

GMR-Streufuss-Prüfsystem zur Detektion verdeckter Fehler in Feiblechen

Rainer POHL¹, Colin COMMANDEUR², Thomas ERTHNER³,
Marc KREUTZBRUCK⁴, Matthias PELKNER³

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

² Tata Steel, IJmuiden, Niederlande

³ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

⁴ Institut für Kunststofftechnik (IKT), Stuttgart

Kurzfassung. BAM und TATA Steel untersuchen gemeinsam, ob sich die Prüfung von ferritischen Feiblechen mit einer Stärke von etwa 0,2 mm während der Fertigung durch den Einsatz von GMR-Sensorik verbessern lässt. Hierzu wurde eine Vorstudie an Feiblechen mit eingebrachten Mikronuten durchgeführt. Diese Nuten variieren in ihrer Tiefe zwischen 5 µm und 60 µm und wurden verdeckt mit ZfP-angepassten GMR-Sensorarrays geprüft. Die Ergebnisse der Vorstudie zeigten, dass bei verdeckter Prüfung schon kleinste Defekte mit einer Tiefe von 10 µm - gleichbedeutend mit einer Restwanddicke von 90 % – mit einem SNR > 6 dB detektiert werden konnten, wobei der Abstand der Prüfsonde zur Oberfläche bis zu 500 µm betrug. Zudem wurden in der Vorstudie Untersuchungen zur Prüfgeschwindigkeit und Praxistauglichkeit durchgeführt.

Basierend auf den hier gewonnenen Ergebnissen wird ein erster Demonstrator für eine zuverlässige Prüfung eines Teilbereiches von 50 mm des Feibleches innerhalb einer Produktionslinie aufgebaut. Zum Einsatz kommen Prüfsonden mit jeweils 24 GMR-Sensorelementen. Hierbei wird das Ziel einer umfassenden Prüfung des Feiblechs über die gesamte Breite von 1200 mm angestrebt. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die hohe Anzahl von mehr als 1000 Sensorelementen dar. Das hierfür entwickelte Prüfkonzept umfasst neben einer angepassten Erzeugung des Magnetfeldes die Entwicklung einer geeigneten schnellen und sicheren Elektronik für die neuen Mehrkanalprüfköpfe. Neben der Vorstellung des Prüfkonzeptes und seiner Eigenschaften vergleichen wir die erzielten Prüfergebnisse an verschiedenen Vergleichsfehlern mit denen der Vorstudie.

1. Aufgabenstellung

Kleinste Einschlüsse in dünnen Stahlblechen können bei der weiteren Bearbeitung dieser Bleche zu Materialfehlern führen. Deshalb war Tata Steel im Jahre 2012 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. Diese Frage konnte im Rahmen einer Vorstudie positiv beantwortet werden. Darüber wurde u.a. auf der DGZfP-Jahrestagung 2014 und der ECNDT 2014 bereits ausführlich berichtet [3,4].

In einem zweiten Schritt sollte nun untersucht werden, ob sich diese Laborergebnisse auch unter praktischen Bedingungen in einer Produktionslinie reproduzierbar erzielen lassen. Hierzu waren geeignete Prüfsonden zu entwickeln, die auch unter den rauen Umweltbedingungen eines Stahlwerkes sicher funktionieren. Weitere



Optimierungsschwerpunkte für die Prüfsonden waren ein möglichst großer Prüfbereich bei einer möglichst geringen Anzahl von Prüfkanälen, eine hohe Prüfempfindlichkeit mit hoher Ortsauflösung sowie geringe Außenabmessungen und eine geringe Masse. Hierbei sollte eine Gehäuseform gefunden werden, die eine Skalierbarkeit mehrerer Prüfsonden zur Prüfung großer Bereiche ermöglicht. Für den angestrebten Demonstrator war eine ausreichende Anzahl Prüfsonden für einen Gesamtprüfbereich von ca. 50 mm fertizustellen.

2. Sensorauswahl

Aus verschiedenen Projekten steht der BAM eine breite Palette ZfP-angepasster GMR-Sensorarrays zur Verfügung. Einen kompletten Überblick über den aktuellen Stand dieser Sensorik findet man unter [5]. Durch den Einsatz von Sensoren mit einer längeren aktiven Fläche konnte die Anzahl der Prüfkanäle bei gleicher Prüfspurbreite halbiert werden. An den untersuchten Testfehlern blieben Ortsauflösung und Prüfempfindlichkeit nahezu gleich. Tabelle 1 stellt einige wesentliche Parameter der genutzten Sensoren gegenüber.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der genutzten GMR-Sensoren

	Vorstudie	Demonstrator
Sensortyp	axiales Gradiometer	axiales Gradiometer
aktive Fläche	1 x 190 μm^2	1 x 390 μm^2
Anzahl der Arrays	3	3
Anzahl der Elemente	16	8
Anzahl der Prüfkanäle	48	24
Prüfspurbreite	10,2 mm	10,2 mm

Durch Einsatz miniaturisierter Steckverbinder gelang es, die räumliche Ausdehnung der Sensorplatinen wesentlich zu verringern. Bild 1 zeigt alte und neue Sensorplatinen im Maßstab 1:1.

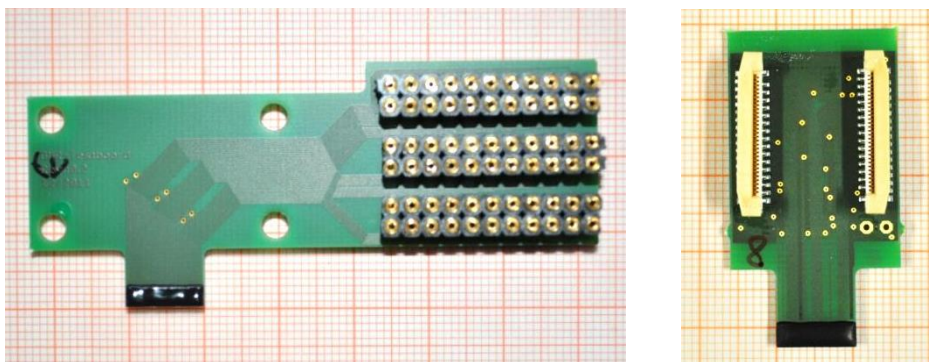


Bild 1: Sensorplatine aus Vorstudie (links) und Demonstrator (rechts)

3. Untersuchungen zum Magnetjoch

In der Vorstudie wurde ein Magnetisierungsjoch mit Elektromagnet eingesetzt. Dieses bietet den Vorteil, dass sich über den Spulenstrom die Magnetisierungsfeldstärke einstellen lässt.

Im Bestreben zur Miniaturisierung der Prüfsonden wurden Untersuchungen zum Einsatz von Permanentmagneten im Magnetisierungsjoch durchgeführt. Neben der Möglichkeit zur Verringerung von Platzbedarf und Masse bieten sich noch die Vorteile der Energieeinsparung, der vereinfachten Herstellung, der reduzierten Wärmeentwicklung in der Prüfsonde sowie der verringerten Anzahl von Anschlussleitungen. Es wurden verschiedene Kombinationen von Permanentmagneten und Jochschenkeln aus ferritischem Stahl aufgebaut und hinsichtlich ihrer Feldverteilung untersucht. Angestrebt wurde eine möglichst gleichmäßige Feldverteilung mit ähnlicher Feldstärke wie bei den Vorversuchen. Bild 2 stellt die Feldverteilung des Joches mit Elektromagneten einem optimierten Joch mit Permanentmagnet gegenüber.

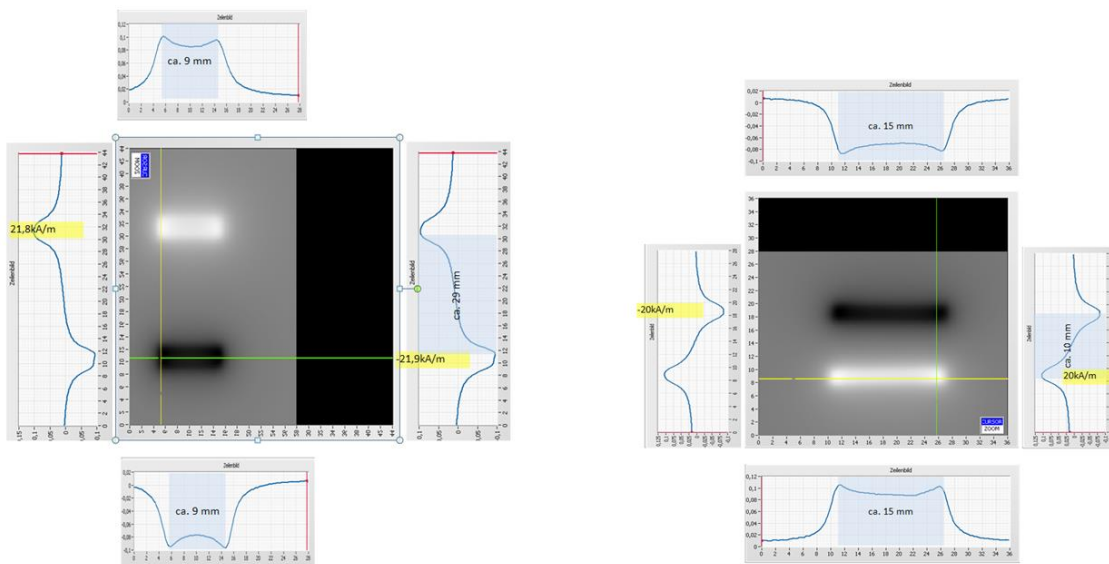


Bild 2: Feldverteilung des Magnetjoches mit Elektromagnet (links) und Permanentmagnet (rechts)

Wenn die Sensoren einmal auf den konkreten Prüffall hin optimiert wurden, sind weitere Variationen der Magnetisierung nicht erforderlich. Die feste Feldstärke bei einem Joch mit Permanentmagnet ist somit kein Nachteil.

Laut den Angaben der Datenblätter der Magnethersteller gibt es keine Alterungserscheinungen bei den eingesetzten Dauermagneten. Ob dies für den angestrebten Anwendungsfall zutrifft, muss durch eine regelmäßige Kontrolle der Prüfempfindlichkeit weiter untersucht werden.

Der Einsatztemperaturbereich von -40°C bis $+85^{\circ}\text{C}$ der verwendeten Magnete entspricht dem der eingesetzten Halbleiterbauelemente.

Beim Einsatz von Permanentmagneten besteht keine Möglichkeit, die Magnete zum Abheben der Prüfsonden vom Prüfobjekt zu deaktivieren. Zur Einschätzung der zum Abheben notwendigen Kräfte wurden Versuche mit den Prototypen der Joche mit einem Abstand von 0,2 mm über einem Stahlblock durchgeführt. Mit Hilfe eines Kraftmessgerätes wurden Haftkräfte von ca. 1 N ermittelt. Diese wurden vom beteiligten Konstrukteur als unbedenklich eingeschätzt.

Da die Vorteile beim Einsatz von Permanentmagneten somit überwiegen, wurde entschieden, für den Demonstrator optimierte Joche mit Permanentmagneten einzusetzen. In Bild 3 werden die mechanischen Kenngrößen der Magnetisierungsjoche aus der Vorstudie denen des Demonstrators gegenübergestellt.

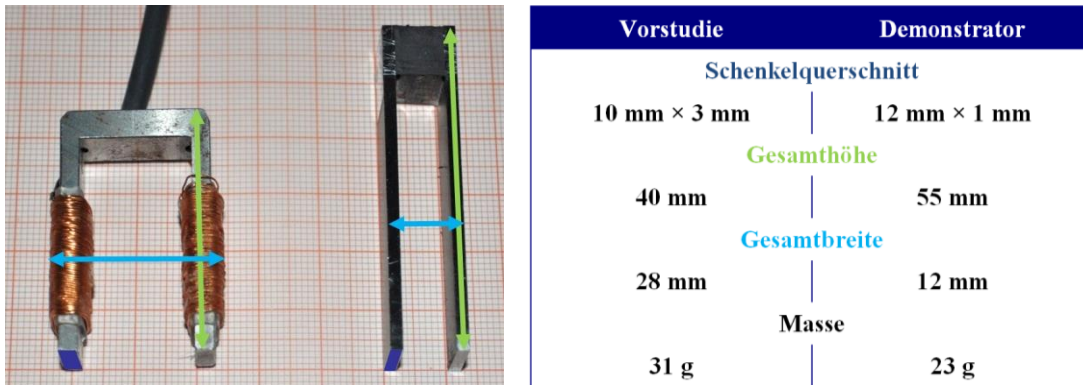


Bild 3: Gegenüberstellung der Magnetisierungsjoche aus Vorstudie und Demonstrator

4. Mechanischer Aufbau

Um den mechanischen Aufbau möglichst einfach zu gestalten und trotzdem eine hohe Präzision zu erreichen, wurde ein Standardgehäuse aus Aluminiumdruckguss mit den präzise gefertigten Einzelteilen Bodenplatte (Edelstahl) und Montageschiene (Messing) kombiniert. Diese drei Teile wurden bei der Montage zusätzlich verklebt, um eine hohe Formstabilität sicherzustellen.

Zur Detektion von Fehlern sowohl in Längs- als auch in Querrichtung mit gleicher Empfindlichkeit wurde das Magnetisierungsjoch mit Sensorzeile um 45° zur Bewegungsrichtung der zu prüfenden Feinbleche gedreht. Hierdurch reduziert sich die Prüfspurbreite auf 7,2 mm. Die äußeren Abmessungen der Gehäuse wurden so gewählt, dass durch eine Skalierung von Prüfsonden eine 100%-Prüfung der gesamten Oberfläche möglich ist. Die Skizze in Bild 4 veranschaulicht diese Skalierung

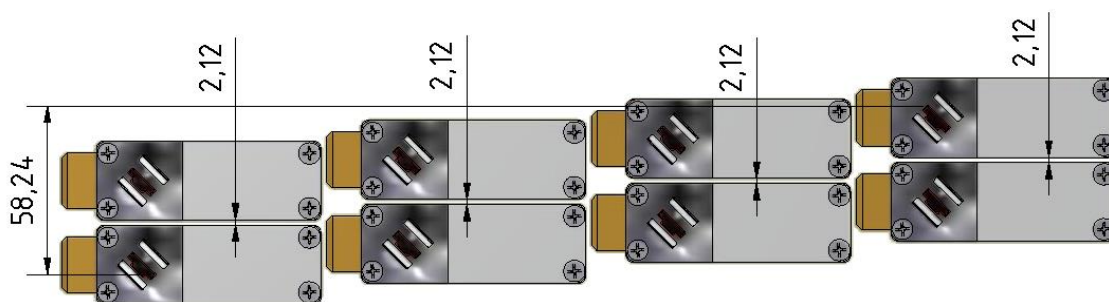


Bild 4: Skalierung der Prüfsonden zur 100% Prüfung

Diese Anordnung an der Produktionslinie zu realisieren ist konstruktiv jedoch sehr aufwendig. Der 50 mm Prüfbereich des Demonstrators wurde deshalb für die ersten Praxistests in sieben räumlich getrennte Prüfspuren aufgeteilt.

5. Elektronikkonzept

Durch Verwirklichung eines modularen Konzeptes wurde für die Entwicklungsphase eine hohe Flexibilität erreicht. Die Prüfsonde besteht hierbei aus den Modulen Sensorarray und Elektronik zur Signalverarbeitung. Auf dem Modul Sensorarray können verschiedene Sensortypen bestückt werden. Für die Module Elektronik zur Signalverarbeitung sind unterschiedliche Schaltungsvarianten möglich. Für die ersten Versuche wurden alle 24 Prüfkanäle einzeln um jeweils 40 dB verstärkt und dann mit Hilfe einer kommerziellen Datenerfassung (NI PXIe 6363 Multifunktion DAQ) einzeln aufgezeichnet und ausgewertet. Bild 5 zeigt die beiden Elektronikmodule und ihre Kombination in der fertigen Prüfsonde.

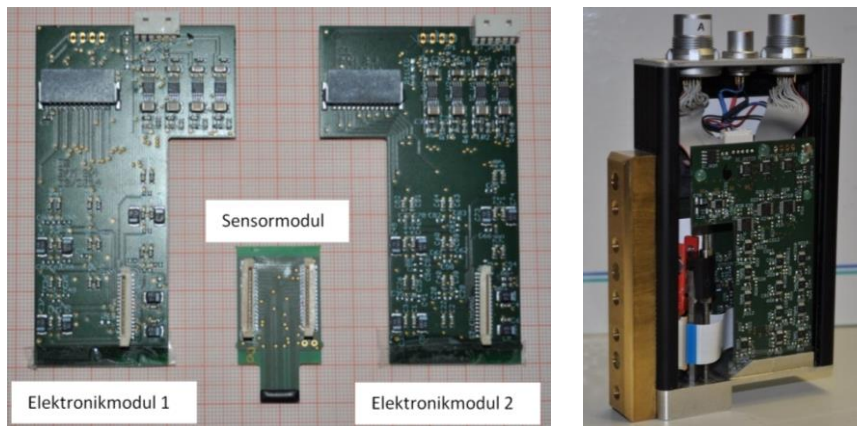


Bild 5: Elektronikmodule (links) und montierte Prüfsonde (rechts).

Mit diesem einfachen Konzept erfolgt die erste praktische Erprobung in der Produktionslinie. Sollten sich die Prüfsonden hier bewähren, ist über die Erweiterung auf den gesamten Prüfbereich nachzudenken. Bei der verwendeten Sensorkonfiguration wären für einen Prüfbereich von 1200 mm 167 Prüfsonden mit einer Gesamtprüfkanalzahl von 4008 notwendig. Sowohl eine solche Vielkanallösung, als auch Kanalreduktion durch Multiplexen oder Datenvorauswertung in der Prüfsonde sind möglich.

6. Erste Ergebnisse / Vergleich mit Vorstudie

Es wurden insgesamt zehn Prüfsonden fertiggestellt, von denen sich sieben zur weiteren Erprobung bei Tata befinden. Vor der Übergabe wurden alle Prüfsonden einem manuellen Funktionstest an einer Reihe verdeckter Testnuten unterzogen. Diese Testnuten befinden sich in einem der von Tata zur Verfügung gestellten Testbleche [3] (Blechdicke 0,2 mm; Nutentiefe 5 μm bis 60 μm). Für den Test werden alle 24 Prüfkanäle zeitgetriggert dargestellt, während der Sensor von Hand über das Blech geführt wird. Somit können sowohl die korrekte Funktion aller Prüfkanäle, als auch die prinzipielle Prüfempfindlichkeit auf einen Blick erkannt werden. Bild 6 stellt das Ergebnis einer funktionstüchtigen Prüfsonde dem Ergebnis einer Sonde mit zehn defekten Kanälen gegenüber.

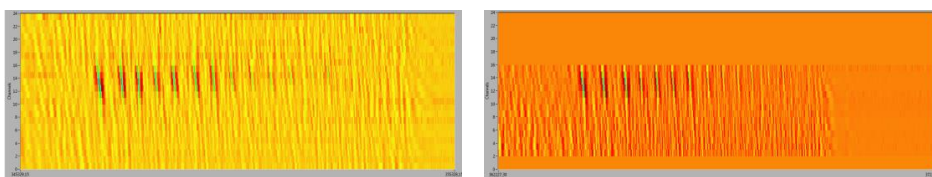


Bild 6: Funktionstest an einer funktionstüchtigen (links) und einer defekten (rechts) Prüfsonde

Vor der Auslieferung der letzten sechs Prüfsonden stand genug Zeit zur Verfügung, um mit diesen umfangreiche Messungen durchzuführen. Hierzu wurde eine flächenhafte Abtastung der Testnutreihe 3 an Blech 3/8 (Fehlergrößen von $1300 \times 220 \times 30 \mu\text{m}^3$ bis $900 \times 170 \times 5 \mu\text{m}^3$) durchgeführt. Diese Reihe eignet sich für vergleichende Messungen besonders gut, da, durch die charakteristische Signalsignatur in der Nähe der größten Nut, Verwechslungen ausgeschlossen sind. Die Prüfsonden wurden schleifend über das, mit einer 0,2 mm dicken Kunststoffolie abgedeckte, Testblech geführt. Der Prüfbereich betrug $110 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$. Der Messpunkt Abstand beträgt 0,09 mm für beide Flächenkoordinaten. Mit Hilfe dieser hochauflösenden Abtastung wurden Kalibrierprotokolle für jeden einzelnen Sensor erstellt. Diese enthalten die Amplitudenwerte an der zweitgrößten (12) und der kleinsten (1) Testnut, einen ausgewählten Störpegel, den daraus ermittelten Signal-Störabstand (SNR Signal to Noise Ratio) für die kleinste Testnut, eine bildhafte Darstellungen der Testnutreihe und einen Linienscan durch alle Testnuten. Bild 7 zeigt einen Ausschnitt aus einem solchen Kalibrierprotokoll und Tabelle 2 fasst die Angaben aus den Kalibrierprotokollen für sechs Prüfsonden zusammen.

Probe No. 2 CH 1 – CH 8

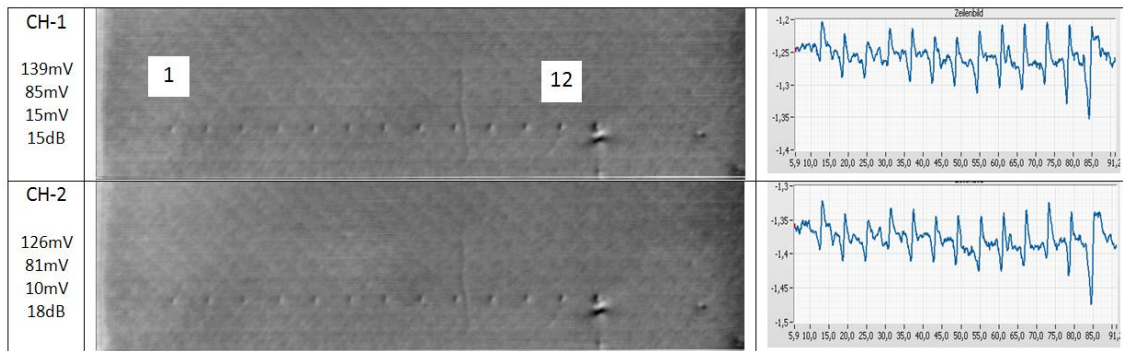


Bild 7: Ausschnitt aus einem Kalibrierprotokoll

Tabelle 2: Zusammenfassung der Kenndaten aller Prüfsonden

NR	U_{pp} an Nut 12	U_{pp} an Nut 1	Störpegel	SNR an Nut 1
2	81 mV – 195 mV	44 mV – 101 mV	10 mV – 41 mV	2 dB – 18 dB
5	91 mV – 195 mV	49 mV – 100 mV	19 mV – 59 mV	4 dB – 12 dB
6	96 mV – 179 mV	40 mV – 104 mV	19 mV – 52 mV	3 dB – 13 dB
8	96 mV – 173 mV	51 mV – 93 mV	17 mV – 64 mV	2 dB – 11 dB
9	73 mV – 125 mV	43 mV – 85 mV	11 mV – 39 mV	3 dB – 12 dB
12	101 mV – 212 mV	48 mV – 97 mV	21 mV – 40 mV	4 dB – 12 dB

In der Tabelle ist zu erkennen, dass die einzelnen Prüfkanäle einer Prüfsonde sowohl in ihrer Empfindlichkeit, als auch in ihrem Störpegel eine große Streuung aufweisen. Die genauen Ursachen hierfür sind noch abzuklären.

In Bild 8 sind Ergebnisse der Vorstudie an Testnutreihe 3 Blech 3/8 den Ergebnissen zweier Einzelsensoren der aktuellen Prüfsonden gegenübergestellt. Ausgewählt wurden hierzu die Sensoren mit der größten (Prüfsonde 12, Sensor 23) und der kleinsten (Prüfsonde 9, Sensor 2) Signalspannung an der Testnut 12. Aus der Vorstudie wurde das bestmögliche Ergebnis mit einem Sensorabstand zur Oberfläche von $100\ \mu\text{m}$ genutzt. Die Messungen mit den neuen Prüfsonden wurden nur mit dem praxisgerechteren Sensorabstand von $200\ \mu\text{m}$ durchgeführt. Der in der Vorstudie genutzte Sensor war bereits auf Feldstärkemessung kalibriert. Bei den aktuellen Messungen wurde auf diese Kalibrierung verzichtet. Die Signale werden hier nur als Spannungen dargestellt.

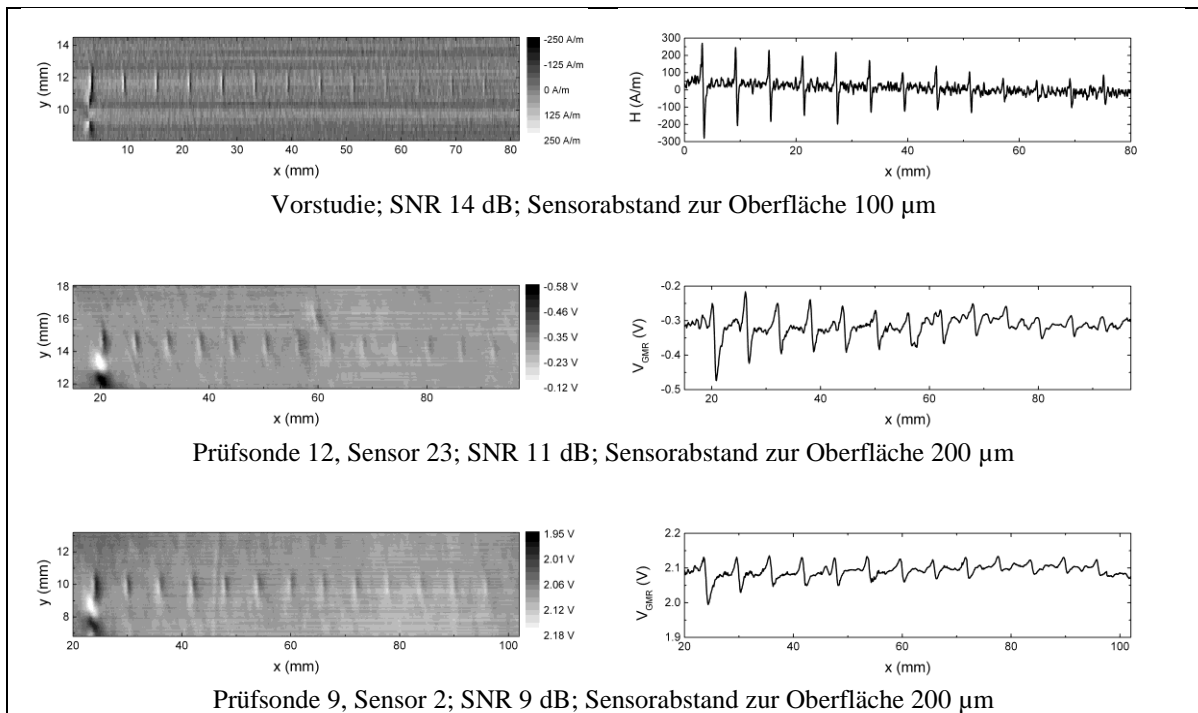


Bild 8: Gegenüberstellung zweier aktueller Prüfsonden zu einem Ergebnis der Vorstudie

Alle 13 Testnuten sind in der bildhaften Darstellung aller drei Prüfungen zu erkennen. In den Linienscans ist das bei den kleineren Signalen nicht immer der Fall. Für die kleinste Testnut wurde der Signal-Störabstand (SNR) angegeben. Dieser wurde bestimmt aus dem maximalen Spitze-Spitze Signal über dem gesamten Nutbereich und dem Spitze-Spitze Störsignal über einen ausgewählten fehlerfreien Bereich mit charakteristischem Störsignal. Die Ermittlung des Störsignales ist mit einem subjektiven Faktor beaufschlagt, ließ sich jedoch aufgrund der stochastischen Verteilung der Störsignale nicht auf einfachem Wege objektivieren. Das Auftreten der Störsignale ist in der bildhaften Darstellung auch als Streifenbildung zu erkennen. Tabelle 2 ist zu entnehmen, dass der SNR für einige Sensoren auch noch wesentlich schlechter ist. Ursache hierfür sind meist ebenfalls Störsignale. Die genaue Ursache für diese Signale muss in weiteren Untersuchungen noch abgeklärt und nach Möglichkeit beseitigt werden.

Als weiterer Unterschied zu den Ergebnissen der Vorversuche ist eine Verbreiterung der Signale erkennbar. Bei den Vorversuchen waren die Sensoren parallel zu den Testnuten ausgerichtet. Das Streufeld wurde somit von der schmalen Sensorbreite von $1\ \mu\text{m}$ erfasst. Durch die 45° Ausrichtung der $390\ \mu\text{m}$ langen Sensoren in den neuen Prüfsonden erfolgt die Streufelderfassung jetzt über eine Länge von etwa $280\ \mu\text{m}$ und erklärt somit die Signalverbreiterung.

In der Detaildarstellung von Testnut 12 im Bild 9 sind die Effekte des Störsignales und der Signalverbreiterung noch deutlicher erkennbar.

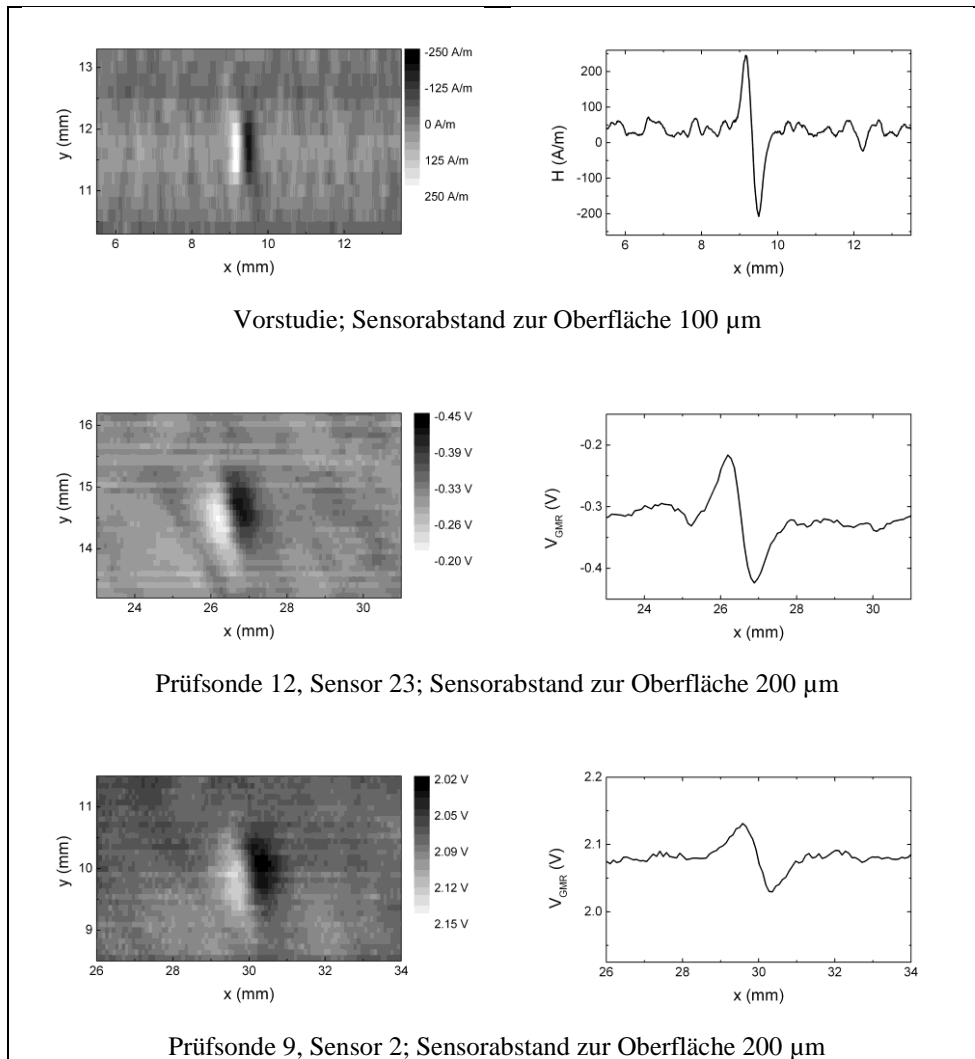


Bild 9: Gegenüberstellung zweier aktueller Prüfsonden zu einem Ergebnis der Vorstudie (Detailansicht)

7. Zusammenfassung und Ausblick

Dem Ziel, kleinste Einschlüsse in dünnen Stahlblechen während der Fertigung zu detektieren, konnte, durch den Aufbau von sieben kompakten Prüfsonden mit GMR-Sensorarrays, ein Schritt näher gekommen werden. Mit diesen sieben Prüfsonden lässt sich ein Gesamtprüfbereich von 50 mm erfassen. Ihre Prüfeempfindlichkeit gegenüber kleinsten Testnuten entspricht den Ergebnissen aus den Vorversuchen. Die Prüfsonden werden demnächst an der Produktionslinie praktisch erprobt.

Nach erfolgreicher praktischer Erprobung sollte an einer weiteren Miniaturisierung und an Strategien zur Gewinnung einer Prüfaussage bei der hohen Prüfkanalzahl gearbeitet werden.

Unabhängig von den Ergebnissen der praktischen Erprobung ist an einer weiteren Untersuchung und Beseitigung der, wahrscheinlich im Sensor selbst erzeugten, Störsignale zu arbeiten.

Untersuchungen zum Fehlstellennachweis bei größeren Blechdicken sind wünschenswert.

6. Referenzen

- [1] Pelkner, M.; Neubauer, A.; Reimund, V. & Kreuzbruck, 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. & Kreuzbruck, M.: Automatisierte Streuflussprüfung und Bewertung von Zylinderlagerringen unter Anwendung von GMR-Sensorarrays, *DACH-Jahrestagung 2012, Graz (Österreich)*
- [3] Pelkner, M.; Commandeur, C.; Erthner, T; Kreuzbruck, M.; Pohl, R.: Detektion verdeckter Defekte in dünnen Stahlblechen mit GMR-Sensoren, *DGZfP-Jahrestagung 2014 (Potsdam), DGZfP-BB 148, Mo.3.B.2, 1-10; ISBN 978-3-940283-61-0*
- [4] Pelkner, M.; Commandeur, C.; Erthner, T; Kreuzbruck, M.; Pohl, R.: Detection of hidden defects in thin steel plates using GMR sensor arrays, *ECNDT 2014 (Prague, Czech Republic), ISBN 978-80-214-5018-9*
- [5] Pelkner, M.: Entwicklung, Untersuchung und Anwendung von GMR-Sensorarrays für die Zerstörungsfreie Prüfung von ferromagnetischen Bauteilen, *BAM-Dissertationsreihe Band 122, Berlin 2014; ISBN 978-3-9816668-0-9*