

Ortsauflösende Charakterisierung ferro- und ferrimagnetischer Schichten für magneto-resistive und magnetooptische Sensoren

Klaus SZIELASKO¹, Madalina RABUNG¹, Melanie KOPP¹, Ralf TSCHUNCKY¹,
Michael HANS¹, Fabian WEBER¹, Meisam SHEIKH AMIRI²,
Hendryk RICHERT³, Heidemarie SCHMIDT⁴, Martin KRELLER⁵, Carsten FISCHER⁶,
Bernd EIGENMANN⁷

¹Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

²Universität des Saarlandes, Saarbrücken | ³Matesy GmbH, Jena

⁴TU Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Chemnitz

⁵Dreebit GmbH, Dresden | ⁶Metrolux GmbH, Göttingen

⁷Röntgenlabor Eigenmann, Schnaittach-Hormersdorf

Kurzfassung. Bei der Herstellung von Schichtsystemen für magneto-resistive und magnetooptische Sensoren sind die Maßhaltigkeit und Homogenität der Schichtdicken sowie die laterale Eigenspannungsverteilung von ausschlaggebender Bedeutung für die messtechnischen Eigenschaften. Werkstoffoptimierung und Qualitätssicherung können von Prüfverfahren profitieren, die solche kritischen Parameter schnell und unkompliziert abbilden. Beispielsweise ist im Falle der ortsauflösenden Eigenspannungsanalyse die Röntgendiffraktometrie zwar als Referenzverfahren geeignet, aber mit sehr hohem Zeitaufwand verbunden.

Für die schnelle mikromagnetische Eigenspannungs- und Schichtdickencharakterisierung an ferromagnetischen Schichten wurde am IZFP die Barkhausenrausch- und Wirbelstrommikroskopie (BEMI) entwickelt und umfangreich erprobt. Bisher war die entsprechende Prüfgerätetechnik jedoch groß, schwer, teuer und anspruchsvoll in der Bedienung, weshalb die Anwendung bisher auf das Laborumfeld beschränkt blieb. In letzter Zeit wurde, basierend auf der Mikromagnetischen Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse (3MA) und unter Einsatz verbesserter Barkhausenrausch- und Wirbelstromsensoren sowie neuartigen mikromagnetischen Punktsonden mit isotroper Abbildungscharakteristik, ein kostengünstiges, robusteres auch im industriellen Umfeld einsetzbares BEMI-Prüfsystem aufgebaut und erprobt. Im vollständigen Beitrag wird dieses Prüfsystem vorgestellt, und es werden die Abbildungseigenschaften und Messeffekte diskutiert sowie das Potential des erweiterten Prüfverfahrens zur Charakterisierung unterschiedlicher Magnetfeld-Sensorschichten aufgezeigt.

1. Einleitung

Schichtsysteme mit definiertem magnetischem Verhalten werden zur Herstellung hochempfindlicher Magnetfeldsensoren und magnetischer Speichermedien benötigt. Neben den magnetischen Eigenschaften müssen Schichtdicke und Eigenspannungen in einem eng tole-

rierten Intervall liegen. Beispielsweise enthalten magneto-resistive Sensoren dünne Eisen- oder Permalloy-Schichten, deren Dicken- und Eigenspannungsverteilung auf dem Wafer homogen und definiert eingestellt werden müssen. Die Eigenspannung moduliert die magnetische Permeabilität und beeinflusst somit die Kennlinie der Sensoren in erheblichem Maße [1]. Darüber hinaus können zu hohe Eigenspannungen zur Delamination der Schichten führen. Die Schichtdicke ist für das Auftreten und die Größe der physikalischen Sensoreffekte entscheidend [2].

Magneto-optische Sensoren, die zur schnellen Abbildung der lateralen Magnetfeldverteilung besonders vorteilhaft sind und in der zerstörungsfreien Prüfung eine Alternative zu Sensorarrays darstellen, können auf Basis des Kerr- oder Faraday-Effekts realisiert werden. Beide Effekte betreffen die vom Magnetfeld abhängige Drehung der Polarisationsrichtung von Licht, wobei der Faraday-Effekt die Polarisationsdrehung beim Durchdringen optisch transparenter Medien und der Kerr-Effekt die Polarisationsdrehung bei Reflexion an ferromagnetischen Metalloberflächen beschreibt [3, 4]. Für die zerstörungsfreie Prüfung sind Faraday-Schichten als auf Prüfobjekte aufsetzbare Sensoren von besonderem Interesse. Aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Faraday-Drehung werden hierfür ferrimagnetische Granatschichten favorisiert [5]. Eigenspannungen können in solchen Granatschichten zu Rissen führen [6]. Neben der Steuerung der magnetischen Eigenschaften wird angestrebt, durch gezielte Beeinflussung der Eigenspannungen in Schichtsystemen, beispielsweise mittels Laserbestrahlung oder Ionenimplantation, eine Delamination herbeizuführen, um die Nutzschrift vom Substrat abzulösen.

1.2 Barkhausenrausch- und Wirbelstrommikroskopie (BEMI)

Im Rahmen der Werkstoffentwicklung und in der fertigungsbegleitenden Qualitätssicherung ist es von Vorteil, die erzielten Schichteigenschaften schnell und kostengünstig bewerten zu können. Die am Fraunhofer IZFP bereits 1994 entwickelte Barkhausenrausch- und Wirbelstrommikroskopie (BEMI) bietet sich hierfür an [7-9]. Die Oberfläche der zu untersuchenden Schicht wird hierbei unter Einsatz eines XYZ-Scanners mit einem miniaturisierten magnetinduktiven Sensor abgetastet. Im Rahmen eines noch laufenden Forschungsvorhabens wurde eine kompakte Variante des BEMI aufgebaut. Die Messung erfolgt hierbei unter Einsatz des 3MA-Verfahrens (3MA = Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse) und der entsprechenden 3MA-II-Gerätetechnik [10]. Ein kleiner Scanner mit integrierter Steuerung ermöglichte einen äußerst platzsparenden Aufbau (Abb. 1).

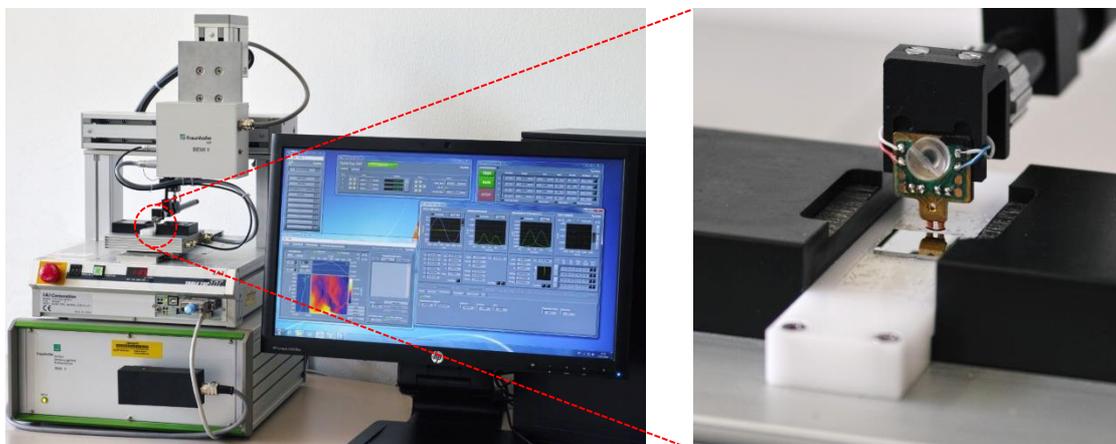


Abb. 1. links: Barkhausenrausch- und Wirbelstrommikroskop BEMI-II, rechts: Detail des Sensors auf einer Probe im Format 10x10 mm².

Die absolute Positioniergenauigkeit (Wiederkehrgenauigkeit) des Scanners beträgt $20\ \mu\text{m}$, und die kleinste Schrittweite liegt knapp unterhalb von $10\ \mu\text{m}$, was gut mit dem Auflösungsvermögen der eingesetzten Sensoren übereinstimmt (vgl. 1.3).

Das Prüfsystem ist kalibrierbar. Hierzu sind Proben des zu betrachtenden Schichtsystems mit über den relevanten Wertebereich definiert abgestuften Zielgrößen (Eigenspannungen bzw. Schichtdicken) herzustellen und zu untersuchen. Mittels Regressionsanalyse oder Mustererkennung wird der quantitative Zusammenhang zwischen den gemessenen magnetischen Eigenschaften und den für diese Proben bekannten Zielgrößenwerten bestimmt. Anschließend können Proben unbekannter Zustände des gleichen Schichtsystems hinsichtlich Eigenspannungs- und Schichtdickenverteilung (in MPa bzw. nm) bewertet und die Messergebnisse als Bilder mit Farbcodierung oder Grauwertskala dargestellt werden.

Die zugrundeliegenden Effekte beruhen auf Eigenspannungsempfindlichkeit des magnetischen Barkhausenrauschens, die in der zFP häufig genutzt wird [11], sowie auf der ebenfalls weitläufig bekannten Schichtdicken- und Abhebeempfindlichkeit der Wirbelstrom-Impedanzmesswerte, in der sich Leitfähigkeit und Permeabilität des Werkstoffs abbilden.

1.3 Sensoren und Abbildungscharakteristik

Die bisher am häufigsten im BEMI eingesetzte Sensorvariante besteht aus einem Spulenpaar auf einem geschlitzten Ferritkern. Der Sensor ähnelt dem Schreib-/Lesekopf eines älteren Video-Kassettenrecorders (VCR). Während der Messung wird er im Multiplexbetrieb als Aufnehmer für das magnetische Barkhausenrauschen bzw. als Wirbelstrom-Sonde genutzt. Inzwischen wurden darüber hinaus unterschiedliche modernere VCR-Kopfvarianten hinsichtlich ihrer Abbildungscharakteristik untersucht. Hierzu wurde ein quaderförmiges Ferritplättchen untersucht, in welches ein Kreuzraster von Stegen unterschiedlicher Breite von 5 bis $100\ \mu\text{m}$ eingebracht ist. Die Lücken zwischen den Ferrit-Stegen sind mit Glas verfüllt. Abb. 2 zeigt eine REM-Aufnahme der Kreuzraster-Probe sowie eine schematische Darstellung der Stegbreiten.

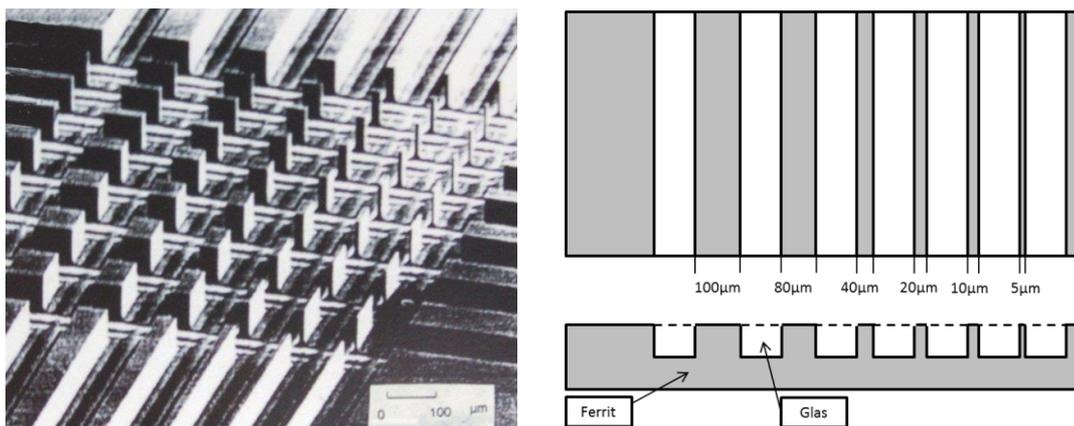


Abb. 2. REM-Aufnahme der Kreuzraster-Probe, Schema der Stegbreiten

Neben mikromagnetischen Sensoren auf Basis modifizierter VCR-Köpfe bietet das BEMI die Option, eine neue mikromagnetische Sensorart, sog. Punktsonden, einzusetzen [12]. Diese koppeln das Magnetfeld senkrecht über einen nadelförmigen Kern in die Probe ein und erzielen eine isotrope Abbildungscharakteristik. Bei sinusförmiger Speisung der Primärspule wird in die Sekundärspule ein Signal induziert, das bei Kontakt zu einem ferromagnetischen Werkstoff spitze Maxima aufweist, deren Höhe vorwiegend die oberflächen-nahe Permeabilität des Werkstoffs widerspiegelt. In einer FEM-Simulation wurde ermittelt,

dass die Eindringtiefe des Magnetfeldes ca. $20\ \mu\text{m}$ beträgt. Wie in [13] beschrieben, wurde eine Kenngröße V_{peak} definiert, welche die Höhe der Maxima wiedergibt. Als Flächenscan dargestellt, bildet V_{peak} die lokalen Permeabilitätsunterschiede ab.

Abb. 3 zeigt einen Vergleich der Abbildungscharakteristiken des ursprünglichen BEMI-Kopfes, eines moderneren VCR-Kopfes mit zwei Spulenpaaren (nur eine Seite wurde genutzt) sowie der Punktsonde. Die beiden erstgenannten Sensoren wurden für diese Untersuchung im Wirbelstrom-Modus betrieben.

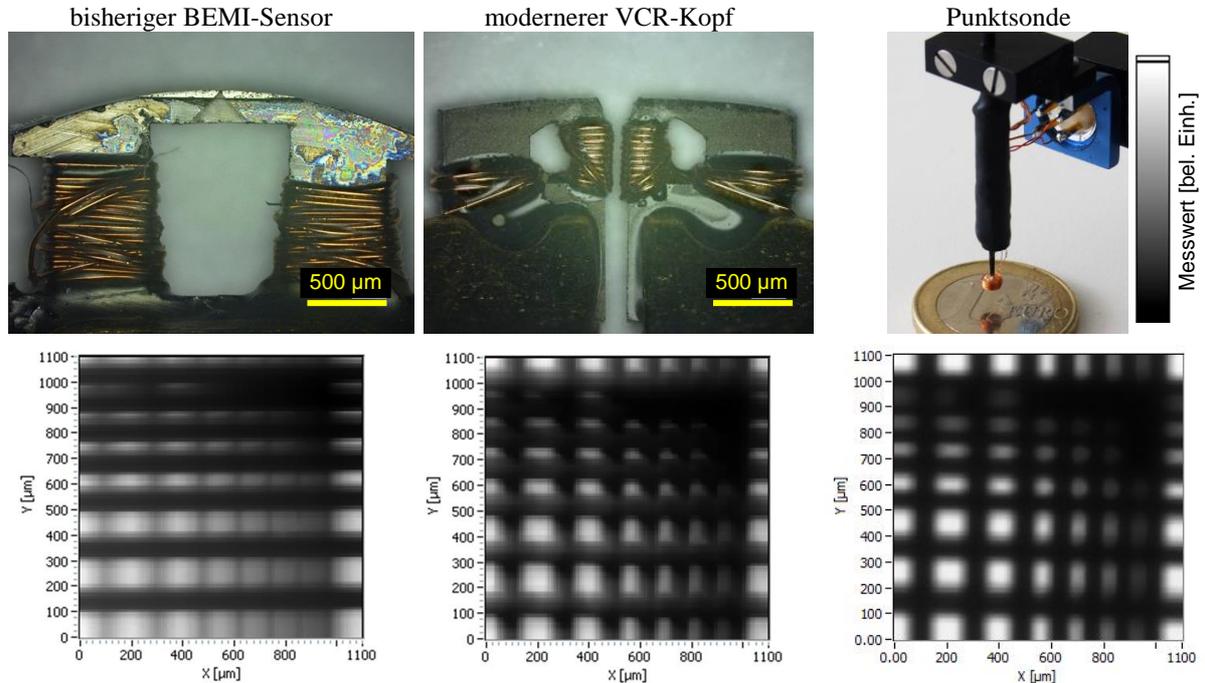


Abb. 3. Foto der Sensoren und Abbildung des Kreuzrasters in den magnetischen Kenngrößen (BEMI-/VCR-Kopf: Betrag der Wirbelstromimpedanz bei $f = 250\ \text{kHz}$; Punktsonde: Peakhöhe V_{peak} bei $f = 44\ \text{Hz}$)

Man erkennt im Falle beider VCR-ähnlichen Sensoren eine unterschiedlich starke, beim moderneren Kopf geringere Anisotropie, die von der Form des Kerns herrührt. Eine gewisse Empfindlichkeit der Wirbelstromsonden auch im Fernfeld ist bei beiden VCR-ähnlichen Köpfen in Form einer Schattenbildung erkennbar. Diese ist durch das Streufeld der Sensoren bedingt. Die Abbildungscharakteristik der Punktsonde ist hingegen isotrop und praktisch frei von Fernfeld-Effekten. Die Größe V_{peak} zeigt daher keine Abhängigkeit der Messwerte vom umgebenden Werkstoff, d.h. bereits auf den $100\ \mu\text{m}$ schmalen Glasstegen wird der gleiche Messwert erreicht wie weit außerhalb der Probe in Luft. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich an der Spitze der Sonde eine Flusskonzentration ausbildet, die zur Entstehung des Signalpeaks führt. Außer in unmittelbarer Nähe der Spitze ist keine signifikante Flussdichte vorhanden und somit kein Beitrag des Werkstoffs zum Messeffekt.

2. Durchgeführte Messungen und Ergebnisse

An einer Reihe dünner Schichten, die zur Herstellung magnetoresistiver und magnetooptischer Sensoren dienen sollen, wurden BEMI-Messungen zur Optimierung der Herstellungsparameter durchgeführt. Das Ziel bestand darin, die durch Ionenimplantation und Laserbestrahlung hervorgerufenen Variationen der Schichtdicke, die veränderten magnetischen Eigenschaften und die lokale Modifikation des Eigenspannungszustandes schnell abbilden zu können. Da die untersuchten Schichten meist nur eine Dicke in der Größenordnung von $10\ \text{nm}$ besaßen, stellte die Messung von Barkhausenrausch- und Wirbelstromef-

fekten mit hoher Ortsauflösung eine besondere Herausforderung dar, denn das analysierte Werkstoffvolumen liegt bei dieser Auflösung in der Größenordnung von $1 \mu\text{m}^3$. Mit dem neu aufgebauten BEMI ist es nun erstmals gelungen, an derart dünnen Schichten mikromagnetische Messungen durchzuführen.

2.1 Nachweis der Schichtveränderung durch Ionenimplantation

Schichtproben des Systems Ta(3nm)/NiFe(5-20nm)/Ru(3nm) wurden bei der Dreebit GmbH durch Beschuss mit $\text{Ar}^{1/2/3+}$ bzw. $\text{B}^{1/2/3+}$ Ionen mittels einer Mikrostrahlanlage bereichsweise modifiziert. Dabei werden sowohl Energie als auch Material eingebracht. Das Ziel bestand hierbei zunächst in der Änderung der magnetisch leichten Richtung. Die erzielten Änderungen der Schichtwerkstoffe und magnetischen Eigenschaften wurden im Wirbelstrom-Modus des BEMI abgebildet. Abb. 4 zeigt, dass die unbehandelten NiFe-Schichten bereits ab ca. 5 nm von Luft unterschieden werden können und auch die Ionenimplantation bereits bei der 5 nm dünnen Schicht erkennbare Effekte hervorruft. Die behandelten Zonen lassen sich in allen Fällen deutlich erkennen. In allen betrachteten Kenngrößen (hier ist stellvertretend nur der Realteil der Wirbelstromimpedanz dargestellt) wurden die Messwerte im ionenimplantierten Bereich ähnlicher zum Messwert in Luft, d.h. es wurde eine signifikante Modifikation der elektromagnetischen Eigenschaften erzielt. Die Ionenimplantation stellt eine Möglichkeit dar, maßgeschneiderte magnetische Eigenschaften zu erzielen, um somit beispielsweise bei der Herstellung von GMR- (Giant MagnetoResistance-) Sensoren die Magnetfeldempfindlichkeit steuern zu können.

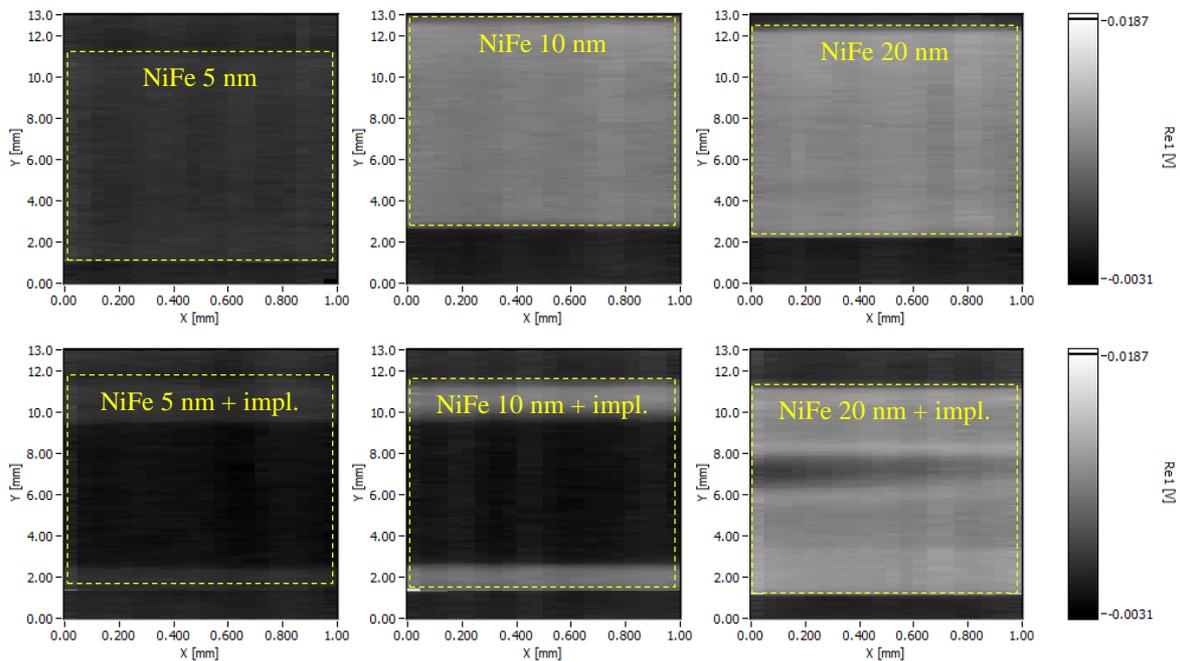


Abb. 4. Wirbelstrommessungen (Realteil Re_1 der Impedanz bei $f = 250 \text{ kHz}$) an NiFe-Schichten in drei unterschiedlichen Dicken (v.l.n.r. 5, 10 und 20 nm), in der oberen Reihe ohne Ionenimplantation, unten mit bereichsweiser Ionenimplantation. Der gestrichelte Rahmen kennzeichnet die Lage der Probe. Außerhalb befand sich der Sensor in Luft.

2.2 Eigenspannungsmodifikation durch Laserbestrahlung

Verschiedene Schichtsysteme vom Aufbau Ta(3nm)/[Co90Fe10](20nm)/Ru(3nm) sowie Ta(3nm)/[Co40Fe40B20](20nm)/Ru(3nm) wurden mittels Laserbestrahlung thermisch nachbehandelt, um den Eigenspannungszustand lokal zu modifizieren. Solche dünnen Schichten sind für die Herstellung magnetoresistiver Sensoren, insbesondere TMR- (Tunneling MagnetoResistance-) Sensoren, von Interesse [14].

Mit der Eigenspannungsmodifikation wurden verschiedene Ziele verfolgt: Einerseits kann der Abbau von Eigenspannungen erwünscht sein, um die Neigung zur Delamination in weiteren Prozessschritten zu verhindern. Darüber hinaus ist durch lokale Eigenspannungsmodifikation eine Steuerung der magnetischen Eigenschaften und damit der messtechnischen Parameter der TMR-Sensoren realisierbar. Als dritte Möglichkeit bietet die Laserbehandlung das Potential, die Eigenspannungsverteilung so zu gestalten, dass eine Delamination der Schicht gezielt herbeigeführt wird und die Schicht sich in der Form von Nanoröhrchen ablöst.

Die Proben wurden im BEMI untersucht. Abb. 5 zeigt Flächenscans der Barkhausenrauschamplitude M_{MAX} jeweils im unbehandelten und im laserbehandelten Zustand. Im Falle der CoFe-Schichten (obere Reihe) stieg M_{MAX} im laserbestrahlten Bereich. Im Falle der CoFeB-Schichten (untere Reihe) fiel M_{MAX} . Es ist aus der Literatur bekannt, dass die Laserbestrahlung an dünnen CoFe-Schichten die Koerzitivfeldstärke senkt [15]. Damit geht meist ein Anstieg der Barkhausenrauschamplitude einher, wie hier beobachtet. Dies spricht für einen Abbau von Druckeigenspannungen bzw. Aufbau von Zugeigenspannungen. Im Falle der CoFeB-Schichten ist davon auszugehen, dass neben der Modifikation des Eigenspannungszustandes auch eine Umwandlung in die teilkristalline Struktur erfolgte, was sich dominant im Barkhausenrauschen niederschlagen kann, hier durch eine Verringerung von M_{MAX} . BEMI ist insbesondere zur Eigenspannungsanalyse an amorphen Schichten, wie hier z.B. CoFeB, von Interesse, da hier keine röntgenographischen Eigenspannungsmessungen möglich sind.

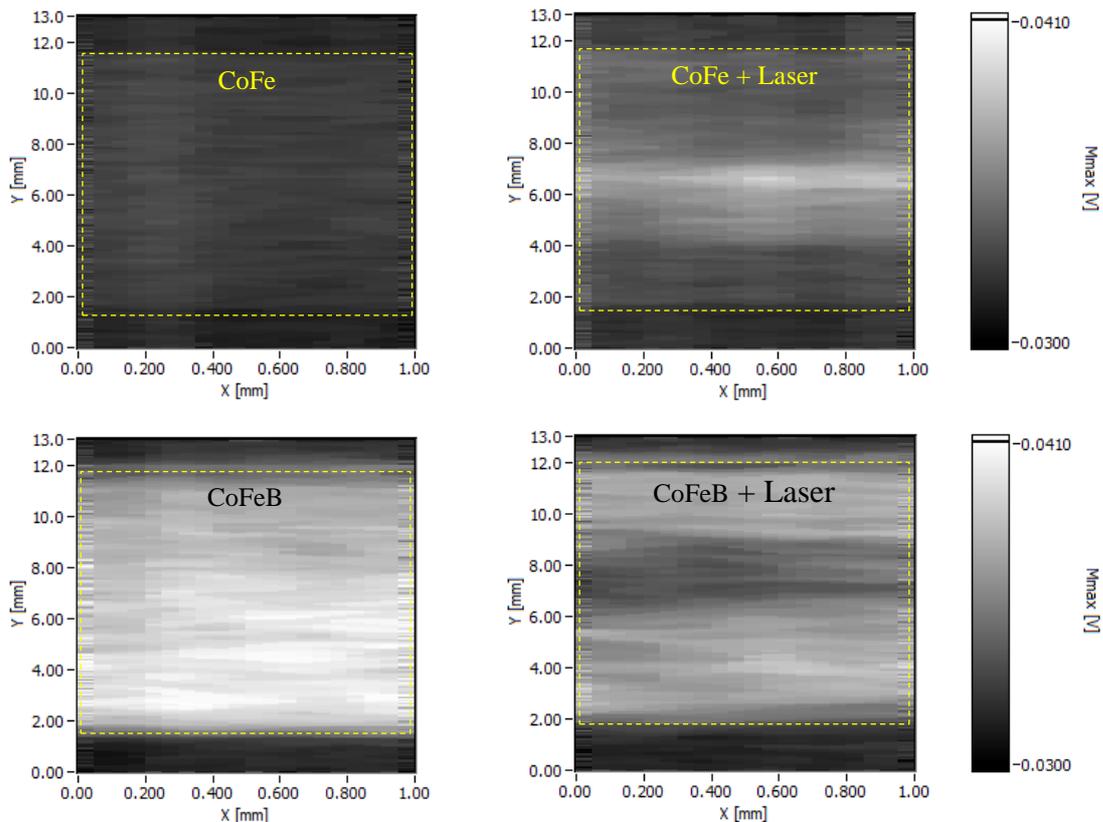


Abb. 5. Flächenscans der Barkhausenrauschamplitude M_{MAX} , oben an kristallinen CoFe-Schichten, unten an amorphen CoFeB-Schichten mit einer Dicke von jeweils 20 nm (links jeweils nicht bestrahlt, rechts jeweils im mittleren Bereich laserbestrahlt). Der gestrichelte Rahmen kennzeichnet die Lage der Probe. Außerhalb befand sich der Sensor in Luft.

2.3 Ferrimagnetische Granatschichten

Zur Herstellung magnetooptischer (MO) Sensoren auf Basis des Faraday-Effektes werden häufig Granate wie z.B. Bismut-Eisen-Granat (BIG) oder Yttrium-Eisen-Granat (YIG) eingesetzt. Es handelt sich dabei um oxidische, optisch transparente, ferrimagnetische Verbindungen mit einer besonderen Kristallstruktur. BIG- und YIG-Schichten weisen einen großen magnetooptischen Faraday-Effekt auf [3-5]. Der Faraday-Drehwinkel ist bei konstanter Magnetfeldstärke und ansonsten gleichen Materialeigenschaften proportional zur Dicke der Granatschicht. Häufig liegt die Schichtdicke im Bereich weniger μm .

Mit zunehmender Dicke steigt die Wahrscheinlichkeit einer Rissbildung infolge von Eigenspannungen. Die Eigenspannungsbestimmung ist somit auch bei der Entwicklung magnetooptischer Sensoren von Interesse. Es wurde untersucht, ob MO-Sensoren mittels BEMI charakterisiert werden können. Dabei bestand eine Schwierigkeit im Schichtaufbau, aufgrund dessen die MO-Schicht weder von der Ober- noch von der Unterseite direkt zugänglich war. Die Scans erfolgten von der Seite der Schutzschicht durch die $1\ \mu\text{m}$ dünne Spiegelschicht hindurch. Abb. 6 zeigt die drei untersuchten Proben und mehrere Kenngrößen aus der Barkhausenrausch- und Wirbelstromanalyse als Flächenscans. Die MO-Sensorschichten unterschieden sich in der Richtung der Magnetfeldempfindlichkeit und der Domänenstruktur. Nur einer der drei MO-Sensoren besaß eine Empfindlichkeitsrichtung in der X/Y-Ebene, und auch nur dieser zeigte Barkhausenrauschen, wobei tatsächlich Inhomogenitäten erkennbar wurden. Im Wirbelstrom-Scan hingegen waren alle Proben erkennbar. Die Ergebnisse belegen, dass eine ortsauflösende Barkhausenrauschanalyse an MO-Granatschichten trotz Überdeckung möglich ist, sofern Empfindlichkeits- und Magnetisierungsrichtung übereinstimmen. In weiteren Schritten sollen Eigenspannungen an zusätzlichen Proben bestimmt und mit Barkhausenrausch-Messwerten korreliert werden.

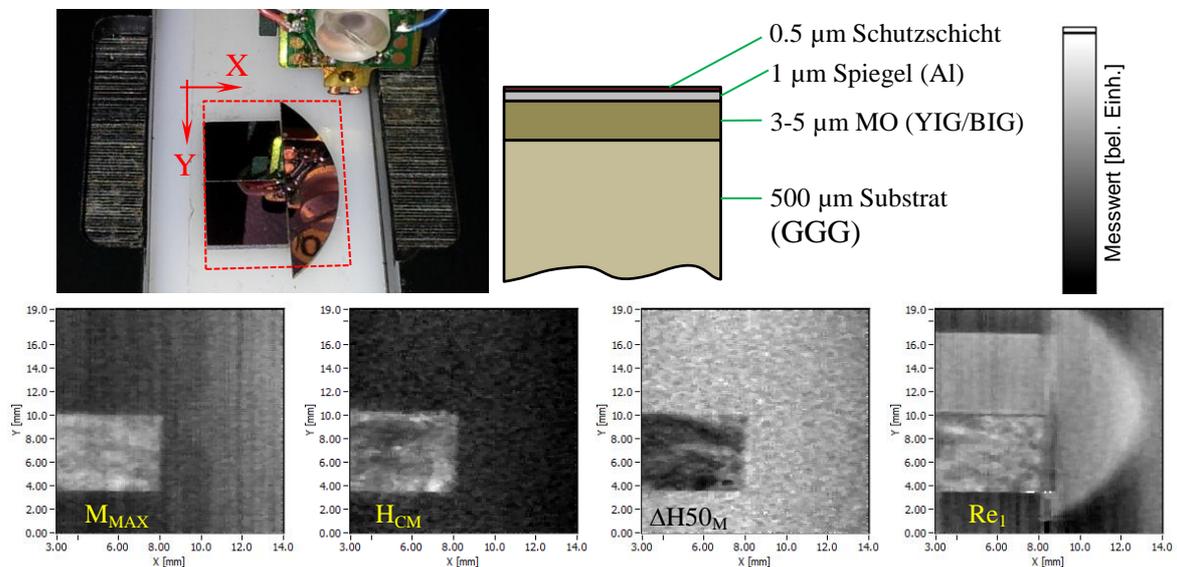


Abb. 6. BEMI-Flächenscans an MO-Granatschichten verschiedener Typen (oben: Foto und Scanbereich, Schichtaufbau; unten Flächenscans: Barkhausenrauschamplitude M_{MAX} , Barkhausenrausch-Koerzitivfeldstärke H_{CM} , Halbwertsbreite der Barkhausenrausch-Profilkurve ΔH_{50_M} und Realteil Re_1 der Wirbelstromimpedanz bei $f=250\ \text{kHz}$)

3 Zusammenfassung

Die Barkhausenrausch- und Wirbelstrommikroskopie ist ein leistungsstarkes Werkzeug zur Entwicklung und Qualitätssicherung von Materialien und Schichtsystemen, die magnetische und/oder elektrisch leitfähige Komponenten beinhalten. Durch die Möglichkeit, Ei-

genspannungs- und Schichtdickenverteilungen sowie magnetische Werkstoffeigenschaften schnell und mit einer Ortsauflösung von ca. 10-20 μm abbilden zu können, liefert sie wichtige Informationen zur Optimierung der Prozessparameter. Es wurde aufgezeigt, dass das Verfahren beispielsweise die Auswirkung von Ionenimplantation bzw. Laserbestrahlung auf NiFe- bzw. CoFeB-Schichten mit Dicken im Bereich von 5 bis 20 nm nachweisen kann und es somit erlaubt, den Erfolg einer Mikrostrukturierung und Eigenspannungsmodifikation der Schichten zu bewerten. Neben diesen sehr dünnen ferromagnetischen Schichten wurden ferrimagnetische Granate untersucht, die als Faraday-Rotatoren in magnetooptischen (MO) Sensoren verarbeitet werden. An einer dieser Schichten wurden trotz weiterer, die MO-Schicht überdeckender Schichten, Barkhausenrauschsignale von der MO-Schicht erhalten. In weiteren Schritten ist geplant, die Barkhausenrauschkennwerte mit röntgenographischen Eigenspannungswerten zu korrelieren und das Prüfsystem hierdurch zu kalibrieren. Darüber hinaus soll die Punktsonde für die lokale Eigenspannungsmessung zum Einsatz gelangen.

Danksagung

Das zugrundeliegende Forschungsvorhaben *ValiFerro* wird gefördert im Rahmen des ZIM-Programms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (FKZ. VP2455305ZG2, Projektträger AiF). Die Autoren danken dem BMWi für die finanzielle Unterstützung des Projektes.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Referenzen

- [1] Martin, N; McCord, J.; Gerber, A.; Strache, T.; Gemming, T.; Mönch, I.; Farag, N; Schäfer, R.; Fassbender, J.; Quandt, E.; Schultz, L.: „Local stress engineering of magnetic anisotropy in soft magnetic thin films“. *Appl. Phys. Lett.* 94, 062506 (2009).
- [2] Wassermann, E.; Hillebrands, B.: „Rieseneffekt in dünnen Schichten: Physiknobelpreis für Peter Grünberg und Albert Fert“. In: *Physik Journal*. 6, Nr. 12, Wiley-VCH, Weinheim Dezember 2007, S. 23–25.
- [3] Zvezdin, A.K. und V.A. Kotov: „Modern Magneto-optics and Magneto-optic Materials“. Institute of Physics Publishing, Bristol, 1997.
- [4] Heinrich, A.: „Magneto-optische Materialien und magneto-optische Untersuchungen an Supraleitern“. Habilitationsschrift, Universität Augsburg, 2006.
- [5] Görnert, P., Lorenz A., Lindner M., Richert H.: „Magneto-Optic Garnet Sensor Films: Preparation, Characterisation, Application“. In: Capper, P. und Rudolph, P. (Hrsg.): *Crystal Growth Technology*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Sept. 2010.
- [6] Wehlus, T.: „Anorganisch-organische Hybridsysteme als Funktionsstrukturen für die integrierte Optoelektronik“. Dissertation, Universität Augsburg, 2011.
- [7] Altpeter, I.; Hoffmann, J.; Kopp, M.; Grimm, H.; Nichtl-Pecher, W.: „Charakterisierung dünner Ferromagneten mit Hilfe der Barkhausenrausch-Mikroskopie“, *Prakt. Metallogr.* 37(5) (2000), 261-270.
- [8] Szielasko, K.; Kopp, M.; Tschuncky, R.; Lugin, S.; Altpeter, I.: „Barkhausenrausch- und Wirbelstrommikroskopie zur orts aufgelösten Charakterisierung von dünnen Schichten“. *DGZfP-Jahrestagung 2004*, *Berichtsband der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP) V13*, 2004.
- [9] Szielasko, K.; Lugin, S.; Kopp, M.; Altpeter, I.: „Barkhausen noise and eddy current microscopy - a new scanning probe technique for microscale characterization of materials“. In: Meyendorf, N. (Hrsg.): *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers SPIE: Testing, reliability, and application of micro- and nano-material systems II*, Bellingham/Washington. *SPIE Proceedings Series 5392* (2004) 105-113.
- [10] Dobmann, G; Altpeter, I.; Wolter, B.; Kern, R.: „Industrial Applications of 3MA – Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis“. in: Tamburino, A.; Melikhov, Y.; Chen, Z.; Udpa, L. (eds.): *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XI): ENDE 2007*. Amsterdam, Washington, Tokyo: IOS Press (2008) 18-25.
- [11] Karjalainen, L.P.; Moilanen, M.; Rautioaho M., „Influence of tensile and cyclic loading upon Barkhausen noise in a mild steel“, *Materials Evaluation*, 37 (1979) 45-51.

- [12] Sheikh Amiri, M.; Szielasko, K.; Altpeter, I.; Boller, C.; Fischer, D. und Hahn, J.: „Point Probes: a new generation of magnetic sensors for the measurement of local magnetic fields“. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 31, 012021 (2012).
- [13] Szielasko, K.; Sheikh Amiri, M.; Altpeter, I.; Boller, C.; Fischer, D.; Hahn, J.: „Mikromagnetische Härtebeurteilung mit Punktsonden für den industriellen Einsatz bei kleinen Stückzahlen“. DGZfP-Jahrestagung 2011, Berichtsband der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP), 2011.
- [14] Djayaprawira, D.D.; Tsunekawa, K.; Nagai, M.; Maehara, H.; Yamagata, S.; Watanabe, N.; Yuasa, S.; Suzuki, Y. and Ando, K.: „230% room-temperature magnetoresistance in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions“. Appl. Phys. Lett. 86, 092505 (2005).
- [15] Pookat, G; Thomas, H.; Thomas, S.; Al-Harhi, S.H.; Raghavan, L.; Al-Omari, I.A.; Sakthikumar, D.; Ramanujan, R.V. und Anantharaman, M.R.: „Evolution of structural and magnetic properties of Co–Fe based metallic glass thin films with thermal annealing“. Elsevier: Surface & Coatings Technology 236 (2013) 246-251.