

Hoch ortsauflösende, bildgebende mikromagnetische Materialcharakterisierung mit magnetooptischer Sensorik

Lukas LAUCK¹, Cyril ZIMMER¹, Klaus SZIELASKO¹

¹ Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

Kontakt E-Mail: lukas.lauck@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung. Mikromagnetische Prüfverfahren stellen ihre Leistungsfähigkeit bereits in industriellen Wertschöpfungsketten ferromagnetischer Erzeugnisse in größerem Umfang unter Beweis. Die Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz kann durch die Integration mikromagnetischer Prüftechniken in Produktionsprozesse erheblich gesteigert werden. Einige Prozesse, wie z.B. das Laserhärten, erzielen eine lokal definierte Verbesserung der Materialeigenschaften, ebenso wie einige Beanspruchungsszenarien eine lokale Schädigung erzielen. Die entsprechende Qualitätssicherung erfordert somit eine ortsauflösende zerstörungsfreie Prüfung. Mikromagnetische Prüftechniken wie 3MA (Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse) erzielen z.B. in Form der BEMI-Technik (Barkhausen Noise and Eddy Current Microscope) die benötigte Ortsauflösung in der Größenordnung von wenigen 10 µm. Hierfür ist allerdings eine äußerst zeitaufwendige Manipulation der meist einkanalen Sensorik über Werkstoffoberflächen notwendig. Die Dauer eines Scans von 100 mm² liegt dabei durchaus in der Größenordnung von mehr als 50 Stunden.

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse eines vom BMBF geförderten Forschungsvorhabens vorgestellt, welches darauf abzielte, mithilfe eines magnetooptischen (MO) Sensors eine sowohl schnelle als auch hoch ortsauflösende Technik zur mikromagnetischen Materialcharakterisierung zu entwickeln. Der MO-Sensor arbeitet nach dem Prinzip des Faraday-Effekts und bildet die auf seiner Wandlerfläche von maximal 300 mm² wirkende Feldstärkeverteilung quasi instantan ab. Diese Verteilung wird von einer Digitalkamera mit einer Ortsauflösung von bis zu 20 µm erfasst, wobei quasi Echtzeit-Performance erzielt wird. Zur mikromagnetischen Materialcharakterisierung wurde eine messtechnische Methodik erarbeitet, welche entlang der magnetischen Hysterese ferromagnetischer Proben eine zeitlich definierte Bildfolge (Bildsequenz/Video) der Feldstärkeverteilung entsprechender Probenoberflächen aufzeichnet. Anhand dieser MO-Daten konnten mikromagnetische Merkmale abgeleitet werden, welche die laterale Verteilung von Werkstoffzuständen und -eigenschaften wie Spannungs- und Härteunterschieden mit hoher Ortsauflösung und innerhalb kürzester Zeit abbilden.

1. Einleitung

Die Sicherstellung von Qualität bedeutet Anforderungen an qualitätsrelevante Merkmale mit dem tatsächlichen Zustand dieser Merkmale zu vergleichen. Insbesondere bei Stahlbauteilen bestehen, aufgrund derer teilweise sicherheitsrelevanten Einsatzgebiete wie zum Beispiel in der Bau- und Automobilbranche, hohe Anforderungen an den Vergleich von notwendigem und tatsächlichem Zustand der Qualitätsmerkmale. Auch wenn sich zerstörende Prüfungen generell zur Qualitätssicherung eignen, so bringen diese gleich mehrere Nachteile mit sich. Einerseits entsteht durch das zerstörende Prüfen ein hoher wirtschaftlicher Aufwand; andererseits wird die Qualität dabei lediglich stichprobenartig an vereinzelten Stellen diskreter Bauteile überprüft. Eine zerstörungsfreie Sicherstellung der Qualität steht daher nicht nur im Sinne der Wirtschaftlichkeit und dem effizienten Nutzen begrenzter Ressourcen, sondern ermöglicht weiterhin die Prüfung der Gesamtheit von Stahlerzeugnissen, bevor diese schließlich den Weg zu deren sicherheitsrelevanten Einsatzgebieten finden.

In der Metallurgie werden die Materialeigenschaften von Stahl wie beispielsweise seine Härte und Zugfestigkeit durch die mikroskopische Betrachtung seines Gefüges erklärt. Ein metallisches Gefüge, wie es typischerweise in Stählen zu finden ist, besteht dabei aus einer Verteilung von Kristallen, welche auch als Körner bezeichnet werden, und sogenannten Gitterstörungen, welche eine Inhomogenität der Kristallverteilung in dem Gefüge darstellen. Der Aufbau und die Zusammensetzung eines ferromagnetischen Gefüges, insbesondere von dessen Gitterstörungen wie Versetzungen, Ausscheidungen und Korngrenzen, determinieren dabei nicht nur die mechanisch-technologischen Eigenschaften wie Härte und Zugfestigkeit, sondern beeinflussen auch maßgeblich dessen magnetische Eigenschaften [1].

Diese Analogie führt dazu, dass das Magnetisierungsverhalten ferromagnetischer Stähle und deren mechanische Eigenschaften und Spannungszustände durch kausale Wechselwirkungsmechanismen korreliert sind. Das am Fraunhofer IZFP entwickelte 3MA-Verfahren (3MA = Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungs-Analysen) macht sich diese Zusammenhänge zunutze, indem mehrere voneinander unabhängige mikromagnetische Prüftechniken in einer Sensortechnologie kombiniert und an ferromagnetischen Materialoberflächen angewendet werden. Dabei werden während der zyklischen Ummagnetisierung des Untersuchungsobjekts mikromagnetische Kenngrößen, die u.a. auf das magnetische Hystereseverhalten zurückgehen, abgeleitet. Diese mikromagnetischen Kenngrößen weisen dabei unterschiedliche Korrelationen zu mechanischen Materialeigenschaften und -zuständen auf. Die multivariante Analyse der Gesamtheit der mikromagnetischen Kenngrößen und das Anwenden von Algorithmen des maschinellen Lernens gestatten dabei zuverlässige und quantitative Aussagen über mechanisch-technologische Eigenschaften wie z.B. Härte und Härtetiefe, Festigkeit und Eigenspannungen [2, 3]. Die Leistungsfähigkeit der 3MA-Technologie wird dabei bereits industriell in größerem Umfang unter Beweis gestellt [4, 5].

1.1 Ortsauflösende mikromagnetische Materialcharakterisierung

Im Sinne der Qualitätssicherung existieren zahlreiche Anwendungsszenarien, welche die Beobachtung der lateralen Verteilung von Werkstoffeigenschaften verlangen, da entweder deren Homogenität ein sicherheitskritisches Qualitätsmerkmal darstellt oder betriebsbedingt partielle Ermüdungserscheinungen von Stahlbauteilen untersucht, bzw. auffindig gemacht werden müssen. Um mithilfe mikromagnetischer Prüftechniken eine Ortsauflösung zu erzielen, müssen Bauteiloberflächen durch die Manipulation entsprechender Sensoren punktweise (gerastert) vermessen werden. Das 3MA-X8-Verfahren wurde beispielsweise durch eine Qualifizierungsstudie in Kooperation mit der Firma ROSEN Technology and Research Center GmbH hard- und softwareseitig dahingehend weiterentwickelt, dass lokale Aufhärtungen (sog. Hardspots) in Grobblechen als Ausgangsmaterial für Pipelines selbst unter industriellen Störeinflüssen zuverlässig detektiert werden können. Um eine Ortsauflösung zu erreichen, wurde die Technologie in Form eines zeilenförmigen Sensorarrays von insgesamt acht 3MA-X8 Prüfköpfen inkl. entsprechender Auswerteelektronik in einen Handwagen implementiert und über zu prüfende Grobbleche manipuliert (siehe Abbildung 1). Dabei können in den Grobblechen lokale Aufhärtungen von 30 HV10 ab einem Durchmesser von 10 mm, welche im Betrieb einer Pipeline unter Sauer-gaseinsatz zu einem frühzeitigen Materialversagen führen können, in einem digitalen „Prüfteppich“ mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s in Echtzeit detektiert und visualisiert werden [6].



Abbildung 1: 3MA-X8 Prüfwagen [6]

Das ortsauflösende Vermessen deutlich feinerer Strukturen von Materialeigenschaften ist mithilfe dieser Variante des 3MA-X8-Verfahrens aufgrund von magnetischem Übersprechen innerhalb des Sensorarrays und der dadurch limitierten Herunterskalierung der Prüfköpfe technisch kaum realisierbar. Zum Stand der Technik hochortsaufgelöster Materialcharakterisierung zählt deshalb das Barkhausenrausch- und Wirbelstrommikroskop BEMI (siehe Abbildung 2), welches mithilfe eines miniaturisierten induktiven Sensors mikromagnetische Prüftechniken des 3MA-Verfahrens umsetzt. Der induktive Sensor besteht aus einem Ferrit-Kern, welcher einen Luftspalt von ca. 300 nm aufweist und somit mikromagnetische Kenngrößen eines ebenso mikroskopischen Probevolumens mit einer Materialoberfläche von $10 \mu\text{m}^2$ erfasst. In Kombination mit einem hochpräzisen Manipulatorsystem kann der Sensor mit einer absoluten Positionierungsgenauigkeit von $20 \mu\text{m}$ in einem Raum von maximal $25 \times 25 \times 100 \text{ mm}^3$ manipuliert werden [7].

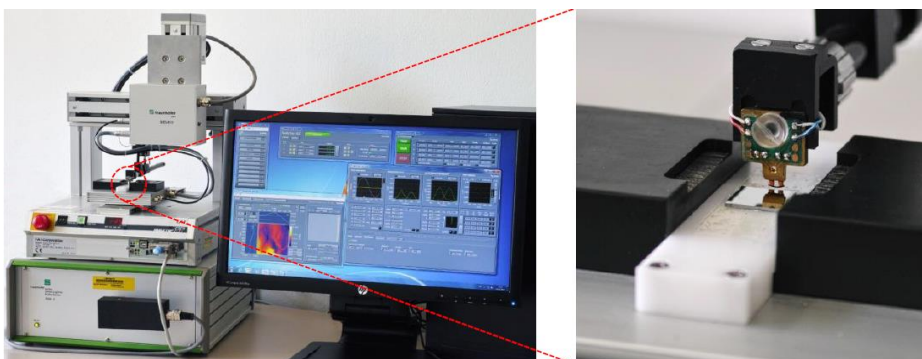


Abbildung 2: Barkhausenrausch- und Wirbelstrommikroskop BEMI [8]

Mithilfe des BEMI wurden unter anderem dünne Schichtsysteme aus der Entwicklung neuer Oberflächenwerkstoffe und Beschichtungsverfahren erfolgreich auf Eigenspannungsverteilungen, Schichtdicke und Homogenität ihrer Mikrostruktur untersucht [7]. Trotz seiner Leistungsmerkmale benötigt das BEMI für das mikromagnetische Vermessen einer Sensorposition, die einem Pixel des Ergebnisbildes entspricht, ca. eine Sekunde, wodurch die Prüfdauer typischer Scanformate bei hoher Ortsauflösung durch die zeitaufwendige Manipulation des einkanaligen Sensors und folglich hoher Anzahl an Stützstellen durchaus im Bereich mehrerer Stunden liegt. Aufgrund der Empfindlichkeit des induktiven Sensors in Kombination mit der geringen Prüfgeschwindigkeit stellt sich die Anwendung des BEMI zur industriellen Qualitätssicherung größerer Serien von Stahlbauteilen als schwierig heraus und begrenzt dessen Einsatz auf Anwendungen und Untersuchungen der Materialentwicklung- und Prüfung in dem Umfeld von Labortätigkeiten.

In diesem Beitrag sollen daher die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten wissenschaftlichen Vorprojektes „BiWa-MOS“ (WiVoPro, FKZ: 13N15251) vorgestellt werden. Der Gegenstand des Forschungsvorhabens lag in der Erprobung eines magnetooptischen Bildwandlers auf Basis des Faraday-Effekts als Sensortechnologie zur bildgebenden mikromagnetischen Materialcharakterisierung. Hierbei wurde das Ziel verfolgt, die Nachteile der unter dem Stand der Technik angesiedelten ortsauflösenden mikromagnetischen Prüftechniken zu überwinden und eine sowohl schnelle als auch hoch ortsauflösende Visualisierung der Eigenschaftsverteilungen ferromagnetischer Stahlbauteile zu ermöglichen.

2. Magnetooptik und messtechnische Methodik

2.1 Magnetooptischer Faraday-Effekt

Der magnetooptische Faraday-Effekt beschreibt die Drehung der Polarisations Ebene von linear polarisiertem Licht innerhalb eines optisch transparenten Mediums, das von einem magnetischen Feld parallel zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes durchsetzt ist [9]. Eine Anordnung zweier linearer Polarisationsfilter als Polarisator und Analysator kann dazu verwendet werden die Auswirkungen des Faraday-Effekts messtechnisch zu erfassen (siehe Abbildung 3). Hierbei sorgt der Polarisator für die lineare Polarisation eines Lichtes, welches in ein optisch transparentes Medium der Verdet'schen Konstante V transmittiert und innerhalb dieses Mediums den Weg d zurücklegt. Nach dem Faraday-Effekt ist die Polarisations Ebene des transmittierten Lichtstrahls bei Austritt aus dem Medium proportional zu jener magnetischen Feldstärke H um einen Winkel α gedreht, welche parallel zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes wirkt. Der Analysator dämpft hierbei die Intensität des Lichtes gegenüber seiner ursprünglichen Intensität proportional zum Drehwinkel α und somit proportional zur Feldstärke H . Die von der Feldstärke abhängige Dämpfung des Lichtes kann nach dem Analysator beispielsweise mit einer Photodiode oder einem digitalen Bildsensor messtechnisch erfasst werden.

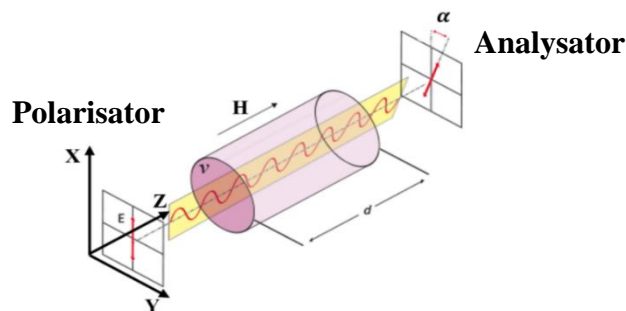


Abbildung 3: Schema zur messtechnischen Erfassung des Faraday-Effekts [10]

2.2 Magnetooptische Sensoren

Es existieren kommerziell verfügbare Sensoren auf Basis des Faraday-Effektes, welche das qualitative und quantitative Vermessen magnetischer Felder ermöglichen. Für die Untersuchungen im Projekt BiWa-MOS wurde dabei ein MO-Sensor („CMOS-magview“, Matesy GmbH, Jena) bereitgestellt, welcher nach dem zuvor beschriebenen Schema zur messtechnischen Erfassung der Faradayrotation arbeitet (siehe Abbildung 5). Durch die Verwendung einer Digitalkamera ermöglicht der MO-Sensor die auf seiner magnetooptischen Wandlerfläche von maximal $20 \times 15 \text{ mm}^2$ wirkende Normalkomponente der lokalen Feldstärkeverteilung innerhalb kürzester Zeit zu erfassen und ihre Verteilung mit einem lateralen Auflösungsvermögen von ungefähr $20 \text{ }\mu\text{m}$ in Form von Grauwertbildern zu visualisieren [11].

2.3 Methodik zur magnetooptischen mikromagnetischen Materialcharakterisierung

Anhand der zuvor in Kapitel 1 erläuterten mikromagnetischen Prüfverfahren wurde zur Erprobung des MO-Sensors zunächst ein methodisches Vorgehen erarbeitet, welches sich an Signalanregungs- und Auswerteverfahren zur mikromagnetischen Merkmalsgewinnung des 3MA-Verfahrens anlehnen soll. Nach diesem Konzept werden ferromagnetische Prüfkörper mithilfe einer externen Magnetisierungsvorrichtung zyklisch ummagnetisiert, während mithilfe des MO-Sensors eine zeitliche Bildfolge der lokalen Feldstärken an der Materialoberfläche aufgezeichnet wird. Aus den lokalen Feldstärke signalen als Funktion der Zeit werden im Anschluss charakteristische Kenngrößen abgeleitet, welche mit der Verteilung von Materialeigenschaften und Zuständen in bildgebender Form korreliert sind (siehe Abbildung 4).

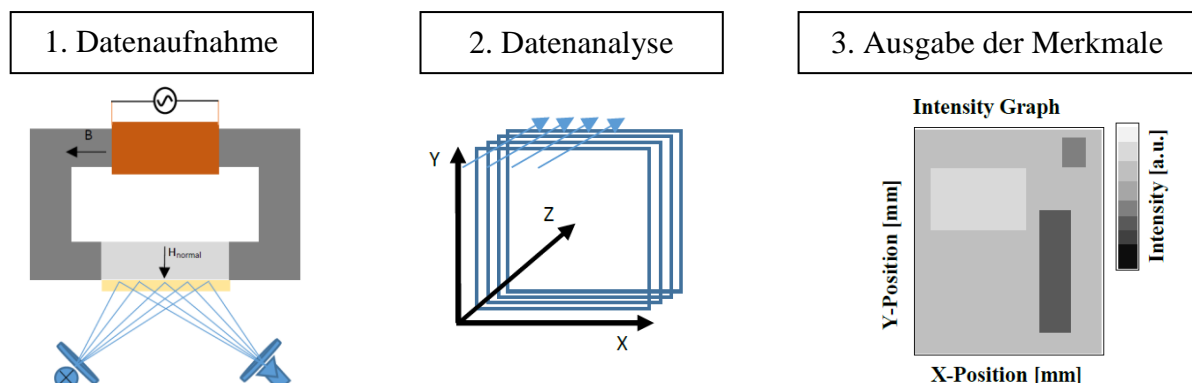


Abbildung 4: Methodik zur magnetooptischen mikromagnetischen Materialcharakterisierung

2.4 Labordemonstrator

Für die Erprobung der erarbeiteten Methodik wurde zunächst ein Labordemonstrator konstruiert und aufgebaut, welcher aus einer Sensorhalterung, einer anpassbaren Magnetisierungsvorrichtung und einem computersteuerbaren Leistungsverstärker besteht (siehe Abbildung 5, ohne Leistungsverstärker). Die Magnetisierungsvorrichtung wurde derart entworfen, dass Objekte unterschiedlicher Abmessungen durch eine einfache magnetische Ankopplung mittels Adapterkernen auf der Wandlerfläche des MO-Sensors ummagnetisiert werden können.

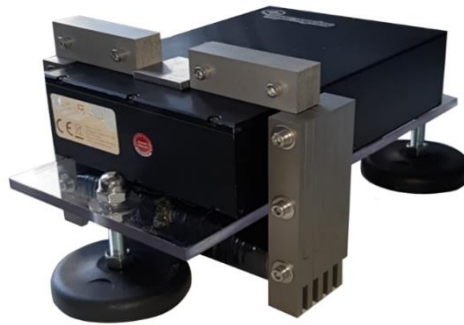


Abbildung 5: Labordemonstrator für magnetooptische mikromagnetische Materialcharakterisierung

2.5 Software zur Datenaufnahme magnetooptischer Bildsequenzen

Speziell für die Umsetzung der Magnetisierung und magnetooptischen Datenaufnahme nach der in Kapitel 2.3 geschilderten Methodik wurde eine Software „BiWa-MOS Data Acquisition“ entwickelt, welche über eine grafische Oberfläche bedient wird. Die Software ermöglicht dabei einerseits, die Magnetisierungsapparatur mithilfe einer Endstufe durch eine Magnetisierungsfunktion mit parametrierbarer Frequenz und Amplitude zu speisen. Weiterhin wird die Aufnahme der magnetooptischen Bildsequenzen ermöglicht, wobei sowohl die Aufnahmeparameter der Digitalkamera wie Belichtungszeit und Auflösung als auch Einstellungen hinsichtlich der zeitkritischen Bildsequenzen wie beispielsweise Triggeroptionen gewählt werden können. Daneben ermöglicht die Software bereits aufgenommene Bildsequenzen in ihrer zeitlichen Reihenfolge zu betrachten und diese für spätere Analysen abspeichern und laden zu können.

3. Erprobung des MO-Sensorsystems

Um die Reproduzierbarkeit nachfolgender Schritte der Signalverarbeitung und dem Ableiten charakteristischer Kenngrößen zu gewährleisten, wurden zunächst die vermessenen Rohsignale der Feldstärkeverläufe analysiert. Dabei wurde durch das Erarbeiten optimaler Aufnahmeparameter einer Bildsequenz durch Kamera- und Triggereinstellungen einerseits gewährleistet, dass die Feldstärkeverläufe an definierten Stellen von Prüfkörperoberflächen reproduzierbar vermessen werden (siehe Abbildung 6, rechtes Diagramm). Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die akquirierten Bildsequenzen in ausreichender zeitlicher Auflösung vorliegen, um die lokalen Feldstärkeverläufe auch auf enthaltene Oberwellen hin analysieren zu können, analog zur Prüftechnik der Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke des 3MA-Verfahrens (siehe Abbildung 6, linkes Diagramm) [12].

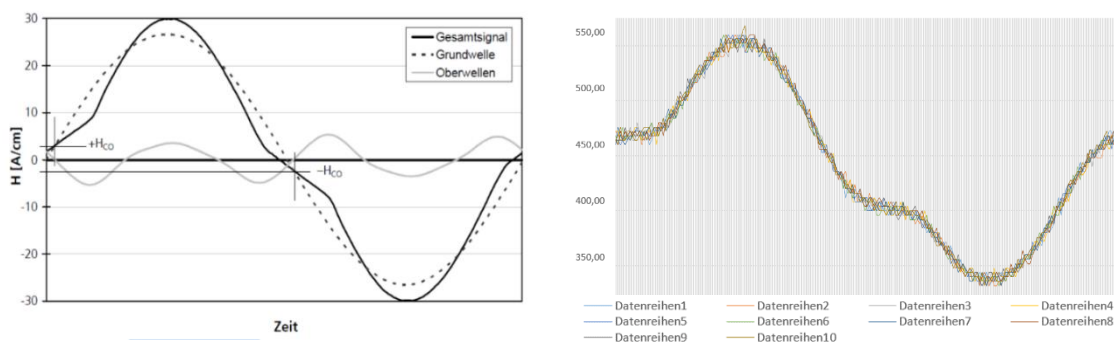


Abbildung 6: Reproduzierbarkeitsmessungen eines charakteristischen Feldstärkeverlaufs [12]

Nachdem die Reproduzierbarkeit der Datenaufnahme und der generelle Informationsgehalt überprüft und sichergestellt wurden, konnten mithilfe von Analysetechniken in Anlehnung an das 3MA-Verfahren charakteristische Kenngrößen zur Charakterisierung von Materialeigenschaften abgeleitet und in Form von Merkmalsbildern ausgegeben werden. Um den Informationsgehalt der abgeleiteten Merkmalsbilder zu bewerten, wurden Probenkörper entsprechender Anwendungsszenarien mithilfe der BiWa-MOS Sensorik untersucht und dabei referenzierten mikromagnetischen Merkmalsbildern gegenübergestellt, welche mithilfe des 3MA-basierten Barkhausenrausch- und Wirbelstrommikroskops (siehe Kapitel 1.1 „Ortsauflösende mikromagnetische Materialcharakterisierung“) ermittelt wurden.

3.1 Untersuchung an lasergehärtetem Stahl

Zunächst wurde dabei eine Probe aus dem Stahl C45 (Nr. 1.0503) untersucht, auf deren Oberfläche mithilfe eines Lasers eine randschichtbehandelte Spur aufgebracht wurde, deren Härte sich in Folge des Wärmeeintrags und der anschließenden Abkühlung deutlich von der des Grundmaterials abhebt [13].

Der jeweils mithilfe des BEMI und der BiWa-MOS Sensorik vermessene Bereich der Prüfkörperoberfläche ist in Abbildung 7 durch einen roten Rahmen gekennzeichnet und beinhaltet sowohl Oberflächenbereiche des unbehandelten Grundwerkstoffs als auch der randschichtgehärteten Spur.

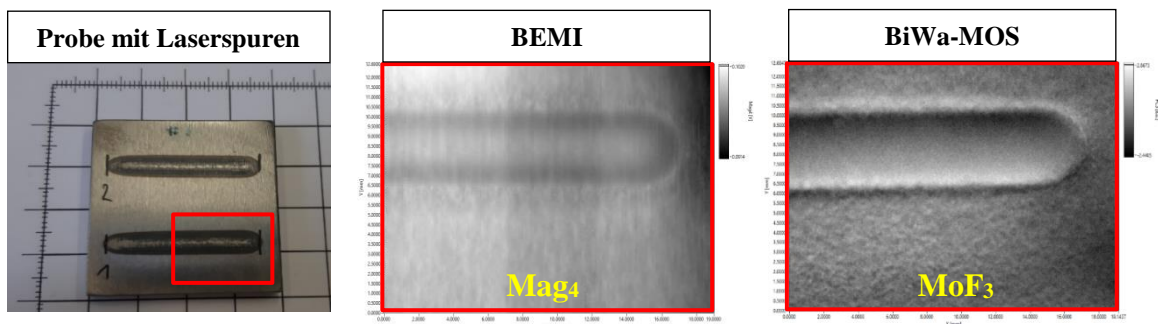


Abbildung 7: C45 Stahlprobe mit lasergehärteten Spuren

Bei der Gegenüberstellung der Merkmalsbilder **Mag₄** des BEMI (Impedanzbetrag des Wirbelstromprüfmodus) und dem abgeleiteten Merkmalsbild der BiWa-MOS Sensorik **MoF₃** kann qualitativ ähnlicher Informationsgehalt über Materialeigenschaften des Grundwerkstoffs und der randschichtgehärteten Spur beobachtet werden. Das Merkmalsbild **MoF₃** zeigt dabei gleichermaßen den Kontrast zwischen Bereichen des Grundwerkstoffs und der gehärteten Spur, wie das Merkmalsbild **Mag₄**, und lässt zudem deutlich mehr Mikrogefüge-Effekte erkennen. Während das Vermessen der gleichen Materialoberfläche mithilfe des BEMI mehr als 30 Stunden in Anspruch genommen hat und derart parametrisiert wurde, dass der Scan Pixelkantenlängen von 100x100 μm^2 aufweist, lagen die MO-Daten der BiWa-MOS Sensorik innerhalb von 20 Sekunden vor und weisen eine deutlich höhere Auflösung mit Pixelkantenlängen von 20x20 μm^2 auf.

3.2 Untersuchungen an laserinduzierten Eigenspannungsfeldern

Neben der C45-Probe wurde weiterhin ein Testkörper aus dem hochlegierten Stahl X20Cr13 untersucht, auf dessen Oberfläche mithilfe eines Lasers punktuelle Wärmebehandlungen eingebracht wurden (siehe Abbildung 8). Die behandelten Stellen grenzen sich durch radiale Eigenspannungsfelder vom unbehandelten Bereich der Materialoberfläche ab [14]. Um den Informationsgehalt der abgeleiteten Merkmalsbilder der BiWa-MOS Sensorik weiter zu analysieren, wurden auch an dieser Probe Vergleichsmessungen des markierten Bereichs der Materialoberfläche mithilfe des BEMI durchgeführt und gegenübergestellt.

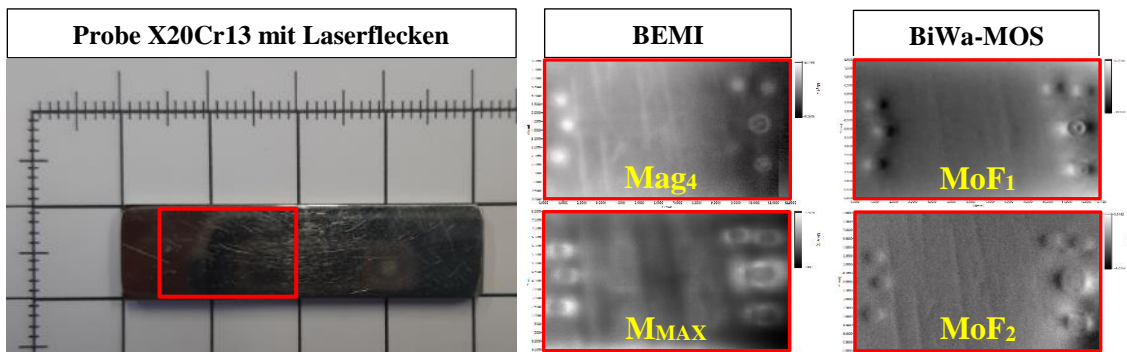


Abbildung 8: X20Cr13-Probe mit Laserflecken

Die lokalen Kontraste im Merkmal **MoF₁** repräsentieren dabei die Lage und Geometrie der durch die Wärmebehandlung lokal veränderten Materialeigenschaften des Chromstrahls in ähnlichem Maße wie das Merkmalsbild **Mag₄** des BEMI. Der Vergleich des Merkmalsbildes **M_{MAX}** des BEMI (maximale Amplitude des Barkhausenrauschens), welches besonders empfindlich auf Spannungen reagiert [14], mit dem Merkmalsbild **MoF₂** der BiWa-MOS Sensorik zeigt weiterhin, dass neben Materialeigenschaften auch Spannungsfelder in den Feldstärkeverläufen der magnetooptischen Bildsequenzen durch mikromagnetische Analogien erfasst und mit hoher Ortsauflösung abgebildet werden können. Auch an dieser Stelle wird auf den Zeitvorteil des entwickelten BiWa-MOS Sensors hingewiesen, welcher die MO-Daten innerhalb von 20 Sekunden mit Pixelkantenlängen von 20x20 μm^2 akquiriert hat, während das BEMI mehr als 30 Stunden für den Scan in Anspruch genommen hat und eine Auflösung mit Pixelkantenlängen von 100x100 μm^2 aufweist.

4. Zusammenfassung

Im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten des Projekts „BiWa-MOS“ wurde eine messtechnische Methodik auf der Basis mikromagnetischer Prinzipien erarbeitet, welche durch die Verwendung magnetooptischer Bildwandler eine sowohl schnelle als auch hoch ortsauflösende Abbildung der Eigenschafts- und Spannungsverteilung ferromagnetischer Materialien ermöglicht. Zur Umsetzung und Erprobung der Methodik wurde ein Labordemonstrator konstruiert, welcher in Verbindung mit der entwickelten Software „BiWa-MOS Data Acquisition“ eine Bildfolge der lokalen Feldstärkeverteilung ferromagnetischer Materialoberflächen während einer zyklischen Ummagnetisierung erfasst. Anhand der zeit- bzw. magnetisierungsabhängigen Feldstärkesignale konnten charakteristische Merkmalsbilder nach dem Vorbild des 3MA-Verfahrens abgeleitet werden, welche die Verteilung von Materialeigenschaften und Zuständen widerspiegeln. Der Informationsgehalt der extrahierten Merkmalsbilder wurde mithilfe des 3MA-basierten Barkhausenrausch- und Wirbelstrommikroskops BEMI, welches zum Stand der Technik hochauflösender mikromagnetischer

Prüftechniken zählt, anhand ausgewählter Prüfkörper in qualitativer Form erfolgreich validiert, wobei sich ein signifikanter Zeitvorteil der magnetooptischen Prüflösung offenbart hat. Die technische Machbarkeit der hochortsaufgelösten mikromagnetischen Materialcharakterisierung mithilfe magnetooptischer Sensoren auf Basis des Faraday-Effekts wird daher als gegeben eingeschätzt und bietet ein hohes Potential, sich durch weitere Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten als zerstörungsfreie Technik zur Qualitätssicherung und Zustandsbewertung von Stahl und Gusseisen in einem industriellen Umfeld zu etablieren.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des wissenschaftlichen Vorprojektes „BiWa-MOS“ (WiVoPro, FKZ: 13N15251) bedanken. Weiterhin gilt der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP) Dank für die Möglichkeit die Ergebnisse des Vorhabens im Rahmen der DGZfP Jahrestagung 2022 vorstellen zu dürfen.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Referenzen

- [1] Erhard Hornbogen und Hans Warlimont, Hg., *Metallkunde: Aufbau und Eigenschaften von Metallen und Legierungen*, 4. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2001. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/metallkunde/14598230>
- [2] Klaus Szielasko, Bernd Wolter, Ralf Tschunky und Sargon Youssef, „Mikromagnetische Materialcharakterisierung mit maschinellem Lernen: Fortschritte in der zerstörungsfreien Vorhersage mechanischer Eigenschaften von Stahl und Eisen“, *tm-technisches Messen*, Nr. 87, 2019, doi: 10.1515/teme-2019-0099.
- [3] Cyril Zimmer, Yashashwini Nikhitha Rallabandi, Klaus Szielasko, Christian Eichheimer, Michael Luke und Sargon Youssef, „Micromagnetic Microstructure- and Stress-Independent Materials Characterization in Reactor Safety Research“, *Materials*, Vol. 14, Nr. 18, 2021, doi: 10.3390/ma14185258.
- [4] Bernd Wolter, Yasmine Gabi und Christian Conrad, „Nondestructive Testing with 3MA: An Overview of Principles and Applications“, *Applied Sciences*, Vol. 9, Article ID 1068, 2019, doi: 10.3390/app9061068.
- [5] Sargon Youssef *et al.*, „Mikromagnetische Detektion von Härteinhomogenitäten an Grobblechen“, *GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme*, 2019, doi: 10.5162/sensoren2019/5.1.1.
- [6] Sargon Youssef, Martin Schuppmann, Sergey Pushkarev, Philipp Stopp und Olaf Stawicki, „KI-basierte Prozessoptimierung im Stahlwerk: Multimodales, intelligentes und autoadaptives Sensorsystem zur Hardspotdetektion in Grobblechen“, *ZfP-Zeitung*, Nr. 175, S. 38–44, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <http://bibliothek.izfp.fhg.de/publica/2021/21031.pdf>
- [7] Klaus Szielasko, Melanie Kopp, Ralf Tschunky, Sergey Lugin und Iris Altpeter, „Barhausenrausch- und Wirbelstrom-Mikroskopie zur ortsaufgelösten Charakterisierung von dünnen Schichten“, *DGZfP Jahrestagung*, Jg. 89, 2004. [Online]. Verfügbar unter: <http://bibliothek.izfp.fhg.de/publica/2004/04041.pdf>
- [8] Klaus Szielasko *et al.*, „Ortsauflösende Charakterisierung ferro- und ferrimagnetischer Schichten für magneto-resistive und magneto-optische Sensoren“, *DGZfP-Jahrestagung*

- Di. I.B.4*, Jg. 2014, 2014. [Online]. Verfügbar unter: https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3072604.pdf
- [9] Gerhard Habermehl, „Magneto-optische Rotationsdispersion organischer Flüssigkeiten“, *Zeitschrift für Naturforschung B*, Jg. 21, Nr. 1, S. 27–29, 1966, doi: 10.1515/znb-1966-0107.
- [10] INNOVENT Technologieentwicklung Jena, *Faraday Measuring Station*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.innovent-jena.de/en/magnetic-and-optical-systems/faraday-measuring-station> (Zugriff am: 14. März 2022).
- [11] Matesy GmbH, *Magnetic Technologies & Systems: cmos-magview - the magnetic field Camera*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.matesy.de/en/products/magnetic-field-visualization/cmos-magview-magnetic-field-camera-viewer-and-measurement-device> (Zugriff am: 14. März 2022).
- [12] Holger Pitsch, „Die Entwicklung und Erprobung der Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke als neues Modul des 3MA-Ansatzes“. Dissertation, Fraunhofer Insitut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1990. [Online]. Verfügbar unter: http://bibliothek.izfp.fhg.de/diplomarbeiten/Pitsch_DA_1990.pdf
- [13] Klaus Szielasko, Meisam Sheikh Amiri, Iris Altpeter, Christian Boller, Dieter Fischer und Jens Hahn, „Mikromagnetische Härtebeurteilung mit Punktsonden für den inudstriellen Einsatz bei kleinen Stückzahlen“, *DGZFP Jahrestagung*, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://bibliothek.izfp.fhg.de/publica/2011/11033.pdf>
- [14] Iris Altpeter, Jürgen Bender, Jochen Hoffmann und Melanie Kopp, „Die Barkhausen- und Wirbelstrommikroskopie, eine neue Rastersondentechnik zur Werkstoffcharakterisierung im Mikrometerbereich“, *Praktische Metallographie*, Jg. 1998, 1998. [Online]. Verfügbar unter: <http://bibliothek.izfp.fhg.de/publica/1998/98012.pdf>