

Magnetische Streuflussprüfung mit angepassten GMR Sensor Arrays

Andreas Neubauer, Matthias Pelkner, Verena Reimund, Thomas Erthner, Norbert Bertus, Hans-Martin Thomas, Marc Kreuzbruck
 Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
andreas.neubauer@bam.de

Einleitung

Für die zerstörungsfreie Prüfung (zFP) ferromagnetischer Materialien auf offene und oberflächennahe Defekte wird in industriellem Umfeld immer noch standardmässig die Magnetpulvermethode verwendet. Gründe dafür finden sich in der einfachen Prüfmethodik gepaart mit einer hohen Feldempfindlichkeit und Ortsauflösung. Ein prinzipieller Nachteil der Magnetpulverprüfung ist jedoch die fehlende Tiefeninformation, d.h. eine quantitative Messung der Defekttiefe ist mit dieser Methode nicht möglich. Vielfach ist aber eine genaue Kenntnis der Defektparameter vorteilhaft um die Ursachen und das Fortschreiten der Störung zu verstehen, bzw. diese zu vermeiden.

Für eine quantitative Streuflussmessung stehen eine Vielzahl von Magnetfeldsensoren zur Verfügung, wie z.B. Hall-Elemente, magnetoresistive Sensoren, Fluxgate oder SQUID Sonden [1-3]. In dieser Arbeit untersuchen wir die Verwendung von GMR (giant magneto resistance) Sensoren für die magnetische Streuflussprüfung. Diese sind aufgrund ihrer hohen Feldempfindlichkeit, ihres guten Signal-Rausch-Verhältnisses, sowie ihrer kleinen Sensorflächen, die eine hohe Ortsauflösung erlauben, für die zFP besonders geeignet. Dabei wurden grundsätzlich folgende Ziele verfolgt: (i) Ein zuverlässiger Nachweis kleinster Oberflächenrisse im μm -Bereich (Mikrorisse) in ferromagnetischen Bauteilen mit angepassten GMR-Sensoren. (ii) Eine quantitative Verifizierung der experimentellen Ergebnisse durch den Vergleich mit analytisch und numerisch simulierten Streufeldsignalen. Dies beinhaltet eine Simulation der Feldverteilung im ferromagnetischen Bauteil mit der Finite-Elemente-Methode (FEM). (iii) Eine Rekonstruktion der Rissparameter aus den gemessenen Streufeldsignalen. (iv) Das Design eines für die zFP angepassten Sensorarrays und die Entwicklung einer entsprechenden Messelektronik, um die Industrietauglichkeit der GMR-Prüfköpfe zu demonstrieren.

In diesem Bericht wird zunächst das Grundprinzip der magnetischen Streuflussprüfung erläutert und auf verschiedene Riss signale hingewiesen, die in Abhängigkeit unterschiedlicher Sensoranordnungen auftreten. Im nächsten Abschnitt werden Messungen in Remanenz, d.h. an einem aufmagnetisiertem Bauteil, mit einem tangentialen GMR-Gradiometer gezeigt. Hier zeigt sich bereits, dass mit GMR-Sensoren bereits kleinste Oberflächenrisse mit einem guten Signal-Rausch-Verhältnis erkannt werden. Unter Verwendung des analytischen Modells von Shcherbinin [4] kann mit einem einfachen Algorithmus bereits eine schnelle Abschätzung der Defektgeometrien erreicht werden, wie im darauffolgenden Abschnitt dargestellt wird. Im zweiten Teil dieses Berichts werden die Ergebnisse einer GMR-Streuflusssonde mit lokaler Magnetisierung, d.h. eine lokale Aufmagnetisierung des Bauteils mit Hilfe eines Magnetjochs beschrieben. Dies ermöglicht einerseits eine Reduktion der Arbeitsschritte im industriellen Bereich, da dadurch die Entmagnetisierung der zu untersuchenden Bauteile vermieden werden kann. Andererseits ermöglicht es die lokale Magnetisierung eine kontrollierte magnetische Feldverteilung im Bauteil zu erhalten, was wiederum als Grundlage für eine detaillierte Rekonstruktion der Defektparameter dient.

Grundlagen magnetischer Streufluss

Magnetischer Streufluss tritt an Oberflächen- bzw. oberflächennahen Defekten in magnetisierten ferromagnetischen Bauteilen auf, wie in Abbildung 1 (a) schematisch dargestellt ist. Dabei hängt die Stärke des Streuflusses von der Magnetisierung des Bauteils, von dessen Permeabilität, sowie von der Geometrie des Defektes ab. Ein analytisches Modell für die Beschreibung des magnetischen Streuflusses wurde zunächst von Zatssepin und Shcherbinin [5] eingeführt und in späteren Arbeiten erweitert [4, 6]. Dabei zeigt sich, dass die Tiefe des Defektes den stärksten Einfluss auf die Stärke des Streuflusses hat. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Stärke des Streufeldes mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche stark abnimmt ($\sim 1/r^2$). Diese starke Abstandsabhängigkeit spielt eine entscheidende Rolle für den industriellen Einsatz der GMR-Sensoren in der Streuflussprüfung, da ein möglichst geringer und konstanter Abstand (liftoff) zwischen Sensor und Bauteiloberfläche sichergestellt werden muss.

In Abbildung 1 (b) – (d) sind Streuflusssignale für verschiedene GMR-Sensoranordnungen gezeigt, die unter Benutzung des analytischen Modells [4] simuliert wurden. Die blauen Quadrate stellen die Sensoranordnung dar und die schwarzen Pfeile die Abtastrichtung entlang der x-Richtung. Es ist dabei zu beachten, dass in allen Fällen die Normalkomponente H_z des Streufeldes von den Sensoren detektiert wird. In (b) ist das Signal einer Magnetometeranordnung gezeigt; die obere GMR Schicht ist magnetisch geschirmt und nur die untere ist empfindlich für den Streufluss. In (c) ist ein simuliertes Signal für ein GMR-Gradiometer gezeigt, bei der die Sensoren tangential entlang der Bauteiloberfläche angeordnet sind. In (d) ist schließlich ein Gradiometersignal in normaler Anordnung dargestellt. Es zeigt sich, dass das Signal dem der Magnetometeranordnung (b) entspricht, lediglich etwas in der Amplitude reduziert ist. Die Abnahme der Amplitude im Vergleich zum Magnetometersignal hängt dabei vom Abstand der beiden Sensorflächen des Gradiometers ab; je größer der Abstand, umso mehr nähert sich das Gradiometersignal dem Magnetometersignal an. Dies folgt aus der oben erwähnten Abstandsabhängigkeit.

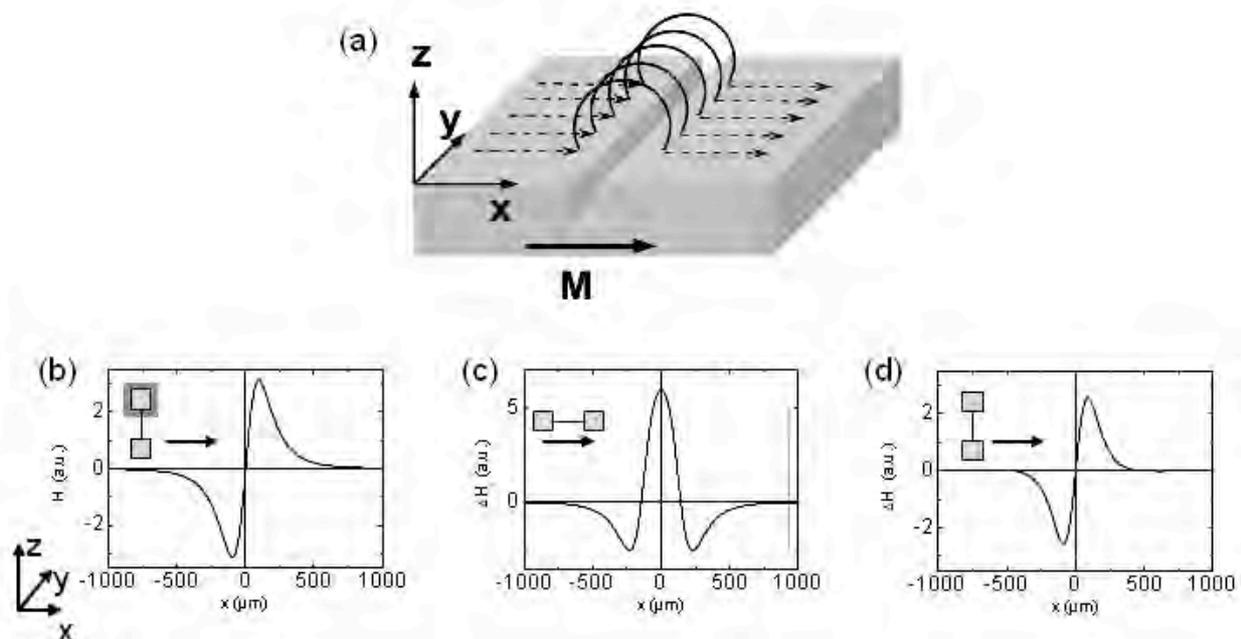


Abbildung 1: (a) Schematische Darstellung des magnetischen Streuflusses an einem Oberflächendefekt. Nach [4] simulierte Risssignale für ein (b) Magnetometer, (c) Gradiometer mit Anordnung der Sensorflächen tangential zur Oberfläche und (d) Gradiometer mit normaler Anordnung der Sensorflächen. Die Sensoren detektieren jeweils die Normalkomponente H_z des Streufeldes.

Messung in Remanenz

Für die Messungen an einem aufmagnetisierten ferromagnetischen Testkörper wurde ein angepasster GMR-Gradiometersensor (siehe Abbildung 2) verwendet. Die vier aktiven Sensorflächen, in einer Wheatstoneschen Brücke geschaltet, sind dabei tangential versetzt angeordnet, wobei sich je zwei Sensoren an der gleichen Position befinden. Der Aufbau entspricht der Darstellung in Abbildung 1 (c). Gemessen wird dabei der Unterschied des Magnetfelds (die Normalkomponente H_z) zwischen den beiden Sensorpositionen, wobei als Maßeinheit die Brückenspannung ($V_a - V_b$) abgegriffen wird. Der Abstand der Sensorpositionen beträgt $250 \mu\text{m}$ und die aktive Sensorfläche der GMR-Schichten $60 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$. Die Umrechnung von gemessener Spannung in Magnetfeld ΔH erfolgt mit einer Transferfunktion von $14 \text{ mV/V} \cdot (\text{kA/m})^{-1}$ im linearen Bereich von $\pm 1 \text{ kA/m}$.

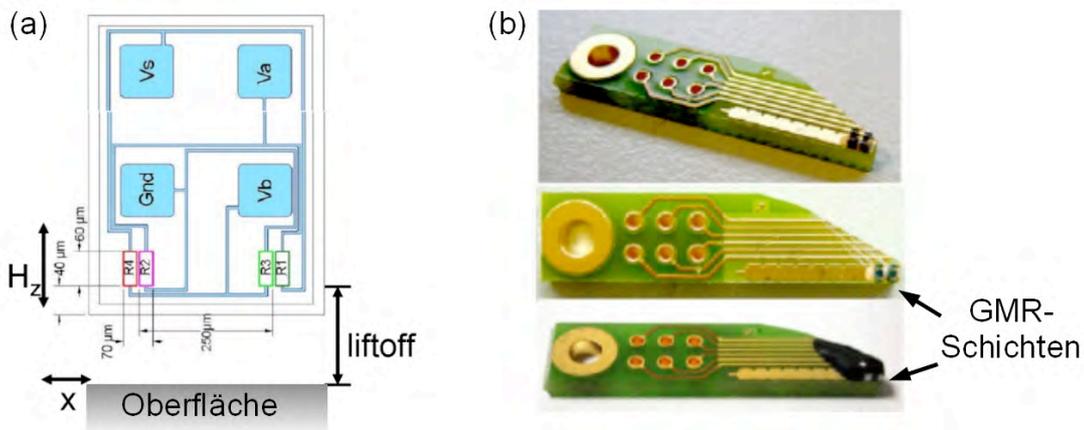


Abbildung 2: (a) Skizze des GMR-Gradiometers (Sensitec GmbH). (b) Bilder verschiedener Messplatinen mit den GMR-Sensoren an deren Spitzen. Um den Abstand zwischen Sensoren und Oberfläche zu reduzieren wurde der schwarze Schutzlack an der Messkante abgeschliffen (siehe unteres Bild).

Als Testobjekt wurde eine Stahlplatte mit künstlich eingebrachten Rissen verschiedener Tiefe verwendet (siehe Abbildung 3 (a)). Die Risse wurden mit einer niederenergetischen Funkerosionsanlage hergestellt, die speziell darauf ausgelegt ist, Materialumformungen zu vermeiden [7]. Die Breite der Risse liegt zwischen $100 - 200 \mu\text{m}$, bei einer Länge von etwa $5500 \mu\text{m}$. Die Aufmagnetisierung des Bauteils vor der Prüfung erfolgte mit der Magnetisierung entlang des Stabes, d.h. senkrecht zu den eingebrachten Rissen. Während der Messung wurde kein magnetisches Feld angelegt, die Messung wurde somit in Remanenz durchgeführt.

Die Oberfläche des Testobjekts wurde mit Linienscans bei verschiedenen liftoffs zwischen Messplatine und Oberfläche vermessen. Ein solcher Linienscan ist in Abbildung 3 (b) dargestellt. An den Defektpositionen sind eindeutige Rissignale zu erkennen. Wie zu erwarten nimmt die Höhe der Signale mit zunehmendem Abstand ($50 \mu\text{m} = \text{schwarz}$, $100 \mu\text{m} = \text{rot}$, $150 \mu\text{m} = \text{grün}$) entsprechend dem theoretischen Modell ab. In Abbildung 3 (c) sind die flacheren Risse vergrößert dargestellt. Man erkennt, dass sich sogar der $44 \mu\text{m}$ tiefe Riss noch deutlich – mit einem Signal-Rausch-Verhältnis $>6 \text{ dB}$ – vom Hintergrund abhebt. Als Ursachen für die Hintergrundsignale sind neben elektronischem Rauschen sowohl Oberflächenrauigkeiten als auch Permeabilitätsschwankungen im ferromagnetischen Material zu nennen.

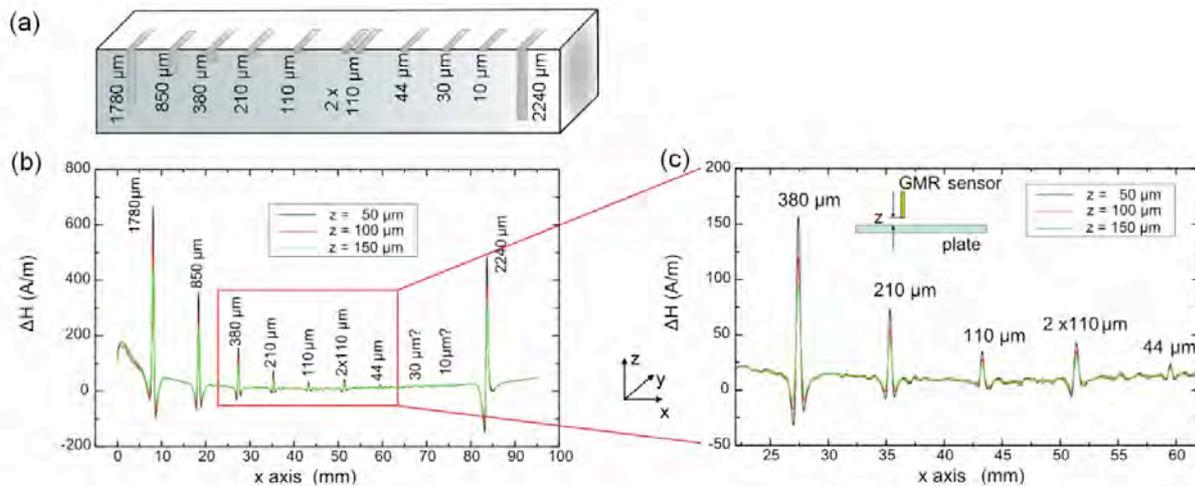


Abbildung 3: (a) Schemazeichnung des Testkörpers mit Angabe der Risstiefe. (b) Streulflusssignale eines Linienscans mit dem GMR-Gradiometer für drei unterschiedliche Abstände z zwischen Sensor und Oberfläche. (c) Vergrößerter Ausschnitt der Signale bei geringen Fehlertiefen. Selbst der 44 μm tiefe Riss ist deutlich zu erkennen.

Parameterschätzung der Defektgeometrie mit analytischem Modell

Die geringe Ausdehnung der GMR-Sensoren ermöglicht eine hohe Ortsauflösung bei der Erfassung der Rissignale. Zusammen mit den guten Signal-Rausch-Verhältnissen erlaubt dies eine genaue Lokalisierung der Defekte. Ausserdem bildet die hohe Güte der GMR-Sensorsignale die Grundlage für eine Rekonstruktion der Defektparameter, vor allem der Fehlertiefe. Um dies zu illustrieren wurde für eine schnelle Abschätzung der Defektparameter das analytische Modell von Shcherbinin [4] als Vorwärtslöser eingesetzt um die Streufeldsignale zu simulieren. Mit diesem Modell können Defektbreite, -tiefe und -länge eines einfachen rechteckigen Risses simuliert werden. Für die Minimierung der Fehlerquadrate zwischen Messdaten und vorhergesagtem analytischem Modell wurde der Levenberg-Marquardt-Algorithmus angewendet. Dabei wurde die Lösungsmenge durch physikalisches Vorwissen beschränkt. Eine detaillierte Beschreibung dieser Parameterabschätzung findet sich in [8,9].

In Abbildung 4 ist die Parameterabschätzung für den 210 μm (a) und 44 μm (b) tiefen Riss (vgl. Abbildung 3) gezeigt. Im jeweils linken oberen Bild sind die mit dem Gradiometersensor experimentell gemessenen Daten in einem Falschfarbenplot dargestellt. Im Falschfarbenplot daneben sind die anhand der Parameterabschätzung berechneten Streufeldwerte gezeigt. Die gute Übereinstimmung (vor allem für den 210 μm tiefen Riss) der gemessenen und berechneten Ergebnisse wird durch die zehn rechts davon gezeigten Linienscans hervorgehoben. Die durchgehenden Linien zeigen dabei die gemessene Streufeldverteilung und die gepunkteten Linien die berechnete Verteilung. Im jeweils unteren Bild sind die Parameterabschätzungen für die Defekttiefe, Länge und Breite als Funktion der Iterationsschritte dargestellt. Es zeigt sich, dass bereits nach weniger als 10 Iterationen eine Konvergenz der Parameter erreicht wird. Neben der guten Übereinstimmung der Parameterabschätzung mit den gemessenen Streufeldern sei noch darauf hingewiesen, dass die Berechnungen sehr schnell erfolgen. Insgesamt sind für eine komplette Parameterabschätzung nur einige Sekunden auf einem handelsüblichem Computer nötig.

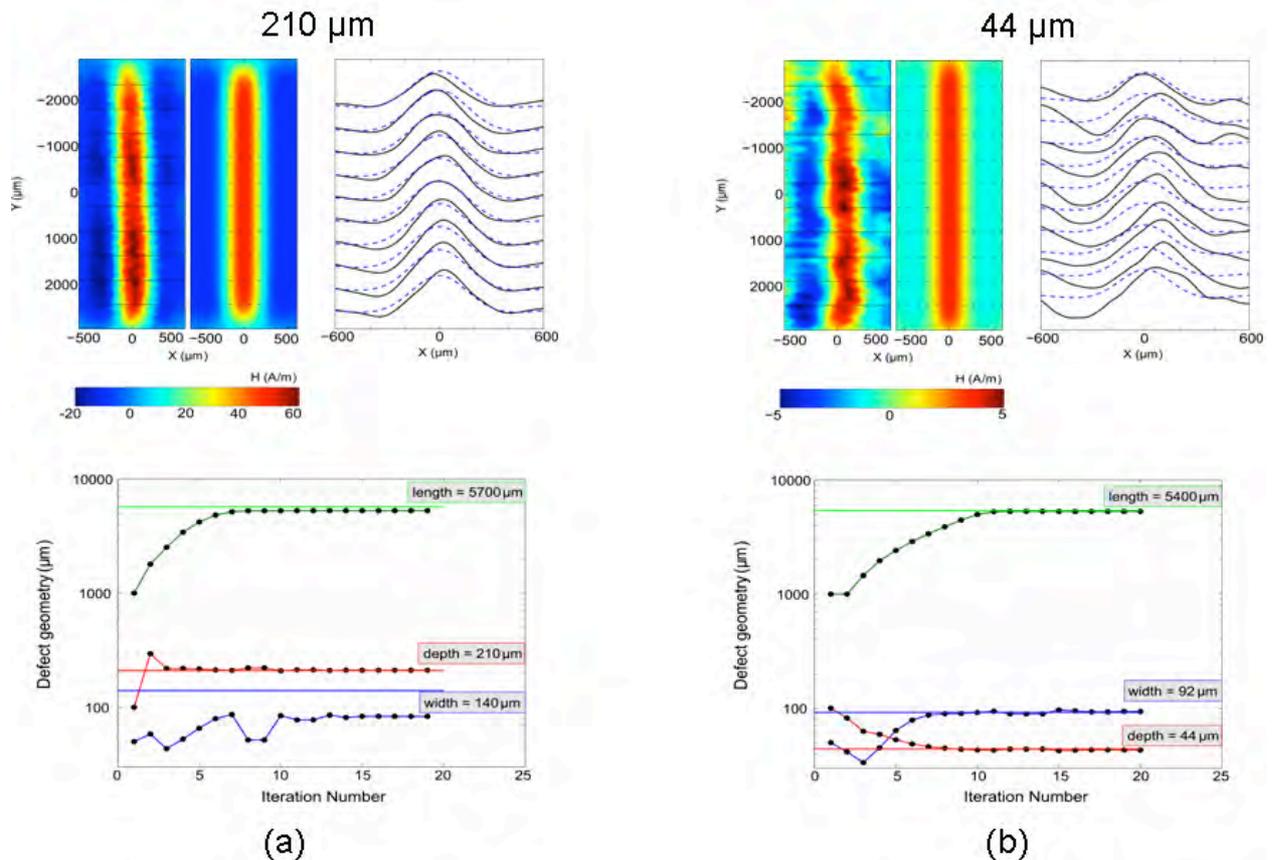


Abbildung 4: Vergleich der experimentellen und berechneten Streufeldverteilungen für den 210 µm (a) und 44 µm (b) tiefen Riss (vgl. Abbildung 3). Die Falschfarbendarstellungen zeigen jeweils die gemessene (links) und berechnete (rechts) Streufeldverteilung. Daneben sind exemplarisch 10 Linienscans zum Vergleich der gemessenen (durchgehend) und berechneten (gepunktet) Feldverteilung gezeigt. In den unteren Bildern ist jeweils die Parameterabschätzung als Funktion der Iterationsschritte dargestellt.

Lokale Magnetisierung

Experimentelle Methoden und Simulation

Eine lokale Aufmagnetisierung des Bauteils kann zu einer Reduzierung der Prüfzeit im industriellen Bereich führen, da der Arbeitsschritt der Entmagnetisierung gegebenenfalls entfallen kann. Des Weiteren ermöglicht die lokale Magnetisierung eine homogene und durch Simulation näherungsweise bekannte Feldverteilung im Bauteil, welche für eine genaue Rekonstruktion der Defektparameter von enormer Wichtigkeit ist.

In Abbildung 5 ist die lokale Magnetisierungseinheit, die speziell für die Prüfung von Lagerschalen entwickelt wurde, dargestellt. Diese Sonde ermöglicht es sowohl den Abstand zwischen Magnetjoch und Prüfoberfläche, als auch den Abstand zwischen Sensor/Messplatte und Prüfoberfläche unabhängig voneinander einzustellen.

Bei der Konstruktion dieser Magnetisierungseinheit wurde die Auslegung des Magnetjochs durch Finite-Elemente-Simulationen (Opera, VectorFields) unterstützt. Eine Simulation der Feldverteilung im Magnetjoch und im Bauteil ist in Abbildung 6 dargestellt. Dabei haben neben der Geometrie des Jochs und Bauteils vor allem der Abstand zwischen Joch und Bauteil, sowie

die Permeabilitäten der Materialien einen starken Einfluss auf die simulierte Feldverteilung. In Abbildung 6 (b) ist die Feldverteilung im Bauteil in einer Tiefe von 100 μm dargestellt. Es zeigt sich, dass die zentrale Feldanregung (rote Punkte) zwischen Aussenkante und Mitte des Jochs um etwa 30% variiert. Dieser Verlauf ist vor allem bei der Verwendung von Sensorarrays zu beachten. Die hier gezeigte Simulation zeigt allerdings nur den statischen Fall. Für den dynamischen Fall, d.h. wenn die Sonde entlang des Prüfteils bewegt wird, sind für die Simulation der Feldverteilung die Hysterese/Remanenz des Prüfteils zu beachten. Derartige Simulationen sind derzeit in Bearbeitung.

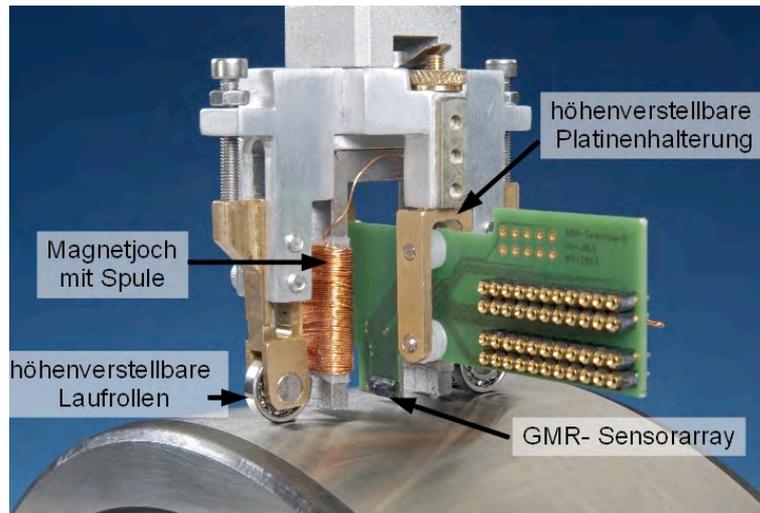


Abbildung 5: Lokale Magnetisierungseinheit mit Messplatine.

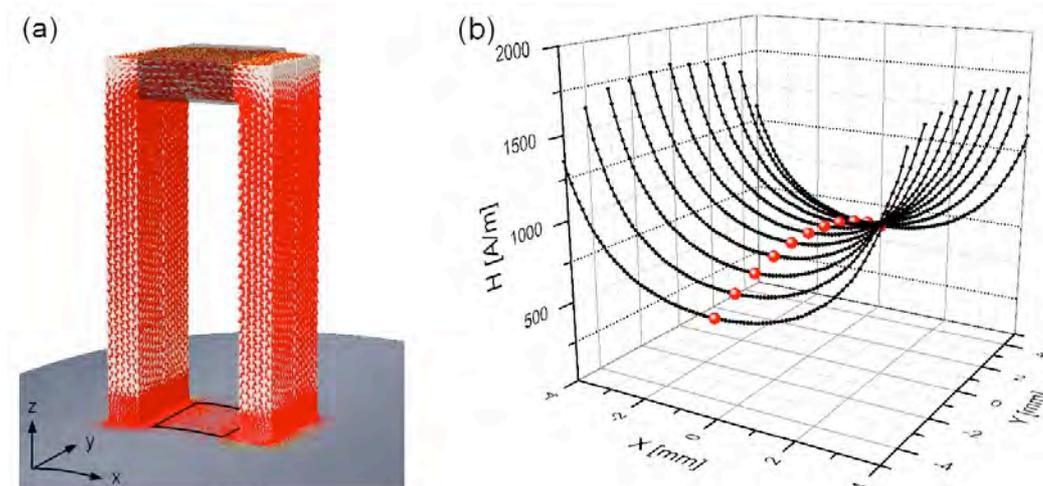


Abbildung 6: Statische Finite-Elemente-Simulation; (a) Vektordarstellung der Feldverteilung im Magnetjoch und Prüfteil. (b) Magnetfeldverteilung im Prüfteil in 100 μm Tiefe zwischen den Schenkeln des Magnetjochs. Die roten Punkte illustrieren die Feldverteilung entlang der Jochmitte. Vom Zentrum nach außen nimmt das Magnetfeld um etwa 30% ab.

Detektion von Oberflächenrissen

Mit der oben beschriebenen lokalen Magnetisierungseinheit wurde ein Lagerschalenring mit künstlich eingebrachten Oberflächenrissen untersucht. Abbildung 7 (a) zeigt schematisch die Anordnung der Risse mit einer Breite von etwa $90\ \mu\text{m}$, einer Länge von einigen Millimetern und unterschiedlichen Ristiefen. Zusätzlich wurde ein um 45° gedrehter Riss eingebracht. Die zwei Spulen des Magnetjochs wurden mit einem Strom $I = 1\ \text{A}$ bei $N = 2 \times 100$ Wicklungen betrieben. Der Abstand zwischen Magnetjoch und Oberfläche betrug etwa $50\ \mu\text{m}$. Als GMR-Sensor wurde ein angepasstes Magnetometer (siehe Abbildung 1 (b)) verwendet, bei dem die sensitive Fläche ($20\ \mu\text{m} \times 17\ \mu\text{m}$) sehr nahe an die Messkante angebracht war. Damit konnte ein Abstand zwischen Sensor und Oberfläche von etwa $100 - 150\ \mu\text{m}$ erreicht werden.

Abbildung 7 (b) zeigt einen Flächenscan über die Oberflächenfehler in einer Falschfarbendarstellung der Rissignale. Alle senkrechten Risse, sowie der um 45° verdrehte und nur $42\ \mu\text{m}$ tiefe Riss sind deutlich zu erkennen. In dieser Darstellung sind die reinen Messsignale ohne weitere Bildverarbeitung oder Filterung dargestellt. Lediglich der absolute Feldwert ist zur Verbesserung der Erkennbarkeit der kleinen Risse auf $100\ \text{A/m}$ beschränkt. In Abbildung 7 (c) ist ein Linienscan (entlang der schwarzen Linie in (b)) gezeigt. Es zeigt sich, dass alle geraden Rissignale klar erkennbar sind. Für den nur $40\ \mu\text{m}$ tiefen Riss wurde ein Signal-Rausch-Verhältnis von mindestens $10\ \text{dB}$ gemessen.

Ein quantitativer Vergleich der gemessenen Rissamplituden mit den berechneten Amplituden ist derzeit nur eingeschränkt möglich, da die Magnetfeldverteilung im Bauteil aufgrund der Hystereseeffekte noch nicht ausreichend genau bekannt ist. Zusätzlich ist eine genaue Kenntnis des Abstands zwischen Sensor und Bauteil aufgrund der starken Abstandsabhängigkeit des Streufeldes nötig. Die in unserer Gruppe speziell für die zFP entworfenen GMR-Sensorarrays (siehe nächster Abschnitt) und Messplatinen werden eine genaue Abstandsmessung in Kürze ermöglichen.

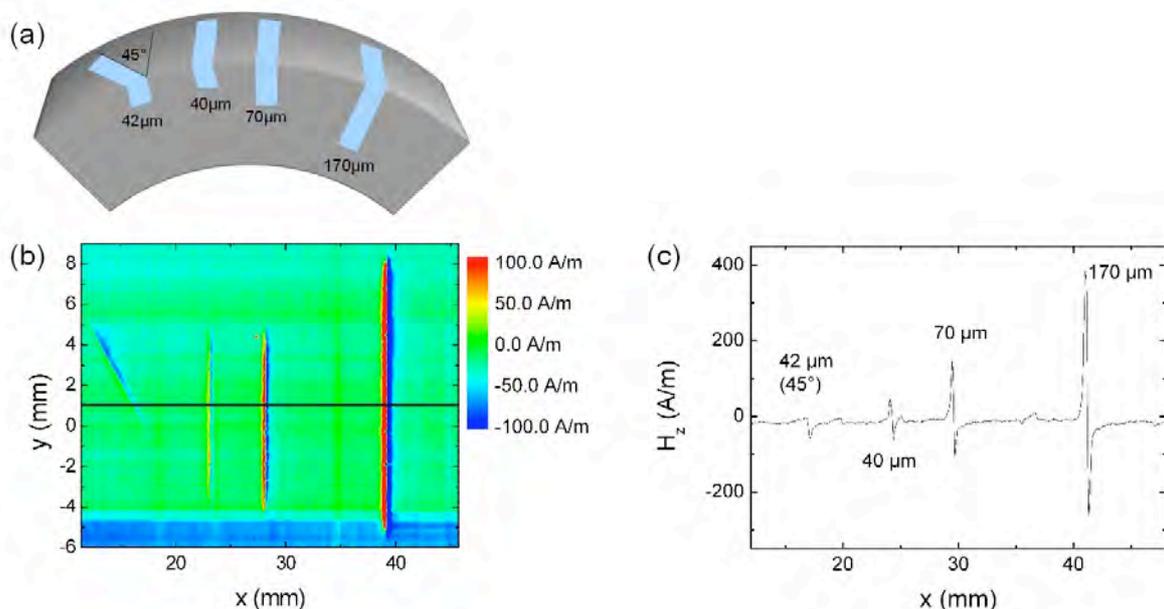


Abbildung 7: (a) Schematische Darstellung der in die Lagerschalen funkenerosiv eingebrachten Risse unterschiedlicher Tiefe. (b) Falschfarbendarstellung der Rissignale. (c) Linienscan über die Oberflächenrisse entlang der schwarzen Linie in (b).

ZfP-angepasste GMR Sensorarrays

Die oben gezeigten Messungen wurden mit Prototypen von unterschiedlichen GMR-Sensoren durchgeführt, deren Anpassung an die Bedürfnisse der Streuflussprüfung darin bestand, den Abstand zwischen Bauteil und aktiver Sensorfläche durch mechanisches Abschleifen zu minimieren. Aufgrund der damit erzielten positiven Ergebnisse haben wir speziell für die zfP optimierte Sensorarrays mit bis zu 16 Sensoren konzipiert und in hoher Anzahl auf 5-Zoll-Silizium-Wafern fertigen lassen. Als Sensorlayout wurde ein Gradiometer entsprechend Abbildung 1 (d) gewählt. Für diese Anordnung sprechen sowohl fertigungstechnische als auch physikalische Gründe. Um die Anordnung und Geometrien der aktiven Sensorflächen optimal auf die Bedürfnisse der zfP anzupassen, wurde eine ausführliche Parameterstudie durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung dieser Parameterstudie findet sich in Kürze in [10].

Zwei unterschiedliche Entwürfe der Sensorarrays, sowie die entsprechenden gefertigten Chips sind in Abbildung 8 dargestellt. Dabei handelt es sich um ein (a) 8er-Array mit einer Schichtlänge von 400 μm und einem (b) 16er-Array mit einer Schichtlänge von 200 μm . Die effektive Messbreite dieser Sensorarrays beträgt jeweils 3,4 mm. In Abbildung 8 (c) ist eine Anordnung von zwei dieser Chips auf einer speziell dafür entworfenen Platine zu sehen. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf einem minimiertem Abstand zwischen den aktiven Sensorflächen und der Messkante der Platine, um einen minimalen Abstand zwischen Sensoren und Prüfteil zu gewährleisten.

Um die für industrielle Anwendungen notwendigen hohen Prüfgeschwindigkeiten zu erreichen, ist vorgesehen, die gesamte Messkante (10,2 mm) der in Abbildung 8 (c) dargestellten Platine mit drei 16er Arrays zu bestücken. Die Messdaten der 48 Sensoren werden über eine von uns derzeit entwickelte schnelle Multiplexelektronik ausgelesen, die es uns erlaubt, eine Prüfgeschwindigkeit von 1m/s bei einer äquidistanten Schrittweite der Messpunkte von 50 μm zu erreichen.

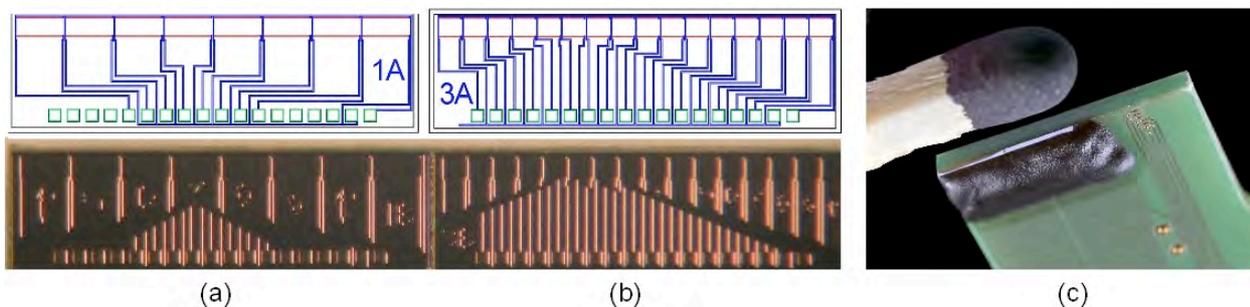


Abbildung 8: Skizze und gefertigtes Sensorarray bestehend aus (a) 8 und (b) 16 GMR-Schichten in einer Gradiometeranordnung. Die Spannungssignale werden über eine Halbbrücke mit Referenzwiderstand ausgelesen. (c) Bild einer mit 2 Sensorarrays bestückten Messplatine.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Bericht haben wir gezeigt, dass es angepasste GMR-Sensoren in der magnetischen Streuflussprüfung ermöglichen, kleinste Oberflächendefekte im μm -Bereich verlässlich nachzuweisen. Sowohl in Remanenz als auch mit einer lokalen magnetischen Anregung konnten wir die Streuflusssignale von künstlichen Fehler mit Tiefen von 44 μm und 40 μm bei Signal-Rausch-Verhältnissen $> 6\text{dB}$ messen, ohne weitere Bildverarbeitungsalgorithmen anzuwenden.

Unter Anwendung des Levenberg-Marquardt-Algorithmus und Beschränkung der Lösungsmenge durch physikalisches Vorwissen wurde eine schnelle Parameterabschätzung durchgeführt, die es ermöglicht die Defektparameter von einfachen rechteckigen Rissgeometrien mit Hilfe des analytischen Modells von Shcherbinin [4] abzuschätzen. Wir konnten zeigen, dass die mit einem GMR-Gradiometer erhaltenen Messdaten diesbezüglich zu einer guten Übereinstimmung der abgeschätzten Defektgeometrien mit den realen Fehlern führen.

Für industrielle Prüfanwendungen ist die Verwendung einer lokalen Magnetisierungseinheit vielversprechend, da dies eine Reduktion der Prüfzeiten durch den Wegfall der Entmagnetisierung der zu untersuchenden Bauteile ermöglicht. Des weiteren ermöglicht es eine lokale Magnetisierung detaillierte Informationen über die magnetische Feldverteilung im Bauteil zu erhalten. Die von uns konstruierte lokale Magnetisierungseinheit ermöglicht die zuverlässige Durchführung von Prüfungen unter gleichbleibenden Bedingungen, wie sie für industrielle Anwendungen notwendig sind. Exemplarisch dafür konnten wir bereits kleinste Rissen in ferromagnetischen Lagerschalen verlässlich nachweisen. Um allerdings eine Rekonstruktion der Defektparameter durchführen zu können, muss zunächst noch die Feldverteilung im Prüfteil unter Berücksichtigung der Hystereseeffekte mit Finite-Elemente-Methoden im Detail simuliert werden.

Als weiteren Schritt für eine Anwendung von GMR-Sensoren in der zFP haben wir speziell für die magnetische Streuflussprüfung angepasste Sensorarrays entwickelt und in hoher Anzahl auf 5-Zoll-Silizium-Wafern fertigen lassen. Derzeit führen wir erste Tests mit diesen Sensorarrays auf ebenfalls speziell für die zFP angepassten Messplatinen durch. Unser Ziel ist es, bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 m/s und einer äquidistanten Schrittweite der Messpunkte von 50 µm mit einem Array von 48 Sensoren eine Messkante von 10 mm abzudecken.

Referenzen

- [1] F. Förster, *Non Destructive Testing*, **13**, 31-41, (1955).
- [2] H.-J. Krause und M. v. Kreutzbruck, *Physica C*, **368**, 70-79, (2002).
- [3] C.H. Smith und R. Schneider, *10th SPIE International Symposium, Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics*, Conference 5770, (2003).
- [4] V. Shcherbinin und A. Pashagin, *Defektoskopija* **8**, pp. 74-83 (1972).
- [4] N. Zatsepin und V. Shcherbinin, *Defektoskopija* **5**, pp. 50-59 (1966).
- [6] C. Edwards und S. B. Palmer, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **19**, pp. 657-673 (1986).
- [7] R. Sickert, und A. Knöppchen, *DGZfP Tagungsband, Annual meeting*, (2003).
- [8] M. Pelkner *et al.*, *Review of Progress in QNDE*, **30A**, AIP Conference Proceedings **1335**, 380-387, (2010).
- [9] V. Reimund *et al.*, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, **37**, 199-205, (2010).
- [10] M. Pelkner *et al.*, "Size-Adaption of GMR-Layers in NDT-applications", in Vorbereitung.