays aus GMR-Sensoren muss erprobt werden. Die Bildverarbeitung kann hierfür auch im Hinblick auf eine online Inspektion angepasst und erweitert werden.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projektes “Bildgebende Verfahren für die zerstörungsfreie Materialprüfung unter Einsatz magnetischer Sensorarrays (BIMAS)” gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, Förderkennzeichen: 16SV3787 / Verbundnummer: V3MAG017). Die Autoren danken Herrn Dr. R. Sickert für die Herstellung der künstlichen Defekte und Herrn Thomas Erthner und Norbert Bertus für die Entwicklung der Elektronik.

Referenzen

- [1] Rauhut, M.; Spies, M.; Taeubner, K.; Detektion und Auffindwahrscheinlichkeit (POD) von Oberflächenfehlern in Metallen mittels optischer Inspektionsverfahren; DGZfP-Jahrestagung 2010.
- [2] Dobmann, G.; Magnetic NDT Technology for Characterizing Materials - A State of the Art Survey; *NDE 2006 - Proc. national Seminar on Non-Destructive Evaluation Dec. 7-9, 2006, Hyderabad*, **2006**, 235-244.
- [3] Zatsepin, N.; Shcherbinin, V.: Calculation of the magneto static field of surface defects. I. Field topography of defect models. In: *Defektoskopija* 5 (1966), S. 50–59.