

Automatisierte Streuflussprüfung und Bewertung von Zylinderlagerringen unter Anwendung von GMR-Sensorarrays

Matthias PELKNER*, Andreas NEUBAUER*, Verena REIMUND*, Thomas ERTHNER*,
Nicolai PANKE*, Marc KREUTZBRUCK*

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

Kontakt: Matthias.Pelkner@bam.de

Kurzfassung. Dieser Beitrag behandelt die automatisierte Streuflussprüfung an Zylinderlagerschalen. Die Anforderung an das im Verbundprojekt mit Industriepartnern aufgebaute System waren neben einer schnellen Detektion von Mikrorissen die Bewertung und grafische Darstellung der ermittelten Rissignale. Mithilfe neu angepasster GMR-Sensorarrays war es möglich, die Prüfung der Außen-, Innen- und Stirnflächen in kürzester Zeit (< 2 min) durchzuführen und Risse mit einer Tiefe unterhalb der geforderten 50 µm zu detektieren (Risse mit Tiefen von 30 µm konnten noch mit einem guten Signal-Rausch-Abstand besser 6 dB detektiert werden). Eine selbst entwickelte Messsoftware bereitet die Daten auf und stellt sie grafisch dar. Zusätzlich werden die Mikrorisse bewertet.

Einführung

Im Rahmen des Verbundprojektes „Bildgebende Verfahren und Komponenten für die zerstörungsfreie Materialprüfung unter Einsatz magnetischer Sensorarrays (BIMAS)“ wurde in Zusammenarbeit mit Industriepartnern eine Prüfeinrichtung zur automatisierten Streuflussprüfung mit angepassten GMR-Sensorarrays (GMR: giant magneto resistance; Riesenmagnetwiderstand) aufgebaut. Ziel war es, kleinste Oberflächenrisse mit Tiefen von 50 µm in Stahl in wenigen Sekunden zu detektieren und zu bewerten. Hierfür zeichnen sich insbesondere GMR-Sensoren aufgrund der hohen Feldempfindlichkeit und hohen Ortsauflösung aus [1,2]. Des Weiteren sind diese wegen ihrer geringen Kosten und ihrer Automatisierfähigkeit für industrielle Anwendungen geeignet. Im Rahmen des Projekts wurden ZfP-angepasste GMR-Sensorarrays [3] entwickelt, in lokalen Magnetisierungseinheiten integriert und zuletzt in einem Messaufbau zusammengeführt. Die hohe Ortsauflösung, die Verwendung von Arrays mit bis zu 48 Elementen sowie die sich daraus ergebende kurze Prüfzeit stellen hohe Anforderungen an den Messaufbau und die erforderliche Elektronik. Schließlich werden die Signale digitalisiert und verarbeitet. Neben einer Reduktion des elektronischen Rauschens findet eine onlinefähige Detektion von Rissen mithilfe einfacher Bildverarbeitungsalgorithmen statt. Anschließend ist es möglich, eine Rekonstruktion der Defektgeometrien vorzunehmen. Sowohl die Messdaten als auch jedes einzelne Zwischenergebnis und dessen numerische Weiterverarbeitung werden mithilfe einer eigens entwickelten Software übersichtlich dargestellt und archiviert. Somit



kann der automatische Messaufbau simultan zur gegenwärtig vorhandenen Prüftechnik eingesetzt werden.

In Kap. 1 werden zuerst die Grundlagen des GMR-Effektes und der magnetischen Streuflussprüfung dargestellt. Die eingesetzten Sensoren wurden während des Projektes entwickelt. Diese GMR-Sensorarrays sind auf die Bedürfnisse der ZfP angepasst. Kap. 2 behandelt die im Vorfeld gewonnenen Messergebnisse. Diese waren nötig, um ein Verständnis der Streuflussprüfung mittels GMR-Sensoren zu gewinnen und dadurch ein angepasstes Sensordesign zu erhalten. Schließlich werden in Kap. 3 das erweiterte Labormodell und die Messsoftware vorgestellt. Abschließend folgen Zusammenfassung und Ausblick.

1. Grundlagen

1.1 GMR & Magnetisches Rissstrefeld

Der GMR-Effekt (Entdeckung 1988, Nobelpreis 2007 an P. Grünberg und A. Fert [4,5]) tritt in magnetischen Mehrlagenschichtstrukturen auf. Dabei tritt in Abhängigkeit von einem von außen angelegten Magnetfeld eine Widerstandsänderung auf, die bei Raumtemperatur bis zu 10% betragen kann. Durch diesen Effekt ist es möglich, das Magnetfeld quantitativ zu bestimmen. Neben der hohen Empfindlichkeit und den geringen Kosten ist der GMR-Effekt volumenunabhängig, weshalb sich GMR-Sensoren sehr einfach miniaturisieren lassen. Dadurch kann eine hohe Ortsauflösung erreicht werden. Im Rahmen des Projektes wurde das Ziel verfolgt, ein den Erfordernissen der ZfP angepasstes GMR-Sensorarray zu designen und zu fertigen [3]. Dabei handelt es sich um Gradiometer, die den Magnetfeldgradienten der normalen Magnetfeldkomponente messen. Die Sensitivität dieser Sensoren beträgt 3 mV/V/(kA/m) . Die eingesetzten Sensoren besitzen einen Pitch von $200 \mu\text{m}$, d.h. die sensitiven Elemente sind $190 \mu\text{m}$ lang und der Abstand zum benachbarten Element beträgt $10 \mu\text{m}$. Insgesamt wurden Sensorplatinen mit 48 GMR-Elementen in der Prüfung eingesetzt, wodurch eine deutliche Reduzierung der Prüfzeit erreicht werden konnte.

Mit den entwickelten Sensoren wurde an zylinderförmigen Wälzlager eine Streufeldmessung durchgeführt. Streufeld tritt in einem aufmagnetisierten Bauteil an Defektstellen auf. Hier ändert sich die Permeabilität und das interne Magnetfeld wird aus dem Bauteil heraus verdrängt. Die Stärke des Streufeldes hängt neben dem Permeabilitätsunterschied von der Stärke des angelegten Magnetfeldes und von der Rissgeometrie ab. Neben klassischen Berechnungsmethoden des Streufeldes, die auf den analytischen Gleichungen von Förster [6] oder Shcherbinin [7,8] beruhen, sind auch Finite-Element-Methoden Simulationen (FEM) heutzutage möglich. Bei Kenntnis des internen Magnetfeldes und dem Sensorabstand lassen sich die Rissparameter, insbesondere die Risttiefe, aus den Messdaten rekonstruieren.

1.2 Sonde

Die Messsonde besteht aus der GMR-Sensorplatine, auf der sich die GMR-Sensorarrays befinden (hier 3×16 GMR-Elemente), und einem Magnetjoch als lokale Anregungseinheit zur Steuerung des angelegten Magnetfeldes im Material (siehe Abb. 1). Um den Abstand zwischen Sensorplatine und Prüfobjektoberfläche sowie Joch und Oberfläche zu variieren, sind diese unabhängig voneinander höhenverstellbar.

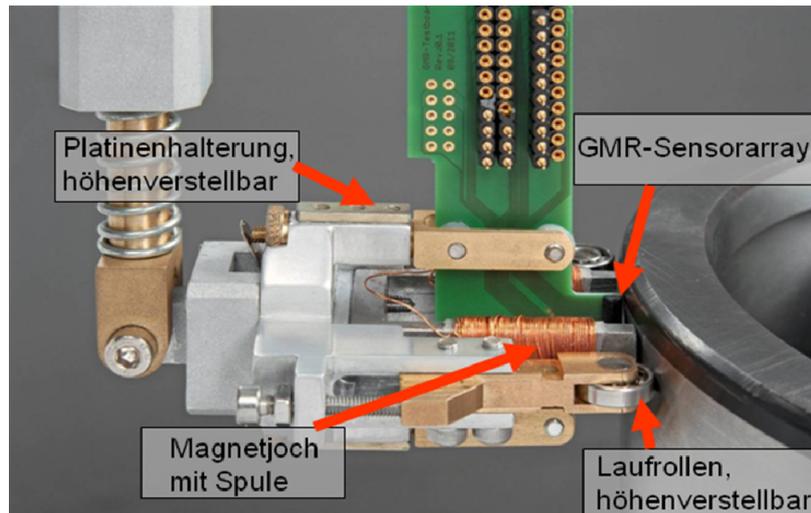


Abbildung 1: Sensorkopf mit GMR-Sensorarrays und Magnetjoch zur lokalen Anregung des Magnetfeldes. Beide Komponenten sind unabhängig voneinander höhenverstellbar.

In Abb. 2 links ist die Sensorplatine mit drei GMR-Arrays bestehend aus je 16 Elementen gezeigt. Neben den GMR-Arrays (rechts in Abb. 2 ist ein Ausschnitt eines Arrays gezeigt) befinden sich auf der Platine elektronische Bauteile, um sowohl die Messsignale zu verstärken als auch die hohe Anzahl an Kanälen zu verarbeiten (siehe hierzu Beitrag Erthner DGZfP DACH-Tagung 2012 [9]). Die GMR-Sensoren sind im vorliegenden Fall Gradiometer. Dies erweist sich für industrielle Anwendungen als vorteilhaft, da störende Hintergrundsignale wie statische Magnetfelder (Erdmagnetfeld, Streufelder der Magnetjochspulen) im Messsignal unterdrückt werden können, wodurch ein deutlich besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) im Vergleich zu Magnetometern erreicht wird. Dies ist wichtig, da die zu detektierenden Risse geometrisch im unteren μm -Bereich liegen und deren Streufelder nur sehr kleine Amplituden aufweisen.

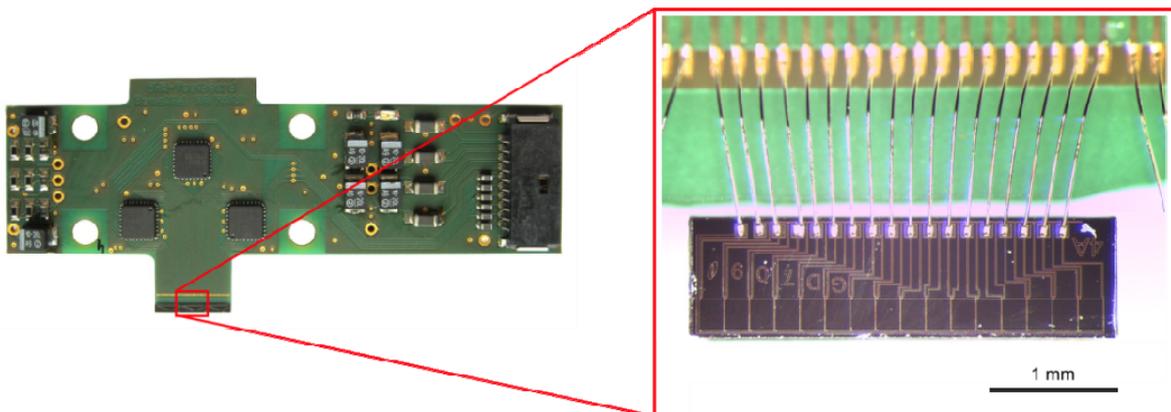


Abbildung 2: Messplatine mit drei 16er GMR-Arrays an der Unterkante. Zusätzlich befinden sich auf der Platine drei Multiplexer sowie Vorverstärker und Referenzwiderstandsbrücken [9].

2. Messergebnisse

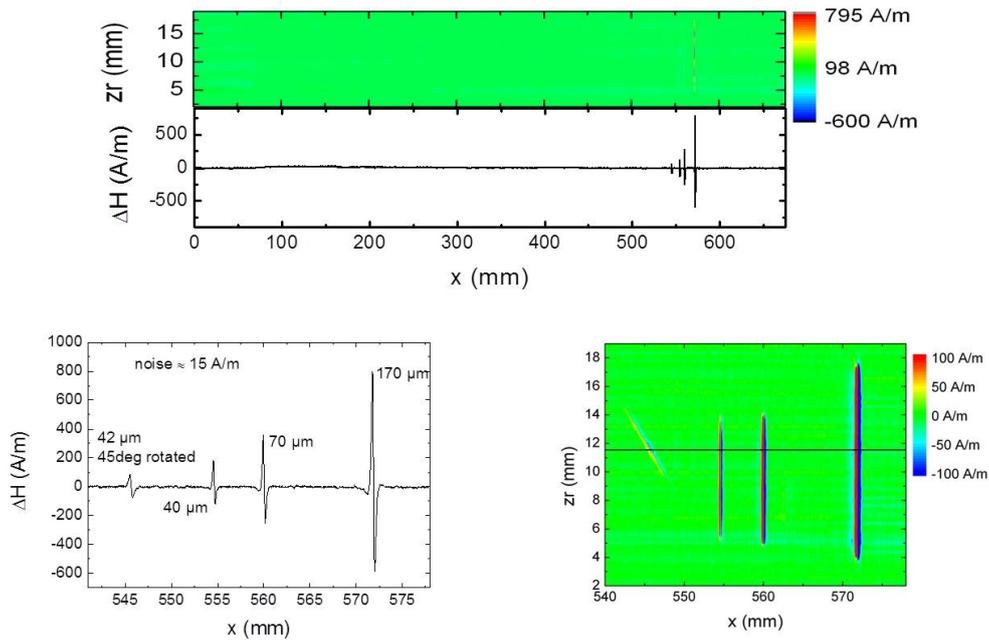


Abbildung 3: Messung eines zylinderförmigen Wälzlagers mit funkenerosiv eingebrachten Nuten (Tiefen der Nuten variieren zwischen 40 und 170 μm). Gezeigt ist im oberen Bild ein Flächenscan sowie Linienscan des Wälzlagers. Die unteren Diagramme sind Ausschnitte mit den Rissignalen der oberen Messung.

In Abb. 3 sind Messergebnisse mit den neu entwickelten GMR-Sensorarrays an der Außenauflfläche eines zylinderförmigen Wälzlagers abgebildet. In den Ring wurden mittels Funkenerosion vier Nuten mit unterschiedlichen Tiefen eingebracht. Die Tiefen variierten von 40 bis zu 170 μm . Im oberen Bild in Abb. 3 sind die gesamte abgescannte Fläche als Falschfarbenplot und ein Linienscan über die Nuten dargestellt. Durch die Verwendung eines Gradiometers sind im Messsignal keine Hintergrundsignale, z. B. remanente Magnetisierung des Lagerschalenrings, enthalten. Das Hintergrundrauschen (elektronisches und Permeabilitätsrauschen) beträgt etwa 15 A/m. In den unteren beiden Diagrammen sind Ausschnitte sowohl des Falschfarbendiagramms als auch des Linienscans der Rissignale zur besseren Darstellung der Messung abgebildet. Die Rissignale sind deutlich vom Hintergrund zu unterscheiden. Sogar für die kleinste Nut mit einer Tiefe von 40 μm ist das SNR besser als 20 dB.

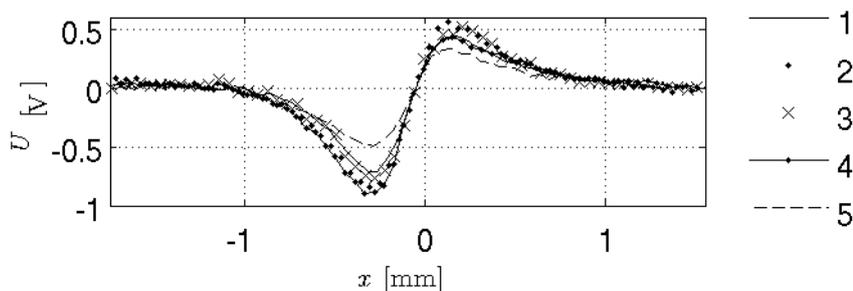


Abbildung 4: Linienscans senkrecht zur Rissrichtung für fünf benachbarte Sensoren (Abstand der Sensoren zueinander 200 μm).

In Abb. 4 ist eine weitere Messung eines zweiten Ringes dargestellt. In diesen Ring wurden insgesamt 15 verschiedene Nuten mit Tiefen von 10 bis 350 μm funkenerosiv eingebracht. Die Abbildung enthält sowohl einen Flächenscan einer 57 μm -tiefen Nut als auch einen Linienscan entlang der x -Achse über die Nutmitte.

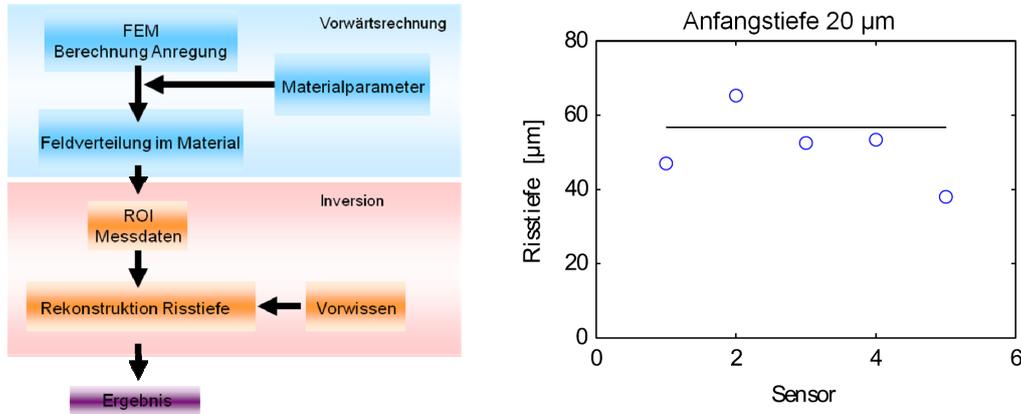


Abbildung 5: Links: Schema der Rekonstruktionsschritte. Rechts: rekonstruierte Risstiefe für eine 57 μm -tiefe Nut in Abhängigkeit von der Sensorposition.

In Abb. 5 links skizziert ein Flussdiagramm den Ablauf der Rekonstruktion zur Fehlergeometriebestimmung. Hierfür wird zuerst mittels einer FEM-Simulation global die Feldverteilung im Material bestimmt. Dafür notwendig ist die Kenntnis der Materialparameter, insbesondere die magnetischen Eigenschaften des zu untersuchenden Werkstoffes. Zusätzlich müssen die Geometrie der lokalen Anregungseinheit und der anliegende Spulenstrom berücksichtigt werden. Ist die Feldverteilung bekannt, wird ein kleiner Ausschnitt innerhalb des Materials betrachtet. Eine Parameterschätzung zur Defekttiefenbestimmung kann mit den in Abb. 4 dargestellten Messsignalen durchgeführt werden. Dabei werden die Simulationen für verschiedene, aktualisierte Defektgeometrien wiederholt und mit den Messdaten verglichen. Hierbei wird darauf geachtet, dass die Defektgröße in einem Bereich liegt, der aufgrund der Auslegung der Messsonde vorgesehen ist. Wichtig hierfür sind zum Einen die Abstände der einzelnen Komponenten der Messsonde zur Prüfobjektoberfläche, zum Anderen müssen die Sensorparameter wie Länge der GMR-Elemente, Abstand zueinander sowie zur Prüfobjektoberfläche und die Sensorverkipfung bekannt sein. Das Verfahren konvergiert nach etwas weniger als 30 Iterationen bei einer Berechnungszeit von wenigen Sekunden.

Im rechten Diagramm der Abb. 5 ist für die 57 μm -tiefe Nut das rekonstruierte Ergebnis der Risstiefe in Abhängigkeit vom Sensorkanal aufgetragen. Innerhalb des Risses ist die Tiefe gut rekonstruierbar. Zum Nutende hin nimmt die rekonstruierte Nuttiefe ab. Dies kann dadurch erklärt werden, dass an den Enden das Magnetfeld verstärkt an diesen vorbei verläuft, anstatt aus dem Material herauszutreten. Dadurch nimmt die Stärke des Streufeldes zu den Nutenden hin kontinuierlich ab. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Sensorelemente selbst integrierend wirken und nur teilweise während der Messung über den Riss entlang verlaufen. Zusätzlich ist die räumliche Ausdehnung einer Nut innerhalb des Materials nicht notwendigerweise rechteckig, sondern leicht oval zu den Enden und Rissflanken hin, wodurch zusätzlich die Streufeldamplitude abnimmt.

3. Automatisierte Streuflussprüfung

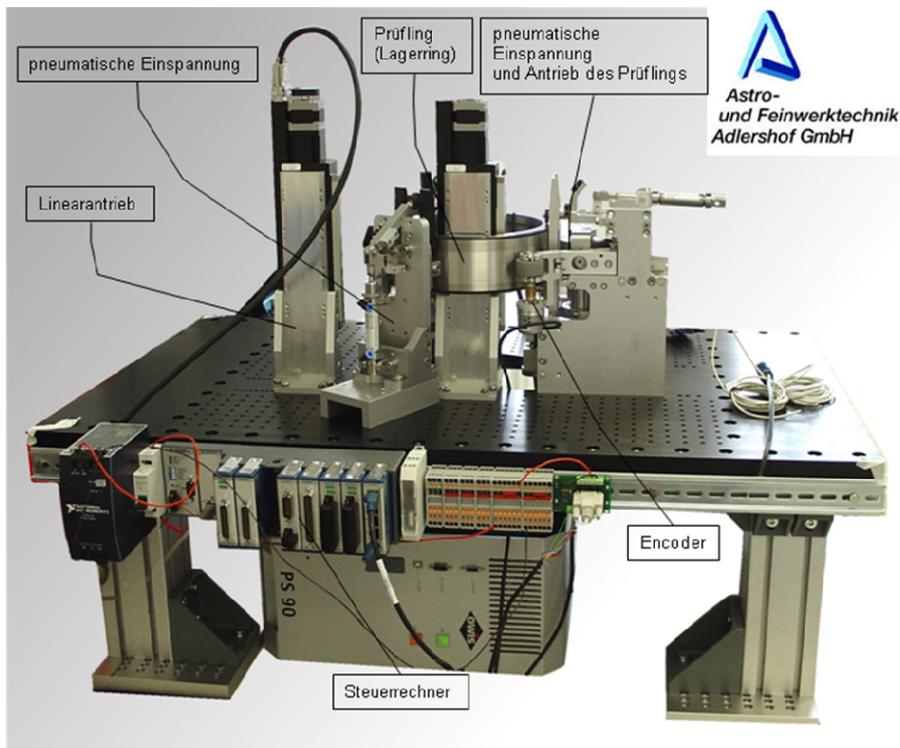


Abbildung 6: Erweitertes Labormodell zur automatisierten Streuflussprüfung von zylinderförmigen Wälzlageringern (entwickelt und aufgebaut von *Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH*).

Das BIMAS-Projekt hatte zum Ziel, ein erweitertes Labormodell für die automatisierte Streuflussprüfung von Zylinderlagerschalenringen aufzubauen. Das Labormodell ist in Abb. 6 dargestellt. Ausgelegt ist der Aufbau für Wälzlager mit drei unterschiedlichen Ringdurchmessern. Die Prüflinge werden für die Prüfung pneumatisch an drei Punkten eingespannt und über einen Antrieb in Bewegung versetzt. Die maximale Rotationsgeschwindigkeit beträgt 1 U/s, wodurch eine geringe Prüfzeit gewährt wird. Allerdings ist hierfür eine leistungsfähige Elektronik nötig, um die hohe Anzahl der Kanäle schnell zu verarbeiten und zu digitalisieren [9]. Über einen Encoder wird die Position ermittelt. Die Auflösung beträgt $\sim 50 \mu\text{m}$. Die Prüfköpfe, insgesamt drei für die Außen-, Innen- und Stirnflächen, werden durch Linearantriebe positioniert. Der Prüfkopf selbst besteht ähnlich wie in Abb. 1 aus einer Sensorplatine mit GMR-Arrays und lokaler Anregungseinheit, um in Umlaufrichtung das Magnetfeld zu erzeugen. Da es sich um eine Streuflussprüfung handelt, ist eine zweite Messung mit einer um 90° gekippter Magnetisierung nötig. Diese Magnetisierung wird durch ein Querjoch erzeugt. Die Sensorplatine kann sehr genau in der Höhe justiert werden, um kleinste Abstände zwischen GMR-Element und Prüfobjektoberfläche einzustellen. Zusätzlich lässt sich der komplette Sensorkopf über eine passive Abstandshalterung durch einstellbare Rollen in der Höhe justieren. Die Steuerung wird über Messprogramme und Steuereinheiten im Modell durchgeführt.

Die Daten werden durch eine eigens für diese Prüfaufgabe entwickelte Messsoftware während der Messung verarbeitet. Dabei werden die Daten aufbereitet (Filterung), grafisch dargestellt und es wird eine Bewertung vorgenommen. In Abb. 7 ist die grafische Oberfläche dargestellt. Neben der Darstellung der Daten können Defekte über

ein Schwellwertverfahren gefunden und hervorgehoben werden (in Abb. 7 ist ein Linienscan dargestellt, die rote Linie entspricht dem hier gewählten Schwellwert). Auch konnten kleinste Risse mit einer Tiefe von 40 μm mit einem guten SNR detektiert und bewertet werden.

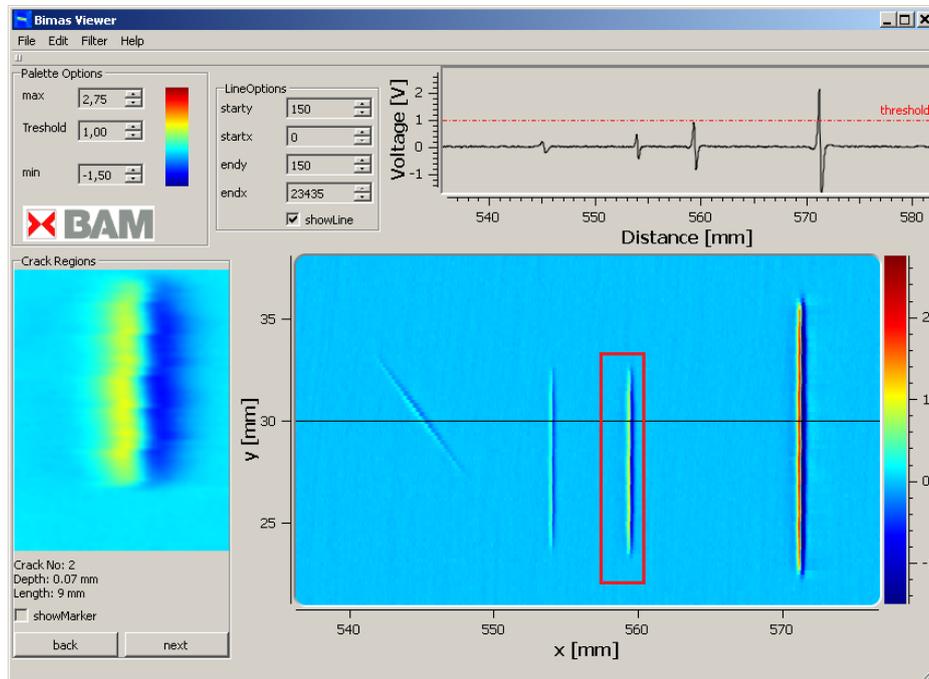


Abbildung 7: Softwareoberfläche zur Darstellung der Daten und Ergebnisse der Streuflussmessung mit GMR-Sensorarrays.

4. Zusammenfassung & Ausblick

Im Rahmen des BIMAS-Projektes konnte mit Verbundpartnern ein erweitertes Labormodell zur automatischen Streuflussprüfung mit ZfP-angepassten GMR-Sensorarrays realisiert werden. Eine Rissprüfung der Mantel- und Stirnflächen von Lagerschalenringen wurde in wenigen Minuten ($t < 2\text{min}$) erfolgreich und zuverlässig durchgeführt. Hierbei war es möglich, Mikrorisse mit Tiefen ab 40 μm nachzuweisen und zu bewerten. Eine Rekonstruktion ermöglicht zudem, die Rissgeometrie nachzubilden. Dies kann hilfreich für das Verständnis der Rissentstehung sein.

Neben der Erprobung der Anlage ist zukünftig eine POD-Analyse des vorgestellten Verfahrens angedacht. Dies ist für eine abschließende Bewertung des Verfahrens sowie seiner Einsatzmöglichkeiten von Bedeutung.

Eine Erweiterung auf komplexere Geometrien und andere Prüfmethode mit GMR-Sensorik sollte hierbei weiter verfolgt werden. Grundsätzlich lassen sich GMR-Sensoren frequenzunabhängig einsetzen und stellen so im unteren Frequenzbereich von wenigen Hz eine Alternative zu den eingesetzten Spulensystemen dar. Dieser Ansatz wird an der BAM weiter verfolgt.

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch das Rahmenprogramm „Mikrosysteme 2004 – 2009“, Verbundprojekt BIMAS, des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (Förderungskennzeichen: 16SV3787).

Des Weiteren danken wir unseren Projektpartnern *Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH* für das Design und den Aufbau des erweiterten Labormodells, *SKF GmbH* für die Bereitstellung von Wälzlagern und *PLR Prüftechnik Linke & Rühle GmbH* für die Zusammenarbeit im Bereich Elektronik. Auch sei den Mitarbeitern des Fachbereichs 8.4 an der BAM zu danken. Hervorzuheben sind hierbei Herr Bertus, Herr Blome, Herr Knöppchen und Herr Thomas.

Referenzen

- [1] Kataoka *et al.*: *Application of GMR line sensor to detect the magnetic flux distribution for non-destructive testing*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics **15** (2001/2002) 47
- [2] Pelkner, M.; Neubauer, A.; Blome, M.; Reimund, V.; Thomas, H.-M.; Kreutzbruck, M. *Flux leakage measurements for defect characterization using NDT adapted GMR sensors*. In Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics; IOP Press: Fairfax, VA, USA, **2011**, pp. 217–224.
- [3] M. Pelkner, A. Neubauer, V. Reimund and M. Kreutzbruck, *Routes for GMR-Sensor Design in Non-Destructive Testing*, 2012, MDPI-Sensors.
- [4] Baibich, M.; Broto, J.; Fert, A.; Nguyen van Dau, F.; Petroff, F.; Eitenne, P.; Cruzet, G.; Friederich, A.; Chazelas, J. *Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices*. Phys. Rev. Lett. 1988, **66**, 2472–2475.
- [5] Binasch, G.; Grünberg, G.; Saurenbach, F.; Zinn, W. *Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange*. Phys. Rev. B 1989, **57**, 4828–4830.
- [6] F. Förster, *New findings in the field of non-destructive magnetic leakage field*, NDT International 19 (1986), 3-14
- [7] N. Zatssepina and V. Shcherbinin, *Calculation of the magneto static field of surface defects. I. Field topography of defect models*, Defektoskopija **5** (1966) 50
- [8] V. Shcherbinin and A. Pashagin, *Influence of the extension of a defect on the magnitude its magnetic field*, Defektoskopija **8** (1972) 74
- [9] T. Erthner, N. Bertus, E. Dohse, A. Neubauer, M. Pelkner, M. Kreutzbruck, *Miniaturisierte Mehrkanalelektronik für die magnetische Streuflussprüfung*, DGZfP-DACH-Tagung 2012, Graz (Österreich)