

Detektion verdeckter Defekte in dünnen Stahlblechen mit GMR-Sensoren

Matthias PELKNER *, Colin COMMANDEUR **, Thomas ERTHNER *,
Marc KREUTZBRUCK *, Rainer POHL *

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

** Tata Steel R&D, Ymuiden, Niederlande

Kurzfassung. Seit einigen Jahren beschäftigt sich eine Gruppe der BAM mit der Entwicklung angepasster GMR-Sensorik (giant magneto resistance, Riesenmagnetwiderstand) für spezielle ZfP-Probleme. Hierbei wurden reichhaltige Erfahrungen auf dem Gebiet der automatisierten Streuflussprüfung mit GMR-Sensoren gesammelt (DACH-Tagung 2012, Graz).

Die an der BAM gewonnenen Erkenntnisse veranlassten Europas zweitgrößten Stahlhersteller, Tata Steel Europe, mit der BAM eine Lösung für ein spezielles Prüfproblem zu finden. Ziel ist es, dünne Bleche im Fertigungsprozess auf kleinste Inhomogenitäten automatisiert zu prüfen.

In einem ersten Schritt wurden durch die Tata Steel Europe 0,2 Millimeter starke Testbleche hergestellt, in die Fehler von 5-60 Mikrometern Tiefe eingebracht wurden. Anschließend wurden von der BAM vergleichende Prüfungen mit Wirbelstrom und GMR-Streufluss durchgeführt. Nur mit letzterer Methode gelang es, einen Teil der verdeckten Testfehler sicher zu detektieren. In einem zweiten Schritt wurden verschiedene Untersuchungen zur Praxistauglichkeit der Sensorik (Prüfgeschwindigkeit; Sensorabstand etc.) durchgeführt. Die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen und ein möglicher Weg zum praktischen Einsatz der Sensorik werden vorgestellt.

1. Aufgabenstellung / Testfehler

Kleinste Einschlüsse in dünnen Stahlblechen können bei der weiteren Bearbeitung dieser Bleche zu weiteren Materialfehlern führen. Deshalb ist Tata Steel an die BAM mit der Fragestellung herangetreten, inwieweit die an der BAM entwickelte GMR-Sensorik [1,2] in der Lage ist, solche Einschlüsse zu detektieren. Hierzu wurden von Tata Steel vier ferritische Testbleche (ca. 300x210 mm²) der Dicke 0,22 mm mit je drei Reihen zu je dreizehn Testnuten der BAM für Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Die Testnuten wurden durch Laserablation hergestellt und haben einen Abstand von 6 mm. Die Fehlergeometrie kann näherungsweise als halbelliptisch beschrieben werden. Die Fehlertiefen waren über diese 156 Testfehler eng zwischen 5 µm und 60 µm gestaffelt. Die Fehlerbreiten streuten zwischen 80 µm und 220 µm, die Fehlerlängen zwischen 0,5 mm und 1,3 mm. Die mittels Konfokalmikroskopie ermittelten geometrischen Ausdehnungen wurden ebenfalls von Tata Steel zur Verfügung gestellt. Um einen Eindruck der Fehlergeometrie zu vermitteln, zeigt Bild 1 ein charakteristisches Beispiel dieser Vermessung. Gezeigt werden eine 2D- und eine 3D-Darstellung, sowie ein Längs- und ein Querschnitt durch das Messfeld.



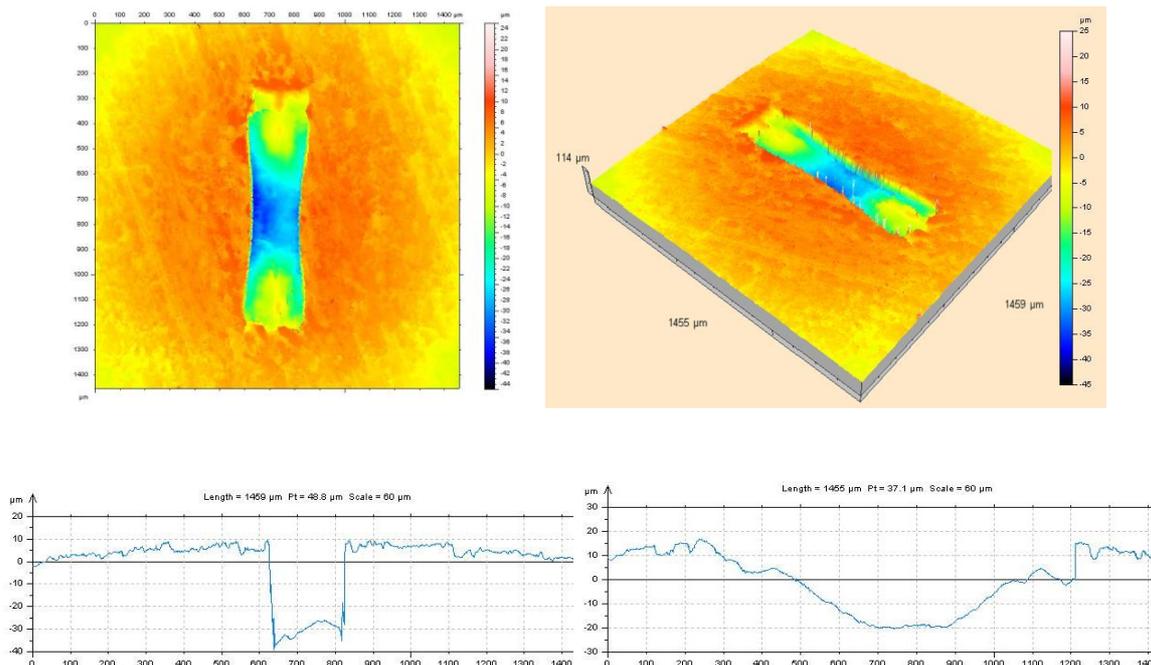


Bild 1: Verschiedene Darstellungen eines charakteristischen Testfehlers ca. 900x200x50 µm³

2. Prüfungen mit GMR-Sensoren

Die Prüfungen wurden mit dem BAM-GMR-Messplatz [2] an allen 4 Testblechen durchgeführt. Es wurden Sensorzeilen, bestehend aus 16 Gradiometern, eingesetzt [1,2]. Zur lokalen Magnetisierung wurde ein Magnetjoch [3] mit einem Gleichstrom von 1 A gespeist. Die Ergebnisse an allen 4 Platten sind vergleichbar. Bild 2 zeigt das Ergebnis der GMR-Streufeldprüfung an „Blech 3/8“ im Maßstab 1:2.

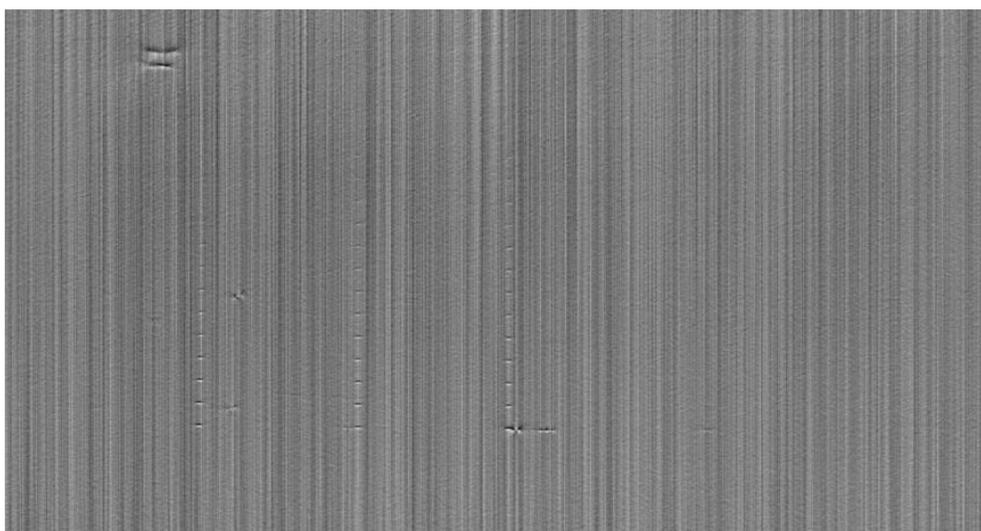


Bild 2: GMR-Prüfergebnis am „Blech 3/8“ verdeckt abgetastet; Prüffläche 260x140 mm²

Neben den drei Reihen der Testnuten, von denen nahezu alle Fehler zu erkennen sind, zeichnen sich auch deutliche Signalstrukturen ab, die auf natürliche Inhomogenitäten

hindeuten. Diese Signalstrukturen sind auch in den Wirbelstromprüfungen erkennbar und bedürfen einer weiteren Abklärung. Die Streifenstruktur ist durch Offsetspannungen der einzelnen Sensoren verursacht, und lässt sich mittels Filterung leicht beseitigen (Bild 3).

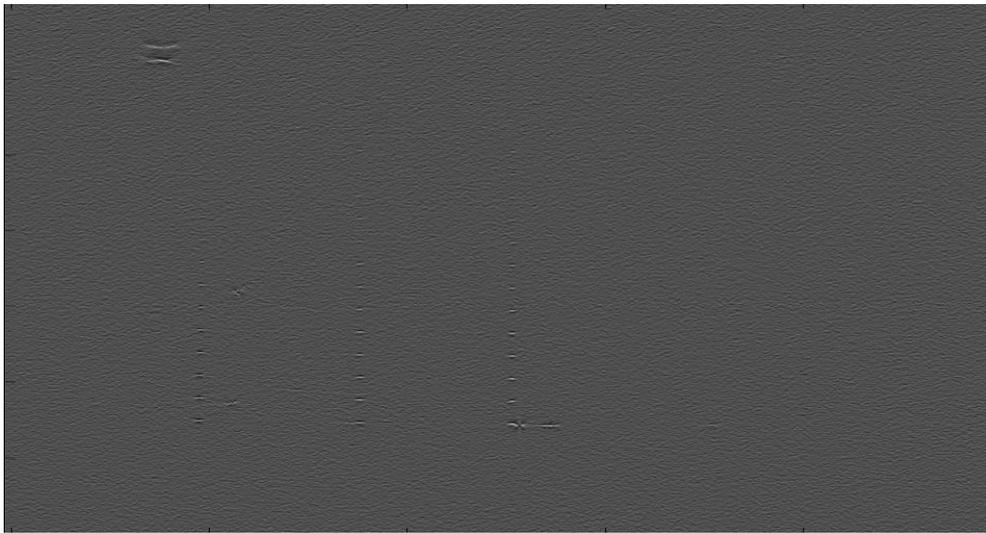


Bild 3: GMR-Prüfergebnis am „Blech 3/8“ verdeckt abgetastet; gefiltert; Prüffläche 260x140 mm²

2.1 Abstandsverhalten

Um zu untersuchen wie stark sich die Signalabnahme bei zunehmendem Sensorabstand auswirkt, wurden Messungen mit den Abständen 0,1 mm, 0,25 mm und 0,5 mm zwischen Sensor und Materialoberfläche an ausgewählten Testfehlern durchgeführt. Bild 4 zeigt hierzu beispielhaft Linienscans bei verschiedenen Abständen über die mittlere Testfehlerreihe (linkes Bild) und den tiefsten Fehler (rechtes Bild) von „Blech 3/8“.

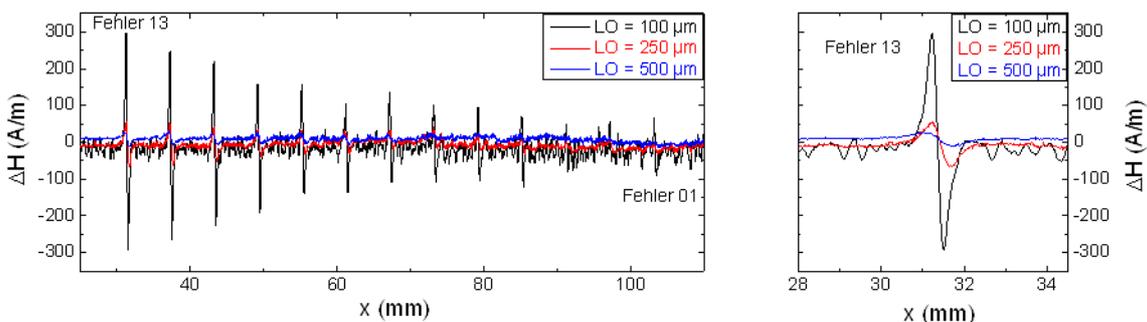


Bild 4: Linienscan über eine Testfehlerreihe und einen Einzelfehler bei drei verschiedenen Abständen (LO)

Neben dem erwarteten Rückgang des Nutzsignales an den Testfehlern, ergab sich mit zunehmendem Abstand auch eine deutliche Reduzierung des Störsignales auf der Signalgrundlinie. Dies ist besonders gut in der vergrößerten Darstellung des Einzelfehlers (rechts in Bild 4) zu erkennen. Eine Ursache dieses Störsignales liegt in der Oberflächenrauheit der Bleche. Diese liegt mit etwa 5 μm in der Größenordnung der kleinsten Testfehler. Aufgrund ihres größeren Volumens und ihrer definierten geometrischen Abmessungen lassen sich diese kleinen Testfehlersignale jedoch von den in der Rauheit begründeten Signalen unterscheiden. Tabelle 1 stellt Stör- und Nutzsignal am größten und kleinsten Testfehler der dargestellten Testfehlerreihe gegenüber.

Tabelle 1: Verhältnis von Nutz- und Störsignal an zwei ausgewählten Testfehlern

	Abstand [μm]	Fehlersignal [A/m]	Störsignal [A/m]	Signal-Störabstand [dB]
Fehler 13 Tiefe 45 μm Restwand 78%	100	590	32	25,3
	250	122	9	22,6
	500	44	6	17,3
Fehler 1 Tiefe 8 μm Restwand 96%	100	156	32	13,8
	250	27	9	9,5
	500	16	6	8,5

Eine Abstandsvergrößerung von 100 μm auf 500 μm führt bei den untersuchten Sensoren zu einem Signalverlust von ca. 20 dB. Aufgrund der Verringerung des Störsignales verschlechtert sich der Signal-Störabstand jedoch nur um etwa 5 bis 8 dB. Unter Laborbedingungen ist an dieser Testfehlerreihe der Nachweis aller Testfehler mit einem Signal-Störabstand von mehr als 6 dB bis zu einem Sensorabstand von 500 μm möglich.

2.2 Winkelabhängigkeit

Die Streuflussprüfung ist gegenüber linienförmigen Fehlergeometrien winkelabhängig. Um diesen Einfluss bei den gegebenen Fehler- und Sensorgeometrien genauer zu charakterisieren, wurde das bereits in Bild 2 dargestellte Testfehlerfeld um 45° gedreht und nochmals geprüft. Bild 5 stellt das bildhafte Prüfergebnis im Maßstab 1:2 dar.

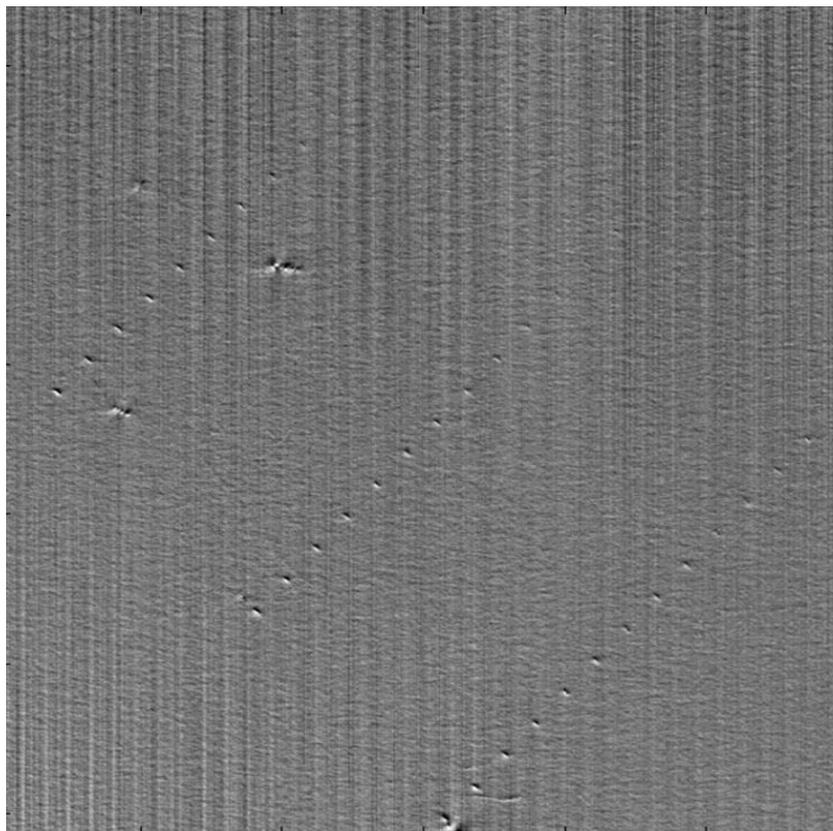


Bild 5: GMR-Prüfergebnis am „Blech 3/8“ verdeckt abgetastet; 45° gedreht; Prüffläche 220x220 mm²

Die Reihen der Testfehler lassen sich klar erkennen. Die wahrscheinlich von natürlichen Fehlern hervorgerufenen Signale erscheinen sogar noch etwas klarer. Zur Abschätzung der Amplitudenverhältnisse wurden in Bild 6 zwei Linienscans am gleichen Testfehler

gegenübergestellt. Es ergibt sich für den um 45° gedrehten Prüffall ein Signalverlust von ca. 30%.

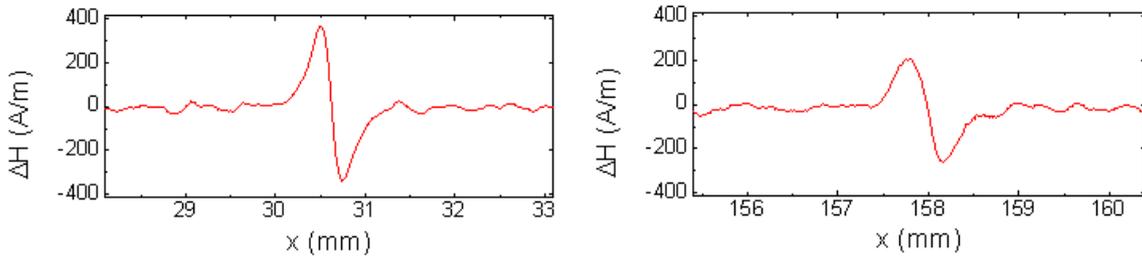


Bild 6: Linienscans am gleichen Testfehler; Abtastrichtung 90° (links) und 45° (rechts) zum Fehler

2.3 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die GMR-Sensorik

Eine weitere Fragestellung betraf die Prüfgeschwindigkeit. Hier war zu klären, ob eine hohe Prüfgeschwindigkeit die Detektion von Fehlern mit der Prüfanordnung behindert. Unter der Annahme, induzierte Wirbelströme könnten das Streufeldsignal am Fehler reduzieren, wurden an einem Testaufbau verschiedene Messungen durchgeführt.

Hierzu wurde ein ringförmiger Probekörper (Bild 7 rechts) aus Stahl E 295 mit einem Durchmesser von 229 Millimetern genutzt. Der Probekörper wurde in eine Drehbank gespannt und in Rotation versetzt. Als Testfehler wurde zuvor mit einer Säge ein Schnitt in der Außenfläche eingebracht. Der Schnitt verläuft quer zur Drehrichtung und hat folgende Abmessungen: Länge = 15 mm, Breite = 0,5 mm und Tiefe = 1,5 mm.

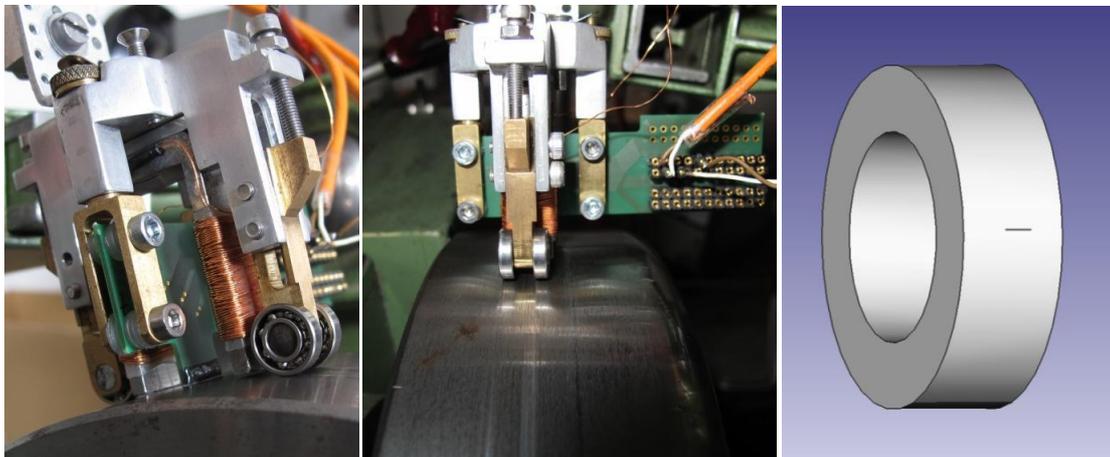


Bild 7: Verschiedene Ansichten des Testaufbaus (links und Mitte); Zeichnung des Prüflings (rechts)

Für verschiedene Geschwindigkeiten zwischen 0,9 m/s und 36 m/s wurden Messungen durchgeführt. Dabei wurde das Sensorsignal mit einem Verstärker um 40 dB verstärkt und mit einem Oszilloskop aufgezeichnet. Wie erwartet wurde das Defekt-Signal (Bild 8) mit zunehmender Geschwindigkeit zeitlich komprimiert. Die Amplitude allerdings erhöhte sich auf etwa das Doppelte.

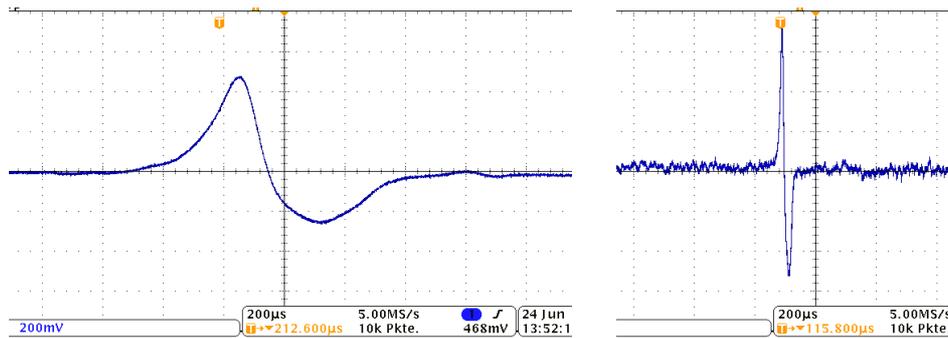


Bild 8: Links Defekt-Signal bei $v = 2,7$ m/s; rechts: $v = 36$ m/s

Tabelle 2 fasst die gemessenen Spannungsamplituden (Spitze-Spitze) bei verschiedenen Geschwindigkeiten zusammen. Die untere Zeile zeigt die Relation zur Messung mit niedriger Geschwindigkeit.

Tabelle 2: Gemessene Defekt-Signalamplituden

Geschwindigkeit [m/s]	0.9	2.7	5.4	10.8	21.6	36
Amplitude [V]	0.63	0.74	0.82	0.98	1.14	1.24
Amplitude [%]	100	117	130	156	181	197

3. Prüfungen mit Wirbelstrom

Zur Einschätzung der Ergebnisse wurden am Blech 3/8 vergleichende Messungen mit Wirbelstrom durchgeführt. Hierbei kamen die in Tabelle 3 zusammengefassten Sensoren mit ihren jeweiligen unteren Betriebsfrequenzen zum Einsatz.

Tabelle 3: Eingesetzte Wirbelstromsensoren

Sensor	Frequenzbereich	Beschreibung
KDS 2-2	100 kHz – 800 kHz	Hochauflösende, hochempfindliche Differenzsonde
AN 05	100 kHz – 500 kHz	hochauflösende Absolutsonde; sehr gute Abbildungseigenschaften
SK 25 TA-1	15 kHz – 100 kHz	Absolutsonde für verdeckte Defekte; mittleres Auflösungsvermögen
SK 35 TA	10 kHz – 80 kHz	Absolutsonde für verdeckte Defekte; mittleres Auflösungsvermögen

Generell lässt sich feststellen, dass keiner dieser Sensoren in der Lage war, die durch die GMR-Sensorik detektierten verdeckten Testfehler nachzuweisen. Dies ist mit der geringen Eindringtiefe in ferritischen Werkstoffen (weniger als $30 \mu\text{m}$ bei $f=100$ kHz) zu erklären. Hochauflösende Sensoren benötigen bauartbedingt i.d.R. höhere Prüffrequenzen. Sensoren für verdeckte Fehler, die auch mit tieferen Frequenzen betrieben werden können, haben i.A. kein ausreichendes Auflösungsvermögen zur Detektion kleinster Fehler.

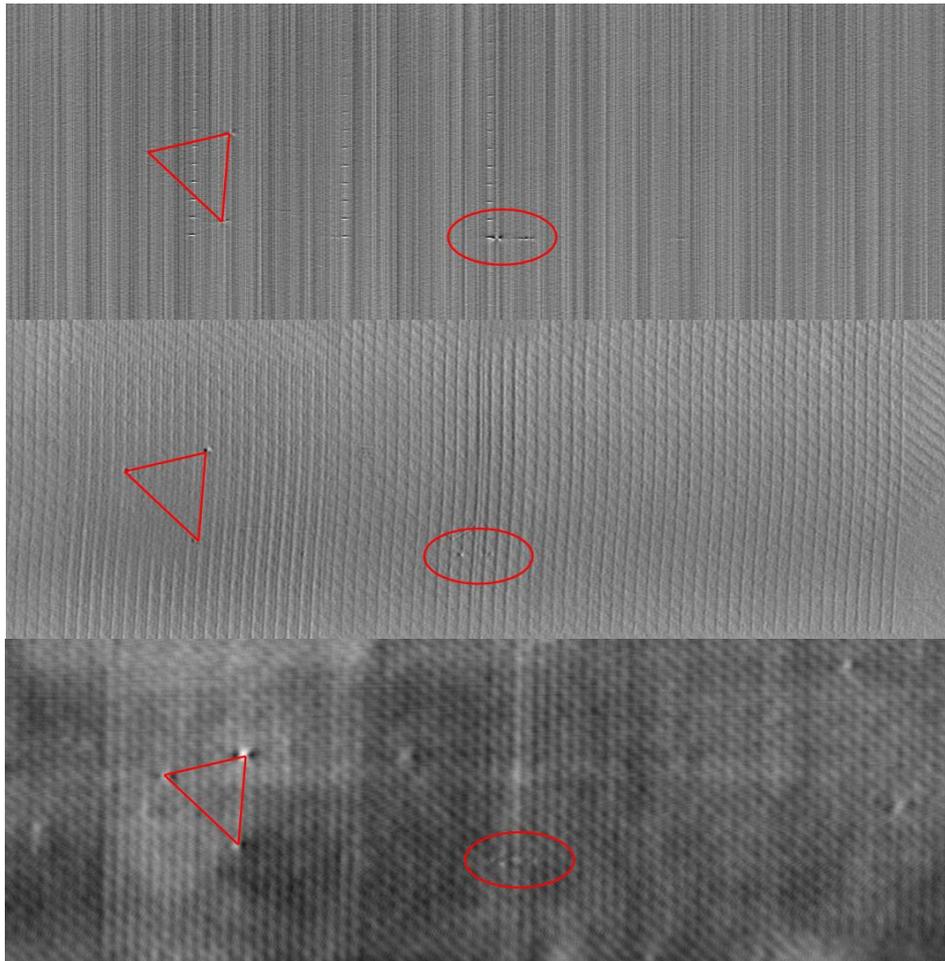


Bild 9: Gegenüberstellung der Prüfergebnisse auf verdeckte Fehler am „Blech 3/8“
 GMR-Streifflussprüfung (oben); Wirbelstromprüfung mit KDS 2-2 (Mitte); SK 35 TA (unten)
 Prüffläche ca. 250 x 90 mm²

In Bild 9 wurden zwei ausgewählte Wirbelstromergebnisse dem entsprechenden GMR-Ergebnis gegenübergestellt. Auffällige Signalsignaturen, die auf natürliche Inhomogenitäten hindeuten, wurden als Referenz für die Prüfbereichsauswahl genutzt und sind rot markiert.

Die in den Wirbelstromergebnissen erkennbaren geometrischen Muster sind auch optisch erkennbar und durch die mechanische Beanspruchung vorhergehender rollengeführter Prüfungen verursacht. Bei einer möglichen praktischen Prüfung sollte deshalb auf eine berührungslose Abtastung geachtet werden.

4. Prüfungen mit Magnetpulver

Für eine weitere Einschätzung der GMR-Prüfergebnisse wurden an der mittleren Testfehlerreihe des Bleches 3/8 vergleichende Prüfungen mit fluoreszierendem Magnetpulver (mittlere Korngröße 4 µm) und schwarzem Magnetpulver (mittlere Korngröße 0,2 µm) durchgeführt. Die Magnetisierung erfolgte mit einem Handmagneten von der Blechseite mit den offenen Fehlern her. Bepölpelt wurde die gegenüberliegende (verdeckte) Seite. Die sichtbaren Anzeigen wurden fotografiert. Bild 10 stellt die Ergebnisse im Maßstab 1:1 gegenüber.

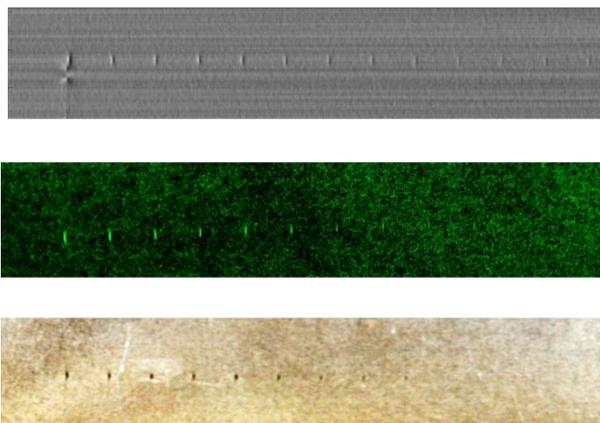


Bild 10: Gegenüberstellung der Prüfergebnisse auf verdeckte Fehler; Maßstab 1:1;
GMR-Streulflussprüfung (oben); fluoreszierendes Magnetpulver (Mitte); schwarzes Magnetpulver (unten)

Visuell waren bei beiden Magnetpulverprüfungen 10 Fehler erkennbar. Das bedeutet, die Nachweisgrenze der Magnetpulverprüfung an diesem Testblech liegt bei einer Restwanddicke von ca. 0,2 mm. Die GMR-Sensorik detektiert bei dieser Testfehlerreihe alle 13 Testfehler (maximale Restwanddicke 0,215 mm; Fehlergrößen von $1300 \times 220 \times 30 \mu\text{m}^3$ bis $900 \times 170 \times 5 \mu\text{m}^3$).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Kleinste Fehlstellen in dünnen ferritischen Blechen konnten mit der GMR-Sensorik im Labor nachgewiesen werden. Die Nachweisgrenze lag hier bei 5% der Materialdicke bei 0,2 mm dicken Blechen. Praktische Prüfbedingungen wie Sensorabstand zur Materialoberfläche, Winkellage des Fehlers und Prüfgeschwindigkeit wurden untersucht und scheinen beherrschbar. Als alternative Prüfverfahren wurden die Wirbelstromprüfung und die Magnetpulverprüfung ausgeschlossen.

Bei den Versuchen festgestellte mögliche natürliche Fehler in den Blechen sind weiter zu untersuchen. Des Weiteren ist die Entwicklung und Erprobung praxistauglicher Sensoren geplant. Hierbei dürften die mechanischen und elektromagnetischen Randbedingungen die größte Herausforderung darstellen. Es besteht auch Prüfbedarf an dickeren Blechen, wozu weitere Untersuchungen anzustellen wären.

6. Referenzen

- [1] Pelkner, M.; Neubauer, A.; Reimund, V. & Kreutzbruck, M.: Routes for GMR-sensor design in non-destructive testing, *Sensors*, **2012**, *12*, 12169-12183
- [2] Pelkner, M.; Neubauer, A.; Reimund, V.; Erthner, T.; Panke, N. & Kreutzbruck, M.: Automatisierte Streulflussprüfung und Bewertung von Zylinderlagerringen unter Anwendung von GMR-Sensorarrays, *DACH-Jahrestagung 2012, Graz (Österreich)*
- [3] Pelkner, M.; Neubauer, A.; Reimund, V. & Kreutzbruck, M.: Local magnetization unit for GMR array based magnetic flux leakage inspection, *QNDE 2011* (Burlington, Vermont), Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, volume **31**, American Institute of Physics, 2012, 1005-1012