

3D-GMR-Messung an Referenzbauteilen und Rekonstruktion der Rissparameter

Matthias PELKNER, Verena REIMUND, Mark BLOME, Hans-Martin THOMAS,
Marc KREUTZBRUCK

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

Kontakt: Matthias.Pelkner@bam.de

Kurzfassung. Zunehmend werden hochpräzise Magnetfeldsensoren in der Materialprüfung verwendet. Aus dem Zoo der Magnetfeldsensoren eignen sich GMR-Sensoren (Giant Magneto Resistance) aufgrund ihrer hohen Feld-Empfindlichkeit, ihrem hohen Signal-Rausch-Verhältnis sowie ihrer kleinen Sensorflächen (verbunden mit einer hohen Ortsauflösung) hierfür im Besonderen. Mit GMR-Sensoren wurden Risse untersucht und konnten mit einer Tiefe $\leq 50 \mu\text{m}$ noch mit einem guten Signal-Rausch-Verhältnis aufgelöst werden. Die an Prüfkörpern mit künstlich eingebrachten Defekten gemessenen Streufeldsignale wurden anhand von analytischen Lösungen verifiziert. Anhand der analytischen Lösungen wurden auch Defektparameter zu den aufgezeichneten Signalen rekonstruiert.

1. Einleitung

Die Magnetpulverprüfung (MP) ist das am häufigsten eingesetzte ZfP-Verfahren zur Risserkennung und Kontrolle von Bauteilen. Dabei wird ausgenutzt, dass sich magnetische Partikel an durch Inhomogenitäten im Material erzeugten magnetischen Streufeldern anlagern (siehe Abb. 1). Dadurch werden auch kleinste Fehler (Risstiefe $\leq 50 \mu\text{m}$) mittels einer Sichtprüfung erkannt.

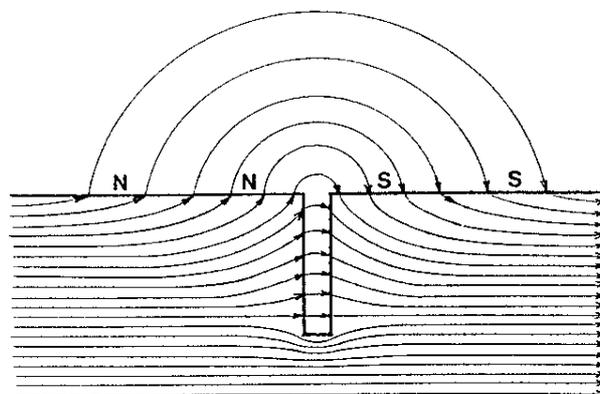


Abbildung 1: Verlauf des magnetischen Streufeldes am Ort eines Risses [1]

Will man jedoch die Defektgeometrie aus einer Streufeldmessung zerstörungsfrei bestimmen, ist eine quantitative Bestimmung des Streufeldes erforderlich. Mittels MP ist eine Abschätzung der Tiefe kaum möglich. Abhilfe können hierbei Magnetfeldsensoren wie Hall-Elemente, SQUID-Sonden oder Magnetwiderstandssensoren (engl. magneto resistance (MR)) schaffen, welche aufgrund einer quantitativen Detektion des Magnetfeldes eine genauere Bestimmung zulassen. Der GMR-Sensor (giant magneto resistance, Riesenmagnetwiderstand) besitzt neben seiner hohen Empfindlichkeit von $< 1 \text{ nT}/(\text{Hz})^{1/2}$ und dem damit einhergehenden hohen Signal-Rausch-Abstand den Vorteil, dass es sich um sehr kleine Strukturen handelt, wodurch eine hohe Ortsauflösung im mittleren μm -Regime erreicht wird.

Im Folgenden werden GMR-Messungen an Referenzbauteilen vorgestellt. Neben Gradiometersensoren sind auch 3D-GMR-Magnetometer eingesetzt worden. Mit diesen Sensoren lassen sich simultan alle drei Raumkomponenten des Streufeldes bestimmen. Der Beitrag zeigt u.a. wie mittels der ermittelten Messdaten es möglich ist, die Rissparameter durch eine Rekonstruktion sehr genau zu bestimmen.

2. GMR-Sensoren

Der GMR-Effekt ist seit seiner Entdeckung 1988 durch Peter Grünberg [2] und Albert Fert (Physiknobelpreis 2007) in vielen Applikation zum Einsatz gekommen. Beispiele sind u.A. Festplattenleseköpfe, Geschwindigkeitsmesser, Winkelsensoren. Dies ist nur möglich, weil seit den 80er Jahren im Bereich der Dünnschichttechnologie hinsichtlich Reinheitsgrad und schichtgenaues Wachstum viele Fortschritte erreicht wurden. Dies ist deswegen von Bedeutung, da der GMR-Effekt nur in Schichtstrukturen mit mindestens zwei ferromagnetischen Schichten (FM), welche durch eine nichtmagnetische Schicht (NM) voneinander getrennt sind, auftreten kann. Physikalisch handelt sich dabei um einen Grenzflächenstreuungseffekt der Leitungselektronen beim Übergang von der nichtmagnetischen zur ferromagnetischen Schicht. Der sich hieraus ergebende Widerstand wiederum ist abhängig von der Orientierung der Magnetisierung der beiden FM-Schichten zueinander. In einer spin-valve-Struktur wird dies genutzt, indem eine Magnetisierung „festgehalten“ und die andere durch ein externes Feld beeinflusst wird. Daraus kann, wie in Abb.2 dargestellt, eine Übertragungsfunktion zwischen Widerstand bzw. Spannung und Magnetfeld abgeleitet werden.

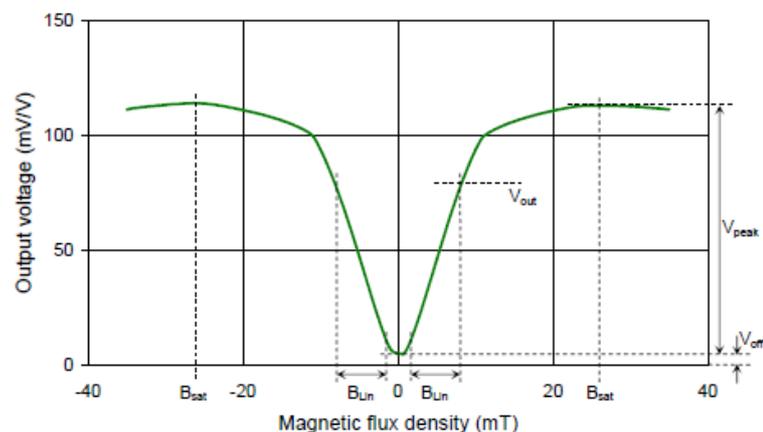


Abbildung 2: Beispiel einer Übertragungsfunktion zwischen gemessener Spannung des Sensors und des Magnetfeldes am Ort des Sensors [3]

Auch in der ZfP ist der Einsatz von GMR-Sensoren sowohl für Streufeldmessung als auch als Wirbelstromsensor untersucht worden [4,5]. Dabei wurden aber in der Regel Sensoren eingesetzt, die nicht auf ZfP-Applikationen angepasst sind. Das bedeutet, dass in diesen Fällen die sensitiven Flächen des GMR zu weit von der Oberfläche des Testobjekts entfernt sind. Um Streufelder von kleine Oberflächen-Defekten im Material hinreichend genau bestimmen zu können, sind Sensoren nötig, deren GMR-Elemente nicht weiter als wenige 100 μm von der Oberfläche entfernt sind.

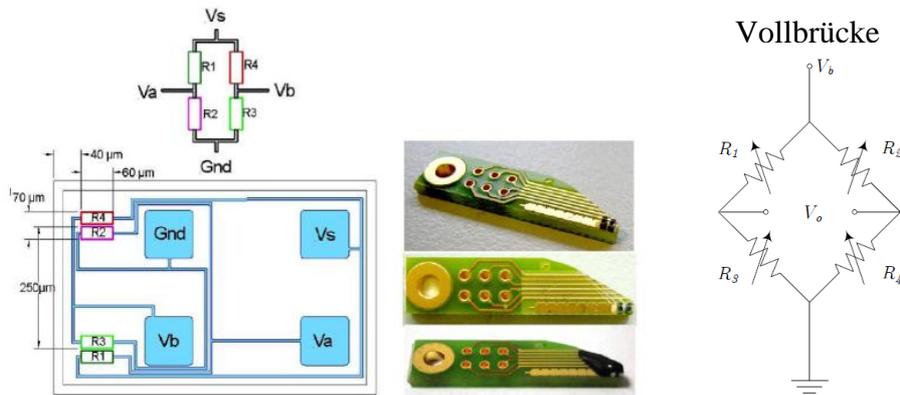


Abbildung 3: Gradiometersensoren der Fa. Sensitec GmbH (Lahnau, D) [3]. Bei der gemessenen Größe handelt es sich um den Feldgradienten ($V_{\text{GMR}} \propto \Delta(H_1 - H_2)$) zwischen den beiden Orten, an denen sich je zwei GMR-Elemente befinden.

In dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Sensortypen der Fa. Sensitec GmbH, Lahnau, verwendet. Dabei handelt es sich um einen Gradienten- und um einen Magnetometersensor. Der Gradientensensor (wie in Abb. 3 dargestellt) besitzt vier sensitive Elemente, die in einer Wheatstonebrücke angeordnet sind. Gemessen wird in diesem Fall die anliegende Brückenspannung. Der Vorteil einer solchen Konfiguration besteht darin, dass Temperatureinflüsse sich auf alle Elemente gleich auswirken, somit im Messsignal subtrahiert werden und keinen Einfluss haben. Zudem handelt es sich um eine Vollbrücke, bei der alle vier Elemente dem externen Feld ausgesetzt sind, wobei je zwei Elemente (immer die Diagonalelemente (siehe Abb. 3)) sich am selben Ort befinden. Als Messgröße erhält man im Fall des Gradientensensors die Differenz zwischen den beiden Magnetfeldstärken an dem jeweiligen Ort der Elemente. Ein weiterer Vorteil einer solchen Anordnung besteht darin, dass äußere stationäre Felder ebenso durch Subtraktion im gemessenen Signal nicht enthalten sind.

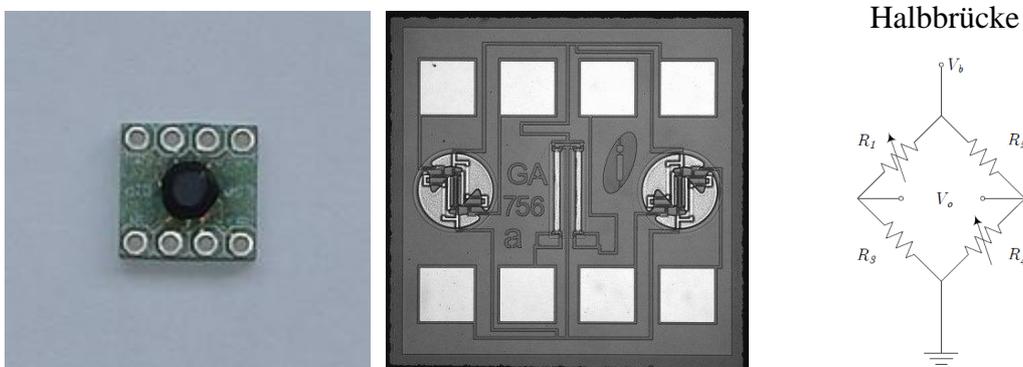


Abbildung 4: 3D-Magnetometer, bei dem die Feldkomponenten in alle drei Raumrichtungen bestimmt werden. Dabei handelt es sich jeweils um eine Halbbrücke (rechtes Bild, zwei Elemente sind geschirmt). Die sensitiven Elemente befinden sich zudem in einer Ebene [3].

Der zweite Sensor ist ein 3D-Magnetometer, bei dem wiederum je vier Elemente in einer Wheatstonebrücke angeordnet sind (Abb.4). Jedoch werden in diesem Fall zwei Elemente durch eine hochpermeable Folie von dem externen Feld abgeschirmt. Es handelt sich um eine Halbbrücke. Das hat den Vorteil, dass die Brückenspannung proportional (im linearen Bereich) zur externen Feldstärke ist. Jedoch werden in diesem Fall externe Störquellen, wie z.B. das Erdmagnetfeld, im Messsignal mit aufgenommen und müssen bei der Analyse der Messdaten berücksichtigt werden. Der große Vorteil dieses Sensors besteht darin, dass das Magnetfeld in alle drei Raumrichtungen in situ gemessen werden kann. Des Weiteren befinden sich die sensitiven Flächen in einer Ebene, so dass der Abstand Sensor-Testobjektoberfläche für alle drei sensitiven GMR-Strukturen konstant ist.

3. Analytisches Modell nach Shcherbinin und Rekonstruktion der Rissparameter

Um Rissparameter aus den Messdaten bestimmen zu können, sind mathematische Modelle nötig. Mittels der Finite-Element-Methode (FEM) lassen sich komplexe Geometrien unter Berücksichtigung nichtlinearer Materialeigenschaften modellieren. Um jedoch eine erste Abschätzung der Defektgeometrie zu erhalten, ist es für Streuflussprobleme sinnvoll, analytische Ausdrücke zu verwenden, da FEM-Berechnungen sehr zeitaufwendig sind. In der Literatur finden sich verschiedene Herangehensweisen zur Berechnung des Streufeldes eines Risses. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Modell von Zatsepin und Shcherbinin [6] verwendet. Dabei wurden analytische Formeln zur Berechnung eines unendlich langen Risses aufgestellt. Dieses Modell wurde später auf endlich lange Risse erweitert [7]. Mit diesem Ansatz lassen sich die Streufelder an einem beliebigen Ort (x,y,z) über einem Riss in Abhängigkeit von den Rissparametern Länge $l=2c$, Klaffung $w=2a$ und Tiefe $t=b$ berechnen:

$$\begin{aligned} H_x &= \int_{-b-c}^0 \int_0^{+c} \frac{\sigma_s x \partial y' \partial z'}{4\pi \{x^2 + (z-z')^2 + (y-y')^2\}^{3/2}} \\ H_y &= \int_{-b-c}^0 \int_0^{+c} \frac{\sigma_s (y-y') \partial y' \partial z'}{4\pi \{x^2 + (z-z')^2 + (y-y')^2\}^{3/2}} \\ H_z &= \int_{-b-c}^0 \int_0^{+c} \frac{\sigma_s z \partial y' \partial z'}{4\pi \{x^2 + (z-z')^2 + (y-y')^2\}^{3/2}} \end{aligned} \quad (1)$$

In Gleichung (1) wird zusätzlich ausgehend vom magnetischen Feld innerhalb des Risses H_a die magnetische Ladungsdichte σ_s eingeführt, welche ebenfalls von der Rissgeometrie abhängt:

$$\sigma_s = \frac{1}{2\pi} \frac{2b/w + 1}{\left(\frac{1}{\mu_r}\right)^{2b/w + 1}} H_a \quad (2)$$

Dabei wird angenommen, dass sich die magnetische Ladungsdichte σ_s mit unterschiedlichen Vorzeichen an den Defektwänden senkrecht zur Magnetisierungsrichtung gleichmäßig stark verteilt.

Mit den Gl. (1) und (2) lassen sich nun die Streufelder in alle drei Raumrichtungen für einen Riss mit endlichen Dimensionen berechnen:

$$H_{x,y,z}(x, y, z) = \tilde{H}_{x,y,z}(x-a, y, z) - \tilde{H}_{x,y,z}(x+a, y, z) \quad (3)$$

Um die Sensorsignale zu simulieren, müssen zusätzlich die Größe der sensitiven Flächen des Gradientensensors sowie der Abstand zwischen ihnen berücksichtigt werden. Dies in Abb. 5 (a) dargestellt.

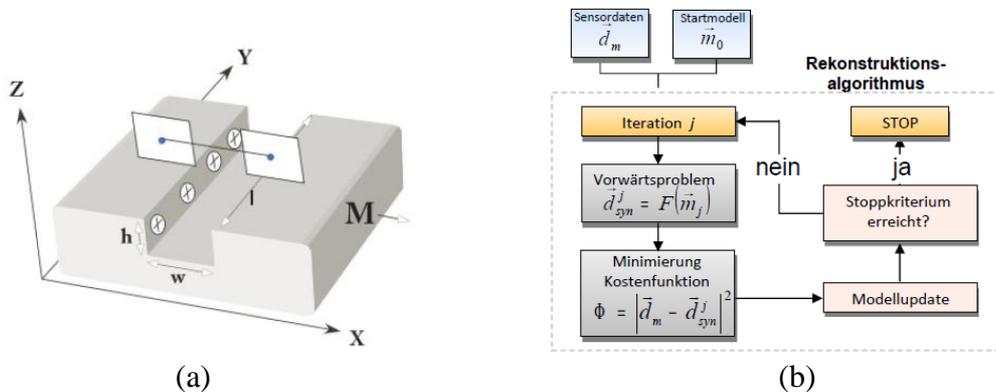


Abbildung 5: (a) Darstellung der Rissgeometrie und der sensitiven Flächen eines Gradientensensors sowie des verwendeten Koordinatensystems. (b) Blockschaltbild des Rekonstruktionsalgorithmus

In Abb. 5 (b) ist der Algorithmus der Rekonstruktion in einem Blockdiagramm dargestellt. Hierbei werden die Messdaten mit einem synthetischen Signal solange miteinander verglichen, bis das Stoppkriterium erreicht wird, d.h. die Differenz zwischen Messdaten und analytischen Lösungen ein Minimum einnimmt. Aus diesem Vorgehen lassen sich so mit Hilfe der analytischen Formeln von Shcherbinin die Rissparameter abschätzen.

4. Ergebnisse

Streifeldmessungen mittels GMR-Sensoren wurden an einem Referenzbauteil aus herkömmlichen Baustahl ST37 durchgeführt (100 mm lang, 50 mm breit und 10 mm hoch). In diesen Testkörper sind Risse durch Funkenerosion eingebracht, deren Längen ungefähr 5000 μm und Klaffungen zwischen 100 und 150 μm betragen. Die Tiefe wurde zwischen 10 und 2240 μm variiert. Eine Querschnittsansicht mit den einzelnen Risstiefen ist in Abb. 6 dargestellt.

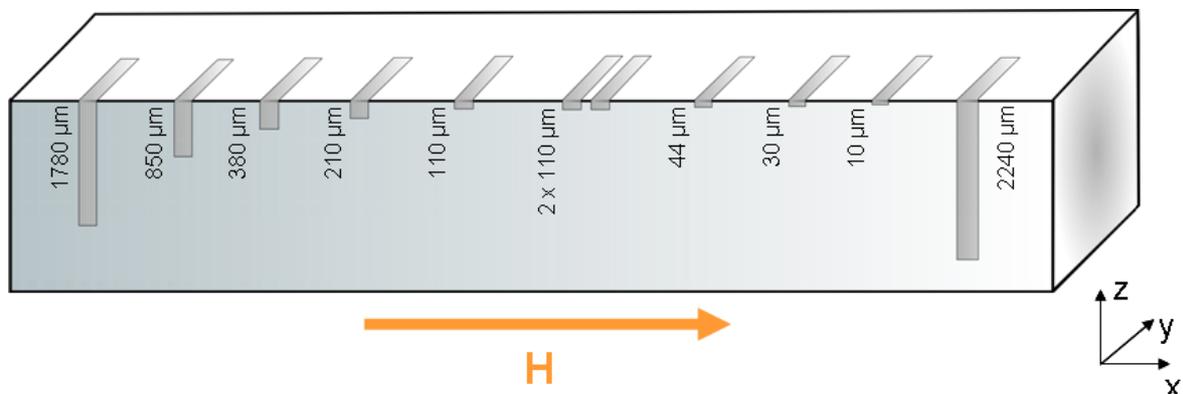


Abbildung 6: Querschnittsansicht des Referenzbauteils mit Angabe der einzelnen Risstiefen. Auch ist der Abbildung die Magnetisierungsrichtung zu entnehmen.

Die Messungen wurden in Remanenz durchgeführt, d.h. das Bauteil wurde vorher in einer Magnetbank aufmagnetisiert. Dabei ist das Magnetfeld senkrecht zu den Rissen orientiert.

4.1 Gradiometermessungen und Rekonstruktion der Rissparameter

Um eine ausreichend große Signalamplitude auch bei kleinen Rissen noch detektieren zu können, ist es entweder nötig, das Bauteil stark zu magnetisieren oder die sensitiven Flächen nah an die Testobjektoberfläche heranzubringen. Die zweite Variante bietet den Vorteil, eine eventuell notwendige Entmagnetisierung zu vermeiden.

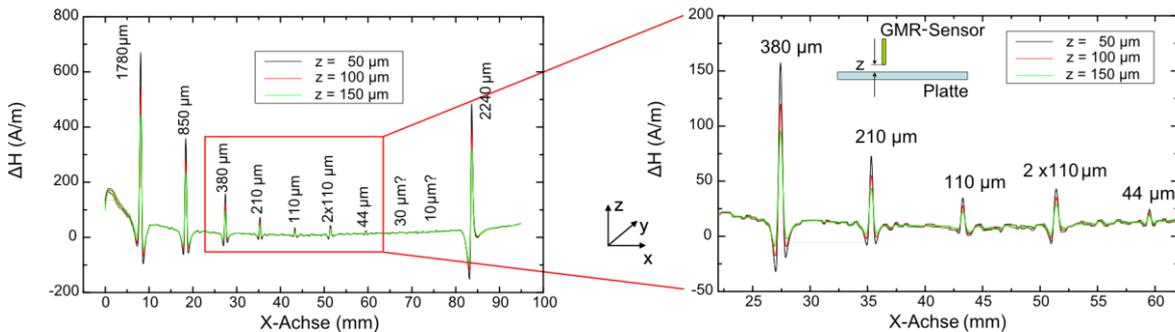


Abbildung 7: Messung des Gradientenfeldes entlang der Rissmitten bei unterschiedlichen Abständen zwischen Sensor und Testobjektoberfläche (schwarz 50 μm , rot 100 μm und grün 150 μm Abstand). Links ist der Scan über alle Risse dargestellt. Rechts ist ein Ausschnitt der kleineren noch von dem Materialrauschen unterscheidbaren Rissen gezeigt.

In Abb. 7 sind die gemessenen Gradientenfelder dargestellt. Der Scanverlauf wurde hier derart gewählt, dass der Sensor die Streufelder entlang der Mitte der Risse detektiert. Zusätzlich wurde der Abstand zwischen Sensorunterkante und Oberfläche des Testobjekts variiert, wodurch sich die Signalamplitude mit zunehmendem Abstand verringert. Die Messungen zeigen in Übereinstimmung mit der Theorie, dass bei einem 100 μm größeren Abstand sich die Signalamplitude um fast 40% verringert. Dies veranschaulicht, wie wichtig optimierte Sensoren sind, um auch kleinere Risse und somit kleine Signalamplituden zu detektieren. Auch konnte in Abb. 7 rechts gezeigt werden, dass der 44 μm tiefe Riss noch deutlich von dem Materialrauschen zu unterscheiden ist.

Um eine Rekonstruktion der Rissparameter durchzuführen, wurden Flächenscans am Testobjekt durchgeführt. Dadurch können die bildgebenden Eigenschaften der GMR-Sensoren ausgenutzt werden und man erhält hinreichend viele Daten, um eine Rekonstruktion durchführen zu können. Diese Scans sind beispielhaft in Abb. 8 für den 380 μm (a), den 210 μm (b) und den 44 μm (c) tiefen Riss dargestellt. Zusätzlich sind in den oberen Bildern die analytisch berechneten Signalamplituden gezeigt.

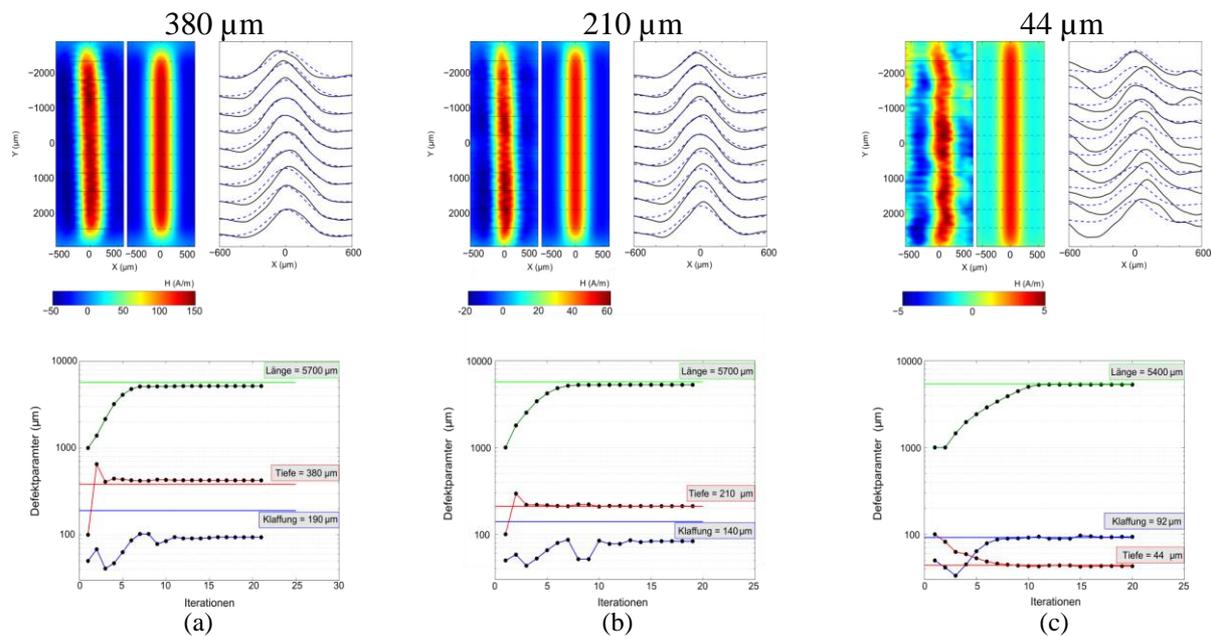


Abbildung 8: Betrachtet wurden drei Risse ((a) 380 μm , (b) 210 μm und (c) 44 μm tiefer Riss). Jeweils links oben sind die Messdaten des Flächenscans und daneben der rekonstruierte Flächenscan als Falschfarbendarstellung gezeigt. Einzelne Amplituden des Messsignals (durchgestrichene Linien) und der Rekonstruktion (gestrichelte Linien) sind daneben dargestellt. In der unteren Hälfte sind die Iterationsschritte mit den jeweiligen zu Grunde liegenden Rissparametern veranschaulicht. Hierbei wurden die tatsächlich gemessenen Rissparameter der einzelnen Risse als durchgestrichene Linie eingezeichnet.

Um nun die Fehlergeometrie zu bestimmen, wird wie in Kap. 3 vorgestellt, ein Startwert (Riss mit $l = 1000 \mu\text{m}$, $w = 50 \mu\text{m}$ und $t = 100 \mu\text{m}$) angenommen und die Kostenfunktion – der Vergleich zwischen Mess- und analytischen Daten – bei jedem Iterationsschritt über alle Messpunkte minimiert. In Abb. 8 unten ist zu erkennen, wie die berechneten Parameter für die Tiefe und die Länge schnell gegen die ermittelten Parameter konvergieren. Lediglich die Klaffung konvergiert nicht zufriedenstellend gegen den ermittelten Wert. Grund hierfür ist, dass sich der Streufluss nicht stark ändert und somit der Algorithmus nicht sensitiv genug auf die Klaffung reagiert. Beachtlich ist die Berechnung der Parameter des 44 μm tiefen Risses. Obwohl die Messdaten (Abb. 8 (c) oberes linkes Diagramm) stark verrauscht sind, ist es möglich, mit den einfachen analytischen Lösungen und der großen Anzahl an Messwerten die Rissgröße abzuschätzen.

4.1 3D-Magnetometermessungen

Die Messungen an dem Referenzbauteil wurden mit einem in Kap. 2 näher beschriebenen 3D-Magnetometer wiederholt. Der schon vorher beschriebene Vorteil des Sensors liegt darin, dass gleichzeitig in einer Ebene (alle sensitiven Elemente haben den gleichen Abstand zur Testobjektoberfläche) alle drei Raumrichtungen des Magnetfeldes gemessen werden kann. Daraus ergibt sich der Vorteil, die genaue Feldverteilung in 3D nachzubilden, was wiederum für eine spätere Betrachtung, wie eine Rekonstruktion von Fehlergeometrien, von Vorteil ist.

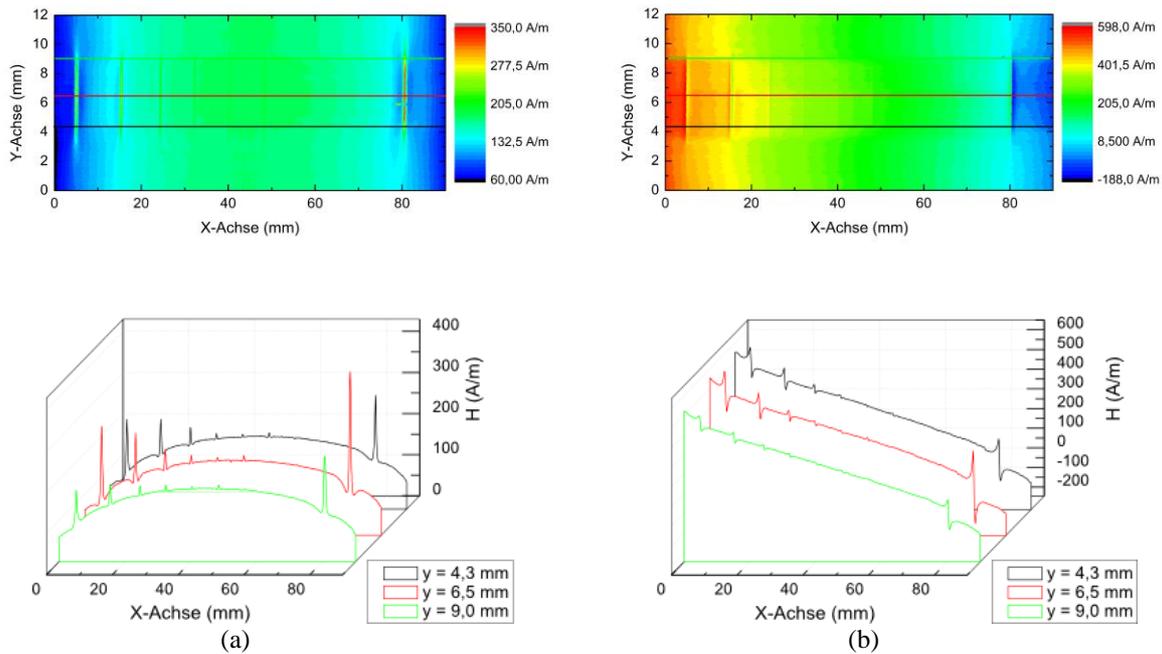


Abbildung 9: Im oberen Teil sind die Falschfarbendarstellungen für (a) die x-Komponente (tangential) und (b) die z-Komponente (normal). Die farbigen Linien stellen die in den unteren Diagrammen dargestellt linearen Verläufe dar.

In Abb. 9 (a) und (b) sind die Flächenscans dargestellt. Deutlich sind anhand der abrupten Farbänderung die tiefen Risse zu erkennen. Die Risse mit geringerer Tiefe gehen allerdings im Hintergrundsignal unter, bzw. die gewählte Falschfarbendarstellung vermag die Signalamplituden nicht mehr aufzulösen. In den unteren Diagrammen der Abb. 9 sind einzelne Linien aus den Flächenscans zum besseren Verständnis angeführt. Hier ist noch deutlicher der Signalverlauf des Hintergrundfeldes zu erkennen. Dieses Hintergrundfeld wird geometriebedingt durch die aufmagnetisierte Platte verursacht, welches man sich wie das Hintergrundfeld eines Permanentmagneten vorstellen kann. Diesem Hintergrundfeld überlagert haben sich die Streufelder der Risse ab. Auch hier ist zu erkennen, wie mit abnehmender Risstiefe die Signalamplitude abnimmt.

In Abb. 10 ist der Flächenscan der x-Komponente abgebildet. Zusätzlich wurde hier am Beispiel von drei Rissen (380 μm , 210 μm und 44 μm tief) die Skalen angepasst. Dadurch lässt sich erkennen, wie sich die Signalamplituden deutlich von dem Hintergrundfeld abheben. Lediglich bei dem 44 μm tiefen Riss ist dies nicht der Fall. Allerdings ist bei den Messungen zu berücksichtigen, dass das Signal nicht vorverstärkt wurde, wodurch eine Verbesserung des Signals zu erwarten ist. Die streifenartigen Muster vor allem im 44 μm Signal rühren von einer zu großen Hysterese des GMR-Sensors für diese Komponente selbst. Auch hier ist es möglich, eine weitere Verbesserung zu erreichen.

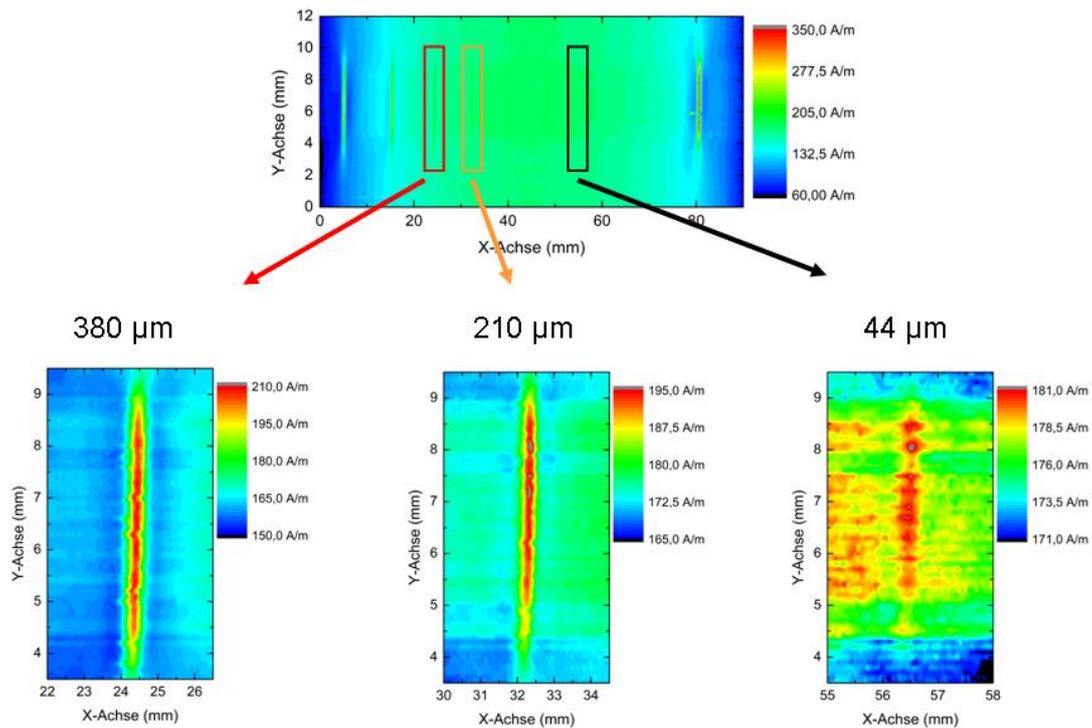


Abbildung 10: Falschenfarbendarstellung der x-Komponente sowie eine angepasste Darstellung für die Risse mit einer Tiefe von 380 μm , 210 μm und 44 μm .

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe von für die ZfP optimierte Sensoren war es möglich, Risse eines Referenzbauteils zu detektieren bzw. das an Rissen erzeugte Streufeld zu messen. Mit diesen Daten ließen sich erfolgreich die Rissparameter mittels analytischer Gleichungen rekonstruieren. Durch einen neuartigen 3D-GMR-Sensor wurden zudem ebenfalls präzise Messungen durchgeführt.

Eine 3D bildgebende Streufeldmessung mit GMR-Sensoren erlaubt es, neuartige Algorithmen zur Bildverarbeitung und Inversion anzuwenden. Dadurch lassen sich auch Defekte komplexer Geometrie identifizieren und analysieren.

Referenzen

- [1] V. Deutsch, W. Morgner, M. Vogt: *Magnetpulver-Rissprüfung*, VDI-Verlag (Düsseldorf), 1993
- [2] P. Grünberg *et al.*: *Layered Magnetic Structures: Evidence for Antiferromagnetic Coupling of Fe Layers across Cr Interlayers* Physical Review Letters **57** (1986) 2442
- [3] www.sensitec.com, Sensitec GmbH, Lahnau (D)
- [4] 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
- [5] C.H. Smith and R.W. Schneider: *VERY DENSE MAGNETIC SENSOR ARRAYS FOR PRECISION MEASUREMENT AND DETECTION*, Sensors EXPO Chicago, June 2003
- [6] N. Zatsepin and V. Shcherbinin, Defektoskopija **5** (1966) 50
- [6] V. Shcherbinin and A. Pashagin, Defektoskopija **8** (1972) 74