

Ein Blick auf die Metal Magnetic Memory Methode nach ISO 24497 durch die Lupe hochauflösender GMR-Sensorik

Robert STEGEMANN¹, Nadja SONNTAG¹, Waikom SHARATCHANDRA SINGH¹,
Marc KREUTZBRUCK^{1,2}, Birgit SKROTZKI¹
¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
² Institut für Kunststofftechnik (IKT), Stuttgart

Kurzfassung. Die Messung spontaner magnetischer Streufelder ferromagnetischer Materialien wird als neue, Metal Magnetic Memory (MMM) genannte, Methode der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) angesehen, Schädigungen frühzeitig vorherzusagen. Die MMM Methode versucht, die sich gleichzeitig mit der Schadensentwicklung ausbildende lokale magnetische Struktur für die ZfP zu nutzen und zwar schon vor der eigentlichen Rissinitiierung. Das zugehörige Regelwerk ISO 24497 verspricht neben der Detektion von Mikrorissen und Inhomogenitäten des Werkstoffgefüges auch die Bestimmung des (Eigen-) Spannungszustandes. Neue, an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung für die ZfP angepasste GMR (Giant Magneto Resistance)-Sensorik erlaubt Magnetfeldmessungen mit einer Ortsauflösung im Mikrometerbereich. Mit höherer Ortsauflösung zeigen sich Unterschiede, jedoch keine Widersprüche zu bisher publizierten Daten. Ihnen wesentlich ist, dass es einige verwertbare Hinweise auf einen Zusammenhang von Restfeldmagnetisierung und Materialeigenschaften gibt.

Einführung

Die Messung der spontanen magnetischen (Eigen-)Streufelder (Self-magnetic-leakage fields, SMLFs) in ferromagnetischen Materialien wird als neue Methode der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) angesehen, Schädigungen und Deformationen von Bauteilen schon frühzeitig vorherzusagen [1]. Während remanente Magnetfelder durchaus Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen sind, wird ihre Detektion zur zerstörungsfreien Prüfung und zur Schadensvorhersage im wesentlichen Dubov [2] zugeschrieben und von diesem als Metal Magnetic Memory (MMM) Methode bezeichnet [3]. Die MMM-Methode findet Anwendung vor allem im russischen und chinesischen Raum bei großen Rohrleitungssystemen, beispielsweise bei Dampferzeugern und Pipelines, sowie bei Schweißnähten [2,4-6]. Prinzipiell werden aber jedwede ferromagnetischen Bauteile mit der MMM-Methode untersucht (Tragwerke, Turbinenschaufeln, etc.) [4,6,7]. Obgleich die MMM-Methode noch nicht international zertifiziert ist, sollen bereits mehr als 2000 Experten aus verschiedenen Ländern in der Anwendung der MMM-Methode geschult worden sein [8].

Anders als bei den Referenzverfahren der magnetischen und zerstörungsfreien Prüfung wie der Magnetpulver- oder der Streuflussprüfung, werden die Untersuchungsobjekte nicht in Absicht magnetisiert [7,9]. Zwischen SMLF,



Eigenspannungen [2,3,10,11] und lokaler Dehnungsüberhöhung [6,12] wird eine Relation angenommen, die für die ZfP genutzt wird [1,13].

Quantitative Aussagen über einen Zusammenhang von SMLF und den tatsächlichen vorliegenden Materialschädigungen lassen die bisher erhobenen und publizierten Daten dennoch kaum zu. Ursächlich hierfür ist, dass die Magnetisierung eines Bauteils nur sehr leidlich über eine reine Oberflächenmessung abgeschätzt werden kann. Beachtenswert sind zudem eine gewisse Selbstreferenz der einschlägigen Literatur, die fast monopolartige Verwendung des immer gleichen Messsystems, die meist begrenzte Anzahl von Messlinien für ein Untersuchungsobjekt, als auch die geringe Anzahl an publizierten Vergleichsmessungen mit anderen referenzierten Verfahren der ZfP [6,11,14]. Ein weiteres großes Problem der MMM-Methode ist das vollständige Fehlen einer fundierten wissenschaftlichen Analyse zur Falschalarmrate, also zu falsch-positiv und falsch-negativ Anzeigen. Aus dem Fehlen einer aktiven Magnetisierung folgt, dass eine lokale Änderung der Magnetisierung, verursacht durch externe Quellen, als Schadstelle missinterpretiert werden könnte. Selbst von Dubov wird darauf verwiesen, dass nach einer Fehlerdetektion mit MMM zusätzlich ein gängigeres Verfahren der ZfP Verwendung finden sollte [5].

Damit stellt sich nachdrücklich die Frage, in wie weit die MMM-Methode überhaupt als periodisches Inspektionsverfahren geeignet ist, insbesondere wenn zuvor keine aktive Magnetisierung ausgeführt werden darf. Wesentlicher Vorteil der MMM-Methode liegt jedoch in der versprochenen einfachen Anwendbarkeit, einer (vermuteten) frühzeitigen Schadensanzeige und der Möglichkeit, schnell, das heißt durch wenige Messungen eine Zustandsanalyse selbst großer Bauteile zu erhalten [11,15].

Grundlage der MMM-Methode ist die Detektion sog. Stress Concentration Zones (SCZs) [7,13]. Das sind Werkstoffbereiche mit lokal stark erhöhter Spannung im Vergleich zum Rest des Werkstoffes. Außerdem sollen oberflächennahe Risse und Gefügeinhomogenitäten ermittelt werden können. Eine genauere Definition der SCZs wird üblicherweise unterlassen [6], weil eine magnetische Unterscheidung schwierig, wenn nicht unmöglich ist. Dennoch sollen stets typisch überhöhte Amplitudenänderungen der Eigenstreufelder (SMLFs), oder im einfachsten Fall ein Vorzeichenwechsel ihrer Normalkomponente, den Ort einer SCZ anzeigen [3,5,6,13]. Als physikalische Ursache für das Auftreten dieser Magnetfelder werden magneto-mechanische Effekte benannt [4-6].

1 Experimentelles

1.1 Ansatz

Üblicherweise wird für die Prüfung nach der MMM-Methode, ein „spezielles“ [3,5,7] Messsystem verwendet [4,11,14]. Es handelt sich dabei um ein Förstersondensystem mit optionaler Gradiometerkonfiguration und integrierter Wegmessung [13]. Unser Ansatz zum besseren Verständnis der MMM-Methode ist a) die zweidimensionale Magnetfeldmessung mit hoher Ortsauflösung mit anschließender bildgebender Auswertung der Daten, b) zusätzlich die Prüfung der Reproduzierbarkeit durch häufige Wiederholungsmessungen mit verschiedenen, auch kommerziellen, Sensoren sowie c) der Vergleich der Messungen mit referenzierten Verfahren der ZfP und der Metallographie.

An der BAM für die ZfP angepasste GMR (Giant Magneto Resistance) Spinventil-Arrays erlauben Magnetfeldmessungen mit einer Ortsauflösung im Mikrometerbereich [17]. Die bildgebende Auswertung bietet den Vorteil, lokale Magnetfeldmessungen direkt optisch mit metallographischen Analysen vergleichen zu können. So können Fehldeutungen aufgrund verringerter Ortsauflösung oder der Verschiebung der Koordinatensysteme unterschiedlicher Messsysteme minimiert werden.

1.2 Experimentelle Grundlagen

In dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Sensortypen der Fa. Sensitec GmbH, Lahnau verwendet. Das intern 12A bezeichnete Gradiometer-Array wurde an der BAM für ZfP-Anforderungen angepasst [18] und wird sensitiv auf die Magnetfeldkomponente normal zur Probenoberfläche appliziert. Die aktiven Elemente dieser Sensoren sind mit zwei Referenzwiderständen jeweils zu einer Wheatstonebrücke verschaltet.

Bei dem 3-Achsen-Magnetometer-Protoyp GA757B, werden zwei GMR-Elemente durch eine hochpermeable Folie von dem externen Feld abgeschirmt und das anliegende Feld durch Fluxkonzentratoren in die entsprechende Raumrichtung den aktiven GMR-Elementen zugeleitet [19]. Externe Störquellen müssen bei der Analyse der Messdaten berücksichtigt werden. Der große Vorteil dieses Sensors besteht darin, dass das Magnetfeld kartesisch, ortsnah in situ gemessen werden kann. Die sensitiven Flächen befinden sich in einer Ebene. Gemessen wird bei beiden Sensortypen die anliegende Brückenspannung.

Das eingesetzte Messsystem besteht aus einer planaren Verfahreinheit aus Aluminium mit drei hochpräzisen Manipulatoren der Fa. Aerotech Inc., Pittsburgh, PA, USA, einem A/D-Wandler der Fa. National Instruments, Austin, TX, USA und einem Mehrkanal-Messverstärker mit variabler Verstärkung und Offset-Korrektur. Die Sensoren werden über eine rauscharme 5V Gleichstromversorgung betrieben. Die Messprozeduren sind mit LabVIEW, National Instruments, realisiert. Die Datenerfassung erfolgt weggetaktet mit einem Messpunktabstand entlang der Messlinie von 16 μm bei einem Linienabstand von 35 μm für das Gradiometer bzw. 141 μm für das Magnetometer.

Außerdem kamen ein Ultrasonic Contact Impedanz (UCI) Härtescanner (UT 200, BAQ GmbH, Braunschweig) sowie ein optisches 3D-Oberflächen-Interferometer MicroCAD compact (GFMesstechnik GmbH, Berlin) zum Einsatz.

1.2.1 Zugproben

Für systematische Untersuchungen verschiedener Verformungszustände wurden 15 Flachzugproben mit Rundkerben (Spannungskonzentration), aus S235JR (Werkstoff-Nr. 1.0038), einem handelsüblichen unlegierten ferritischen Baustahl, gefertigt (Abb. 1).

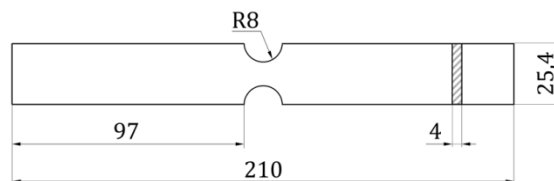


Abb. 1 Geometrie der Flachzugprobe mit Rundkerben, Angaben in mm

Die Probenoberflächen wurden geschliffen, die Proben in einem abnehmenden Wechselfeld entmagnetisiert und danach jeweils beidseitig mit beiden Sensortypen untersucht. Die Zugversuche erfolgten in einer 1-Spindel-Prüfmaschine (B562, 100 kN, Instron GmbH, Darmstadt, Deutschland) bis zu vordefinierten Dehnungswerten. Die Proben wurden dazu eingebaut, gezogen, ausgebaut und erneut beidseitig mit beiden Sensortypen vermessen.

1.2.2 Schweißproben

Es wurden acht Proben, wiederum aus S235JR, mit den Abmaßen $250 \times 100 \times 4,8 \text{ mm}^3$ gefertigt. Die Oberflächen wurden plangeschliffen. Anschließend wurden die Proben in einem abnehmenden Wechselfeld entmagnetisiert und darauf beidseitig mit beiden Sensortypen untersucht. Um den Einfluss zusätzlicher Variablen gering zu halten, wurde

durch einen WIG-Schweißprozess ($U = 12,5 \text{ V}$, $I = 100 \text{ A}$, $v = 20 \text{ cm/min}$) lediglich eine Blindschweißnaht (örtliche Wärmebehandlung) ausgeführt. Daraufhin wurden die Proben wiederum beidseitig magnetisch vermessen.

2 Ergebnisse

2.1 Monotone Zugversuche

Stellvertretend für die Versuchsreihe veranschaulichen die Messungen an einer Probe mit einer Belastung von $F = 16 \text{ kN}$ und einer Totaldehnung $\varepsilon_t = 11,2 \%$ die Ergebnisse. Der im Folgenden verwendete Signal-Rausch-Abstand (SNR) bezeichnet das Verhältnis von Nutzsinalamplitude zur Standardabweichung des Rauschens.

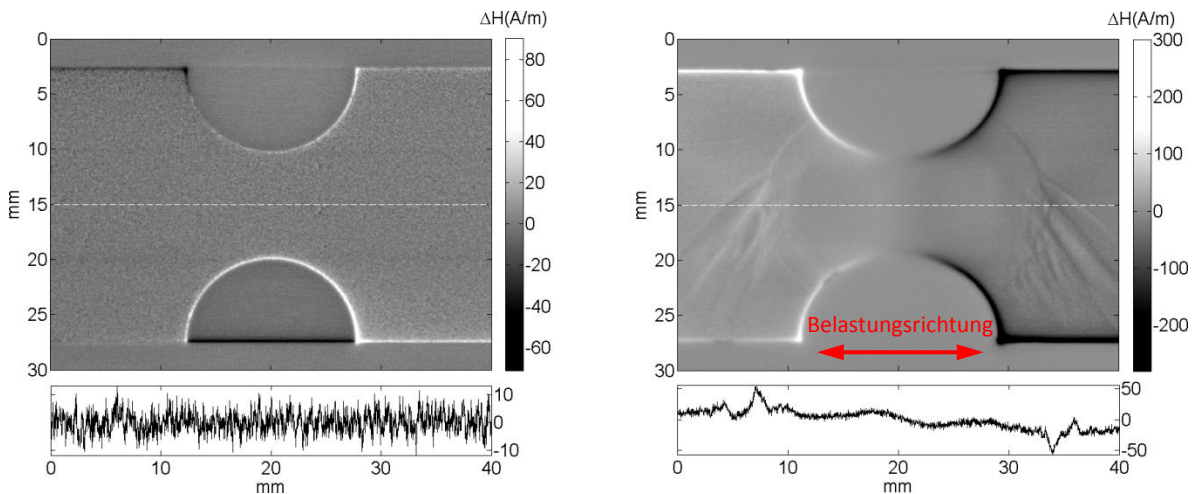


Abb. 2 Multiliniens GMR Gradiometermessung ($\Delta\vec{H}_Z$) einer gekerbten Flachzugprobe; im Ausgangszustand (links); nach Zugbelastung von $F = 16 \text{ kN}$, $\varepsilon_t = 11,2\%$ (rechts)

Im Ausgangszustand (Abb. 2 links) erkennt man lokale Kleinststrefelder, die regellos verteilt sind. Unterhalb der Abbildungen ist jeweils das Magnetfeldprofil entlang der gestrichelten Linie dargestellt. Die Probekanten weisen mit einem durchschnittlichen SNR von etwa 60 die markantesten Streufelder auf.

Die Probe zeigt nach der Belastung (Abb. 2 rechts) eine erhöhte Magnetisierung und ist im Kербbereich sowohl in Quer- als auch in Dickenrichtung verjüngt. In diesem Bereich wurden mit einem optischen Verfahren Hauptformänderungen in Größenordnung von mehr als 30 % gemessen [20]. Zudem bilden sich lokale inhomogene plastische Deformationen in der Art von Lüdersbändern in Richtung der maximalen Schubspannung aus. Diese sind magnetisch detektierbar ($\text{SNR} \approx 20$). Bekanntlich lassen sich Lüdersbänder auch mit bloßem Auge erkennen, da es in diesen Bereichen zu lokalen Oberflächenverwerfungen kommt. Optische Topographiemessungen zeigten, dass diese in der Größenordnung von maximal $5 \mu\text{m}$ lagen. Nach Abtragen der Unebenheiten mittels Schliff und Politur bleiben die magnetische Strukturen erhalten (Abb. 3).

In beiden Abbildungen ist im Kербbereich ein Rest der lokalen Einschnürung zu erkennen, da die Probe nicht bis zu deren Grund poliert wurde. Die magnetischen Strukturen sind im Bereich der Lüdersbänder vermutlich so fest gepinnt, dass selbst eine signifikante mechanische Bearbeitung, (etwa $200 \mu\text{m}$ der Oberfläche wurde abgetragen) diese nicht grundlegend verändert. Jedoch ist ihr SNR gegenüber dem unpolierten Zustand in etwa halbiert. Am Ort der maximalen Verformung kommt es zu einem lokalen und erhöhten magnetischen Streufeld in Richtung der Zugachse [20].

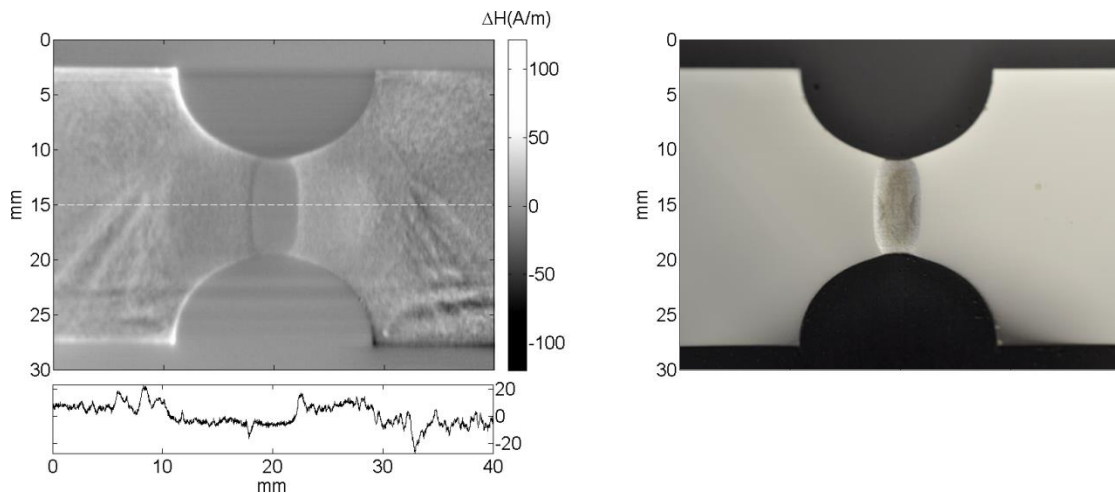


Abb. 3 Multiliniens GMR-Gradiometermessung ($\Delta\vec{H}_Z$) der Flachzugprobe aus Abb. 2 (rechts) nach Schriff und Politur (links); lichtoptische Aufnahme (rechts)

Mit den vorgestellten GMR-Sensoren ist es möglich, dank günstiger SNR-Werte, lokale inhomogene plastische Deformationen zu detektieren. Sie sind keinem reinen Oberflächeneffekt geschuldet. Ursächlich für das Auftreten dieser Streufelder könnte ein lokaler Permeabilitätsabfall in der plastischen Zone sein [21], der ähnlich wie bei der aktiven Streuflussprüfung das Magnetfeld aus dem Material treibt [17]. Da plastische Deformationen sowohl mit Geometrie- und Oberflächenänderungen einhergehen als auch den Eigenspannungszustand beeinflussen, bleibt unklar, welchen quantitativen Anteil die Plastifizierung am Streufeld hat. Da sich die Lüdersbänder durch den Querschnitt bis zur Probenunterseite fortsetzen, kann außerdem zurzeit keine Aussage darüber getroffen werden, bis zu welcher Tiefe die MMM-Methode sensitiv ist.

2.2 Schweißnähte

Die MMM-Methode wird besonders häufig für die zerstörungsfreie Prüfung von Schweißnähten verwendet. Die wichtigsten Ergebnisse werden am Beispiel einer der untersuchten Proben vorgestellt.

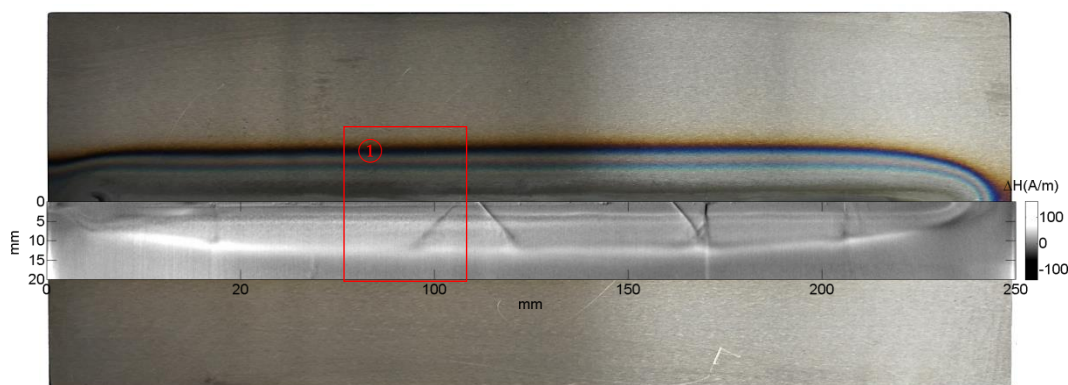


Abb. 4 Vergleich eines lichtoptischen Bildes mit teil-überlagerter Multiliniens Gradiometermessung ($\Delta\vec{H}_Z$) einer WIG-Blindschweißnaht

Wesentlichstes Ergebnis der hochauflösenden Messungen ist, dass die lokalen Magnetfelder der untersuchten Schweißnähte nicht regellos verteilt sind. Die magnetischen Strukturen stimmen beinahe vollständig, bei nur geringfügigen qualitativen Abweichungen am Anfang und Ende der Schweißnaht, mit der lichtoptischen Erscheinung der Proben überein (Abb. 4).

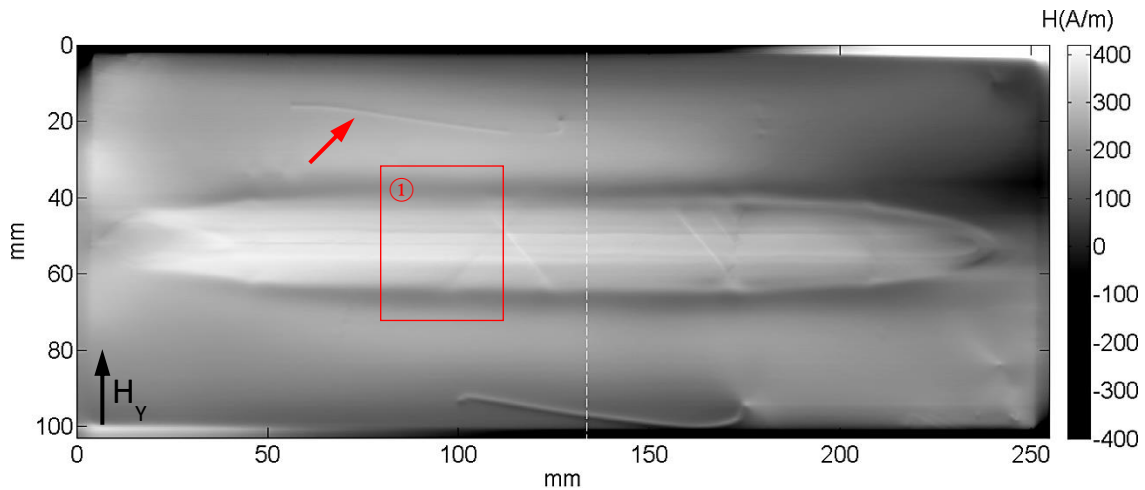


Abb. 5 Multilinen GMR Magnetometermessung (\vec{H}_y) einer Blindschweißnaht

Die Anlasszonen, Wärmeinflusszone und die Wölbung der Probenoberfläche zeigen sich jeweils durch deutliche Streufeldamplituden ($\text{SNR} \approx 10\text{-}20$). Einzig oberflächliche Defekte (Kratzer und Abplatzungen) bilden sich durch ihren typischen Streufeldverlauf wesentlich markanter im Magnetfeldsignal ab ($\text{SNR} > 50$). Abbildung 5 zeigt die \vec{H}_y Komponente des Magnetfeldes. Die gestrichelte Linie markiert den Ort des Magnetfeldprofils aus Abbildung 6.

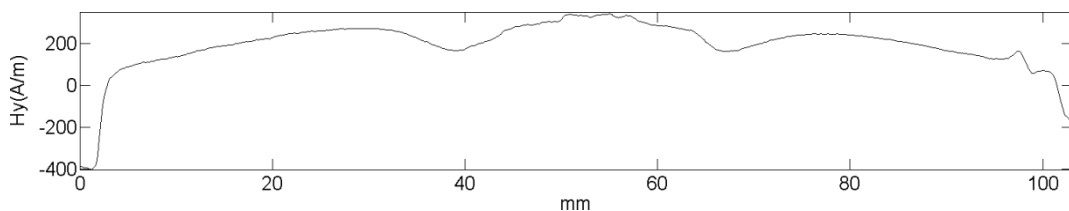


Abb. 6 Magnetfeldprofil der gestrichelten Linie aus Abb. 5 (\vec{H}_y -Komponente)

Den typischen M-förmigen Eigenspannungsverlauf einer Schweißnaht (Abb. 6), den Dubov *et al.* [13] auch im Magnetfeld detektieren konnten, ist für unsere Proben vorwiegend den örtlichen Anlass- und Wärmeinflusszonen zuzuordnen (Abb. 4, 5). In wie weit daher die Magnetfeldverteilung zusätzlich den Eigenspannungszustand abbildet, wird aktuell untersucht. Vergleichende Topographiemessungen zeigen, dass das Magnetfeldprofil keinem reinen Oberflächeneffekt geschuldet sein kann.

Verschiedene Autoren [3,9], konnten die SCZs einer Schweißnaht mit einer deutlichen Überhöhung der lokalen Härte korrelieren. Von uns durchgeführte vergleichende Untersuchungen an sechs der Schweißproben mit jeweils mehreren Hunderttausend betrachteten Messpunkten, sowohl für Härte als auch GMR-Messungen, zeigten keinen einfachen Zusammenhang.

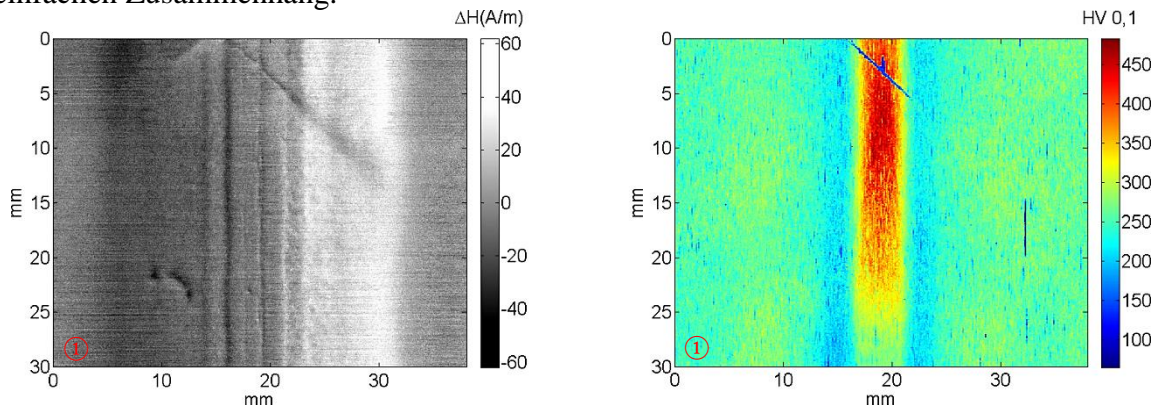


Abb. 7 Multilinen GMR-Gradiometermessung ($\Delta\vec{H}_z$, links), UCI-Härtemapping (rechts)

Stellvertretend für die ganze Versuchsreihe soll Abbildung 7 stehen. Sie zeigt den Vergleich einer Multilinen GMR-Gradiometermessung (Abb. 7 links) mit einem UCI Härtemapping (HV 0,1, Abb.7 rechts) aus dem rot markierten Bereich in Abbildungen 4 und 5. Für das lokale Streufeld ist kein direkter Zusammenhang mit der Werkstoffhärte zu finden. Diese Diskrepanz ist aber nicht zwingend, da in den von uns detektierten SCZs auch Falschanzeigen enthalten sein könnten. Ein absichtlicher Ausschluss dieser Anzeigen wird unterlassen, da fundierte Veröffentlichungen fehlen, inwieweit lokale Streufelder auch ohne Gefügedegradation auftreten können.

Als Beispiel für eine vermutete Falschanzeige ist die linienförmige Struktur oberhalb der Schweißnaht in Abbildung 5 (roter Pfeil) zu nennen, die wahrscheinlich durch eine externe und unabsichtliche Magnetisierung nach dem Schweißprozess erzeugt wurde. Die fast gleichförmige Struktur unterhalb der Schweißnaht entspricht einer Kratzspur.

Für zwei Schweißproben wurden vor deren Herstellung ihr Halbzeug, ein Blechstück mit Walzhaut (Abmaß $600 \times 115 \times 5 \text{ mm}^3$), mit dem Gradiometer untersucht. In dessen Oberfläche konnten signifikante magnetische Strukturen festgestellt ($\text{SNR} > 10$) werden, die nach Zuschneiden und Schleifen nicht mehr detektierbar waren. Bekannt ist, dass Walzhaut Karbide und Oxide enthält, so auch Eisen(II,III)-Oxid, das wegen seiner starken magnetischen Eigenschaften als Magnetit firmiert [22]. Es muss also bei einer technischen Anwendung der MMM-Methode mit hartmetallischen Oberflächeneinschlüssen und deren Einfluss auf das Streufeld der Proben gerechnet werden. Ein Einfluss oberflächennaher Oxide, des Abbrandes oder allgemein der Oberfläche auf den MMM-Effekt wird bisher vom Standard als irrelevant eingestuft [7].

Zusammenfassung

Im Wesentlichen wird die MMM-Methode auf beliebige ferritische Stähle angewendet. Dabei gilt zu beachten, dass die zerstörungsfrei zu untersuchenden Materialien zuvor nicht magnetisiert worden sind. Es ist unbekannt, wie dies für technische Prüfaufgaben jeweils zu realisieren sein könnte.

Die hohe Ortsauflösung der ZfP-angepassten GMR-Sensoren kann maßgeblich zum besseren Verständnis der MMM-Methode beitragen. Wesentliches Ergebnis am unlegierten Baustahl S235JR ist, dass lokal ungleichmäßige plastische Deformationen lokale Distorsionen des Streufeldes verursachen. Dies wird sowohl von der Norm als auch von der einschlägigen Literatur beschrieben. Jedoch sind Plastifizierung, Topographie- und Geometrieänderungen so miteinander verknüpft, dass ein allgemeingültiger funktioneller Zusammenhang zwischen gemessenen magnetischen Feld- und Werkstoffkennwerten äußerst schwierig zu ermitteln sein dürfte. Ob es unter dieser Prämisse überhaupt möglich sein wird, aus Remanenzfeldmessungen den Spannungszustand von Bauteilen erfassen zu können, ist Gegenstand weiterführender Untersuchungen.

Die lokalen Streufelder der Blindschweißnähte korrelieren in hohem Maße mit optisch sichtbaren Strukturen, den bekannten Schweißzonen, sind aber wiederum auch von Oberflächenzustand und Geometrie beeinflusst. Über den Einfluss von Eigenspannungen kann bisher keine Aussage getroffen werden.

Ausblick

Nach den Ergebnissen der quasistatischen Zugversuche werden nachfolgend zyklische Versuche an gekerbten Proben durchgeführt. Ziel ist die Rissinitiierung und Plastifizierung mit hochauflösenden Magnetfeldmessungen zu untersuchen. An ausgewählten Schweißproben werden mittels Neutronendiffraktion Eigenspannungen gemessen. Mit

dieser referenzierten Vergleichsmessung wird eine fundierte Analyse der sog. SCZs ermöglicht. Der Einfluss beabsichtigter Magnetisierung auf typische MMM-Signalverläufe [23] wird Gegenstand weiterer Untersuchungen sein und dazu beitragen, numerische Simulationen zu diesem Thema experimentell zu stützen [24].

Danksagung Herrn M. Weise (BAM 6.7) sei für die Profilometermessungen, Herrn L. Stempin (ehem. BAM 9.3) für die Härtemessungen, sowie Herrn A. Pittner und Herrn T. Michael (beide BAM 9.3) für die Durchführung der Schweißversuche gedankt.

Referenzen

- [1] Dubov, A.; et al.; Technical diagnostics of equipment and constructions with residual life assessment using the method of metal magnetic memory; 17th WCNDT 2008; Shanghai, China
- [2] Li, L.; et al.; Magnetic field abnormality caused by welding residual stress; J. Magn. Magn. Mater. 261 (3); 2003; S. 385-391
- [3] Dubov, A. A.; A study of metal properties using the method of magnetic memory; Mat. Scie. Heat Treat. 39 (9-10); 1997; S. 401-405
- [4] Dubov, A.; et al.; Application of the metal magnetic memory method for detection of defects at the initial stage of their development for prevention of failures of power engineering welded steel structures and steam turbine parts, Weld. World 58 (2) 2013; S. 225-236
- [5] Dubov, A.; et al.; Assessment of the material state of oil and gas pipelines based on the metal magnetic memory method; Weld. World 56 (03/04); 2013; S. 11-19
- [6] Roskosz, M.; et al.; The metal magnetic memory method in the diagnostics of power machinery component; JAMME 43 (1) 2010; S. 362-370
- [7] ISO 24497-1:3 Non-destructive testing - Metal magnetic memory 2007
- [8] <http://www.energodiagnostika.com/education-NDT.html> (abgerufen am 02.05.2015)
- [9] Kolokolnikov, S. M.; Determination of the mechanical properties of weld metal on the basis of the hardness parameters in stress concentration zones detected by the method of magnetic memory of metal; Weld Int. 28 (12); 2014; S. 983-988
- [10] Roskosz, M.; et al.; Analysis of the universality of the residual stress evaluation method based on residual magnetic field measurements; NDT E Int. 54; 2013; S.63-68
- [11] Schneider, E.; et al.; Zerstörungsfreie Charakterisierung des Eigenspannungszustandes mit der Metall Memory Method (MMM); DACH-Jahrestagung 2007
- [12] Roskosz, M.; et al.; Studies on magnetic and mechanical properties in plastically deformed Ferromagnetic Steels; ENDE (XVII) 2014; doi:10.3233/978-1-61499-407-7-72
- [13] Dubov, A. A.; et al.; Method of metal magnetic memory and inspection instruments. Training handbook. Moskau, ZAO "TISSO"; 2008
- [14] Roskosz, M.; Metal magnetic memory testing of welded joints of ferritic and austenitic steels; NDT E Int. 44 (3); 2011; S.305-310
- [15] Wang, Z. D.; et al.; A review of three magnetic NDT technologies; J. Magn. Magn. Mater.; 324; 2012; S. 382-388
- [16] Jiles, D.C.; Theory of the magnetomechanical effect; J. Phys. D: Appl. Phys. 28; 1995; S. 1537-1546
- [17] Pelkner, M.; Entwicklung, Untersuchung und Anwendung von GMR-Sensorarrays für die zerstörungsfreie Prüfung von ferromagnetischen Bauteilen; Dissertation; Saarbrücken 2014
- [18] Pelkner, M.; et al.; Routes for GMR-sensor design in non-destructive testing; Sensors 12; 2012; S. 12169-12183; doi:10.3390/s120912169
- [19] Glenske, C.; et al; New 3D-Magnetic Field Sensors with GMR-Spin Valve Layers. 10th Symposium – Magnetoresistive Sensors and Magnetic Systems; Wetzlar 2009; S.79-86
- [20] Sonntag, N.; et al.; Verformungsinduzierte Magnetisierung ferromagnetischer Stähle am Beispiel eines unlegierten Baustahls; Tagung Werkstoffprüfung 2014; S.355-360; ISBN: 978-3-9814516-8-9
- [21] Jiles, D.C.; The effect of compressive plastic deformation on the magnetic properties of AISI 4130 steels with various microstructures; J. Phys. D: Appl. Phys. 21; 1988; S. 1196-1204
- [22] Sun, W.; et al.; High temperature oxide scale characteristics of low carbon steel in hot rolling; J. Mater. Process. Technol. 155-156; 2004; S. 1307-1312
- [23] Kuroda, M.; et al.; Evaluation of residual stresses and plastic deformations for iron-based materials by leakage magnetic flux sensors; J. Alloys Compd. 314; 2001; 232-239
- [24] Yao, K.; et al.; Three-dimensional finite element analysis of residual magnetic field for ferromagnets under early damage; J. Magn. Magn. Mater.; 354; 2014; S. 112-118