

Einsatz von neuen Magnetfeldsensoren zur Streuflussprüfung an nahtlosen Stahlrohren

Th. Orth, M. Kaack, Salzgitter Mannesmann Forschung, Duisburg;
S. Nitsche, Ch. Delhaes, Vallourec Mannesmann Tubes, Düsseldorf

Einleitung

Die Streuflussprüfung an ferromagnetischen Stahlrohren hat in der letzten Zeit stark an Bedeutung gewonnen, nicht zuletzt durch den in verschiedenen Aspekten gegebenen Kostenvorteil im Vergleich zur konventionellen Ultraschallprüfung. Vor diesem Hintergrund ist neben dem sicheren Außenfehlernachweis vor allem der Nachweis von Innenfehlern bei größeren Wanddicken wichtig. Die sichere Trennung beider Fehlertypen hat einen großen Stellenwert für die betriebliche Anwendung. Der vorliegende Beitrag zeigt die Anwendung von modernen GMR (**Giant Magneto Resistance**) Sensoren für die Streufluss-Prüfung an Stahlrohren. Mit ihnen sind neue Auswertetechniken möglich, die vorgestellt werden und deren betriebliche Tauglichkeit in ersten Versuchen demonstriert wird.

Ausgangssituation

Gängige Standardregelwerke wie z. B. DNV OS-F101 und Kundenspezifikationen für wärmebehandelte Rohre fordern neben Ultraschallprüfungen ein zweites Verfahren (EMI) für die ZfP Untersuchungen über die gesamte Rohrlänge. Diese Anforderungen werden derzeit im Produktionsablauf im Werk Rath der Vallourec Mannesmann Tubes in folgenden zwei Schritten realisiert:

- Untersuchung der beiden Rohrenden (jeweils bis zu 1,20 m) über die Endenprüfanlage vor den Wirbelfräsen.
- Untersuchung des mittleren Bereichs der Rohre über dem Multiprüfblock.

Der Einsatz der EMI-Technik ist bekanntlich zu größeren Wanddicken aufgrund der abnehmenden Nachweisempfindlichkeit für Innenfehler beschränkt. Durch die Verwendung von GMR-Sensoren sollen die Fehlernachweisbarkeit und Prüfaussage weiter verbessert werden. In diesem Zusammenhang werden neue Auswertestrategien und Signal-Processing Techniken eingesetzt. In einem modernen Anlagendesign werden die Ultraschalltechnik (EMUS) und die Streuflussprüfung zusammengefasst. Im folgenden sind die wichtigsten Eigenschaften des Prüfgutes und der zu beachtenden Randbedingungen zusammengestellt:

Prüfgut:	nahtlose Rohre
Material:	niedrig-, mittel- und hochlegierte C-Stähle
Außendurchmesser:	178 mm - 410 mm
Wanddicke:	5 mm - 50 mm
Rohrtemperatur:	i.d.R. 80 °C
Oberflächenzustand:	frei von losem Zunder
Typische Fehler:	z. B. Ziehriefen, Schalen, Einwalzungen und erhöhte Rauheit

GMR-Sensoren

GMR-Sensoren basieren auf speziellen magnetischen Dünnschichtsystemen, die bei Veränderung eines von außen angelegten magnetischen Feldes eine große Änderung des elektrischen Widerstandes zeigen. Dieser ist messtechnisch einfach zu erfassen. GMR-Sensoren weisen aufgrund ihrer Struktur alle Charakteristiken eines magnetischen Systems wie z.B. Hysterese, magnetische Sättigung und Temperaturabhängigkeit der Magnetisierung auf. Die Sensoren besitzen einige Eigenschaften, die sie für den Einsatz in der ZfP interessant machen:

- hohe Empfindlichkeit
- hohes Signal-Rausch-Verhältnis
- hohe Ortsauflösung
- unabhängig von der Frequenz (DC bis 1 MHz)
- einfache Vorverstärkerelektronik
- kommerziell verfügbar

In den letzten Jahren sind erste Anwendungen im Bereich der Streuflussprüfung [1] und Wirbelstromprüfung [2] erfolgreich realisiert worden. Die Sensoren sind mittlerweile in verschiedenen analogen Verschaltungen erhältlich (Magnetometer, Gradiometer) und können in unterschiedlichen Gehäuseformen bezogen werden.

Lift-Off Korrektur

Die zu untersuchenden Rohre entstammen einem Stopfenwalzprozess, der sich in charakteristischen Wanddickenstrukturen widerspiegelt. Diese Wanddickenprofile führen zu kohärenten Untergrundstrukturen im Streuflusssignal, die sich den zu detektierenden Fehlersignalen überlagern. Bild 1 zeigt einen Streufluss-C-Scan einer einzelnen GMR Magnetometer-Sonde im Vergleich mit einem US-Wanddickenscan, aufgenommen an einem Kontirohr der Abmessung 114,3 x 8,6 mm.

Es ist sehr gut zu erkennen, dass die Wanddickenvariationen mit den Signalvariationen im Streuflusssignal direkt korrelieren. Darüber hinaus führen lokale

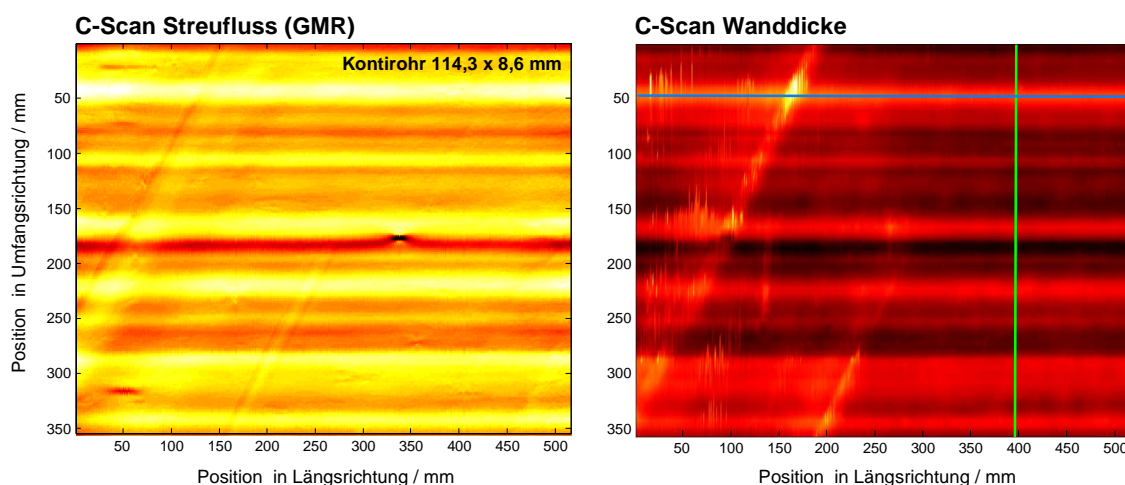


Bild 1: C-Scan-Darstellungen einer GMR-Streuflussmessung und einer Wanddicken-Messung mit US-Senkrechteinschallung.

strukturelle Inhomogenitäten sowohl zu einer Fehlinterpretation des Wanddickenscans (Veränderung der Schallgeschwindigkeit), als auch zu einem Streufluss-Signal (magnetische Inhomogenitäten). Diese Untergrundstrukturen müssen bei der Streuflussprüfung an Stopfenstrassenrohren berücksichtigt werden, da deren Signalamplituden mit den zu erwartenden Fehleramplituden vergleichbar sind und somit eine automatisierte Fehlerdetektion mit Schwellenüberschreitung unmöglich wird. Ein gängiger Lösungsansatz, der in kommerziellen Streuflussanlagen realisiert wird, besteht in der Verwendung von lokalen Differenztechniken, bei denen zwei oder mehrere Einzelsonden (für die Längsfehlerprüfung in Längsrichtung des Rohres oder in leichter Schräglage) miteinander verglichen werden. Durch diese Vorgehensweise können sowohl gewisse Rauschanteile im Streuflusssignal, als auch kohärente Untergrundstrukturen kompensiert werden. Auf der anderen Seite wird dieser Vorteil mit dem Ausblenden bestimmter Fehlersymmetrien erkauft. So können Längsfehler nur noch beim Ein- und Auslauf detektiert werden, sofern die Fehlerein- und Ausläufe nicht zu flach erfolgen. In einem solchen Fall wird durch die lokale Differenztechnik gegebenenfalls überhaupt kein Fehler detektiert.

Die hohe Empfindlichkeit und das geringe Rauschen von GMR-Sensoren machen einen weiteren Lösungsansatz zur Untergrundkorrektur möglich, der den Nachteil des Ausblendens bestimmter Fehlersymmetrien nicht aufweist (Bild 2).

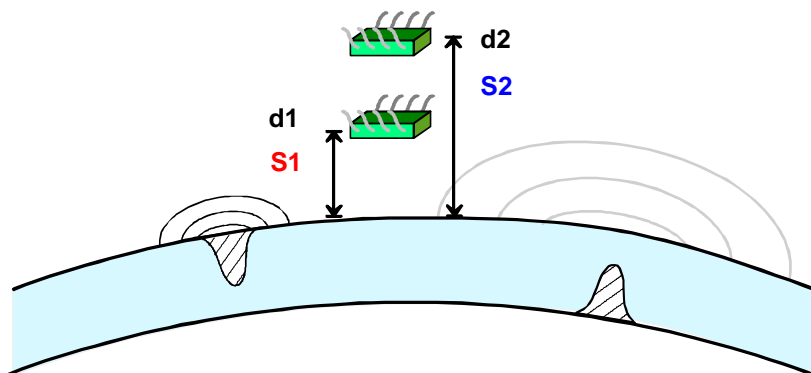


Bild 2: Prinzip der Anordnung der GMR-Sensoren.

Realisiert wird dieses Verfahren mit zwei GMR-Sonden, die im Abstand d_1 und d_2 von der Rohroberfläche übereinander montiert sind. Durch das gute Signal-Rauschverhältnis der GMR-Sensoren liefert auch die Sonde 2 bei einem gegenseitigen Abstand von mehreren Millimetern ein quasi rauschfreies Signal, das zur weiteren Auswertung verwendet werden kann.

Durch die unterschiedliche Abstandsabhängigkeit der magnetischen Streufelder von Wanddickenvariationen und zu detektierenden Fehlern korrigiert eine gewichtete mathematische Differenz beider Sondensignale wirkungsvoll das Untergrundsignal, ohne das Fehlersignal zu unterdrücken. Anders als bei anderen Techniken bleibt dabei die Absolutsondencharakteristik der Gesamt-Sonde erhalten. In Bild 3 sind zwei Streufluss-Umfangsscans für zwei verschiedene Vertikalabstände der Sonde dargestellt. An einer Umfangsposition des Rohres befindet sich ein natürlicher Innenfehler. Skaliert man das Signal der Sonde 2 mit dem im

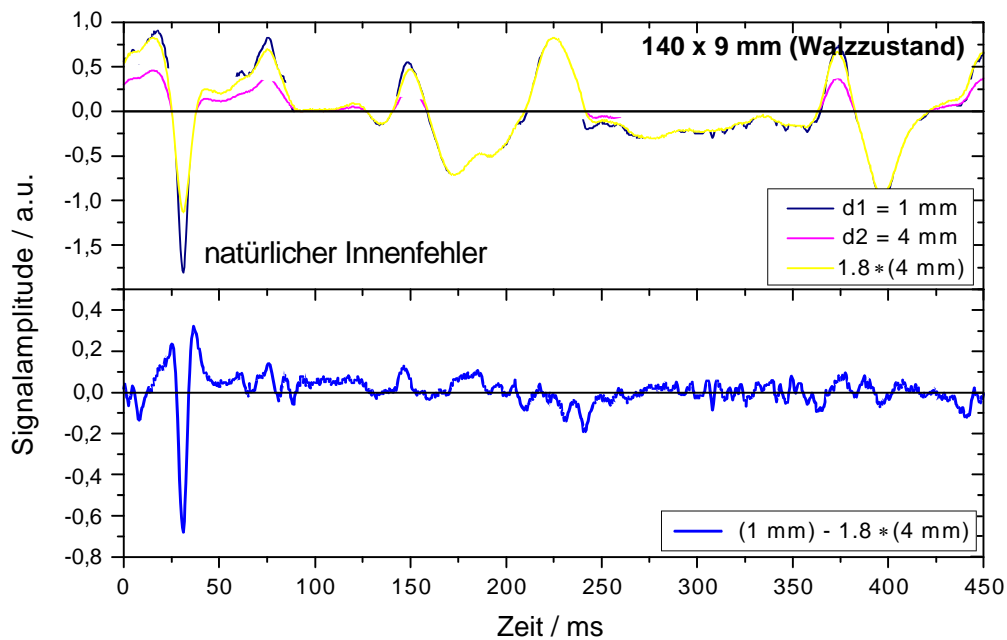


Bild 3: Unterdrückung des kohärenten Untergrundes durch das Verfahren der gewichteten Differenz.

Bild angegebenen Faktor so ergibt sich der gelbe Kurvenverlauf. Es wird deutlich, dass die kohärente Untergrundstruktur fast vollständig wiedergegeben wird, das Fehlersignal zeigt aber ein anderes Verhalten. Dies gilt für Innen- als auch für Außenfehler. Eine Differenzbildung der so gewichteten Signale liefert die blaue Kurve im unteren Teil des Diagramms, welche schon jetzt ohne jegliche Filtertechniken ein automatisierbar zu detektierendes Fehlersignal mit verbessertem Nutz-Stör-Abstand aufweist.

Diese Technik ist in dieser Form nur mit GMR-Sensoren (neben SQUID und anderen Spezial-Sensoren, die für diese Anwendung wirtschaftlich nicht in Frage kommen) möglich. Induktionsspulen und selbst Hall-Sensoren konventioneller Bauart würden keine ausreichende Signalgüte für die Sonde 2 liefern.

Innen-Außenfehler Trennung

Der Nachweis der Abstands-Charakteristik mit den beiden übereinander liegenden Sonden erlaubt neben der Untergrund-Unterdrückung auch die Trennung von Innen- und Außenfehlern, da diese ebenfalls unterschiedliche Abstands-Charakteristiken haben.

Die unterschiedliche Abstands-Charakteristik von Innen- und Außenfehlern wird in Bild 4 deutlich. Normiert man jeweils im Bereich des Fehlers (zwischen den grünen Linien) beide Sonden-Signale auf das Minimum des Signals der unteren Sonde (blaue Kurve), so lässt sich das Verhältnis der Signale leicht ablesen. Es ergibt sich

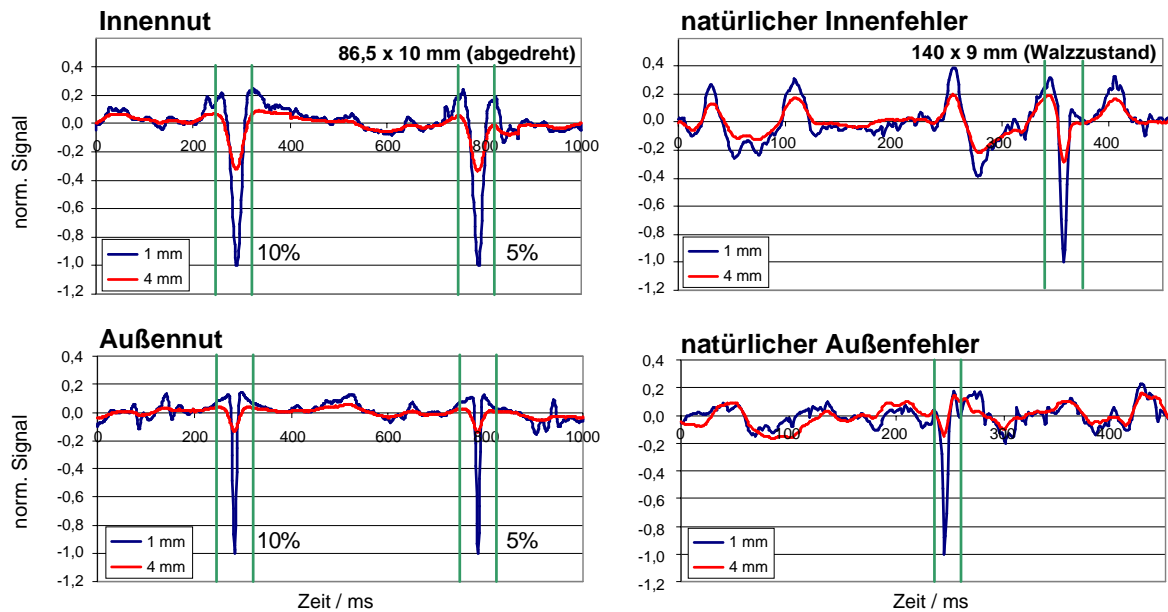


Bild 4: Streufluss-Signale von unterschiedlich tiefen Innen- und Außenfehlern von zwei übereinander liegenden Sonden. Die Signale sind nur zwischen den grünen Linien jeweils auf den Wert der unteren Sonde normiert.

$$\frac{\text{Signal (4 mm)}}{\text{Signal (1 mm)}} \approx \begin{cases} 0,15 \text{ für Außenfehler} \\ 0,30 \text{ für Innenfehler} \end{cases}$$

für zwei Sonden im Abstand von 1 mm bzw. 4 mm von der Rohroberfläche. Berücksichtigt man eine gewisse Streubreite dieser Verhältniswerte, so kann diese Technik zur Innen-Außenfehlertrennung herangezogen werden. In der betrieblichen Praxis wird diese Information mit weiteren Kennwerten ergänzt, um die Trennungssicherheit zu erhöhen.

Erste Betriebsergebnisse

Die entwickelten Techniken wurden unter betrieblichen Bedingungen überprüft. Bild 5 zeigt die Signale von Innen- und Außennuten der beiden übereinander liegenden Sonden sowie das Ergebnis der Lift-Off Korrektur. In diesem Fall beträgt der gegenseitige Abstand der Sonden 1,5 mm. Schließlich ergibt ein nachgeschalteter Hochpass-Filter nur noch eine geringfügige Signalverbesserung. Bild 6 zeigt die Ergebnisse von Messungen mit Magnetometer- und Gradiometer-Sonden in horizontaler und vertikaler Ausrichtung. Diese Daten können verwendet werden, um bei der Innen-Außenfehlertrennung die Zuverlässigkeit zu verbessern.

Die Bilder 7 und 8 zeigen äquivalente Messungen für eine 1,6- und 3,2-mm Durchgangsbohrung.

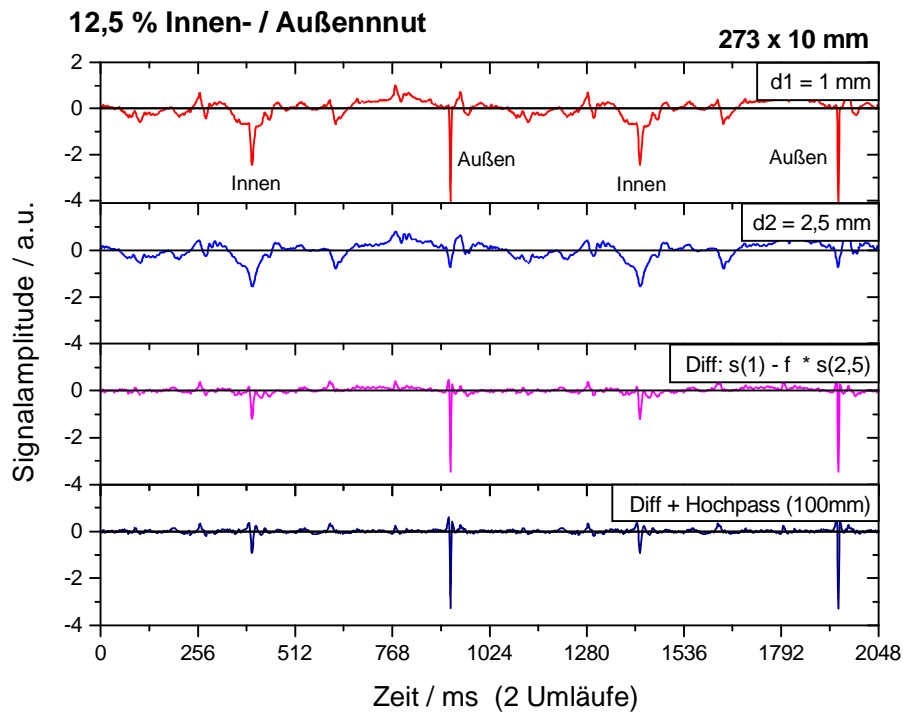


Bild 5: Streufluss-Signale aufgenommen unter betrieblichen Bedingungen von Innen- und Außenfehlern von zwei übereinander liegenden Sonden.

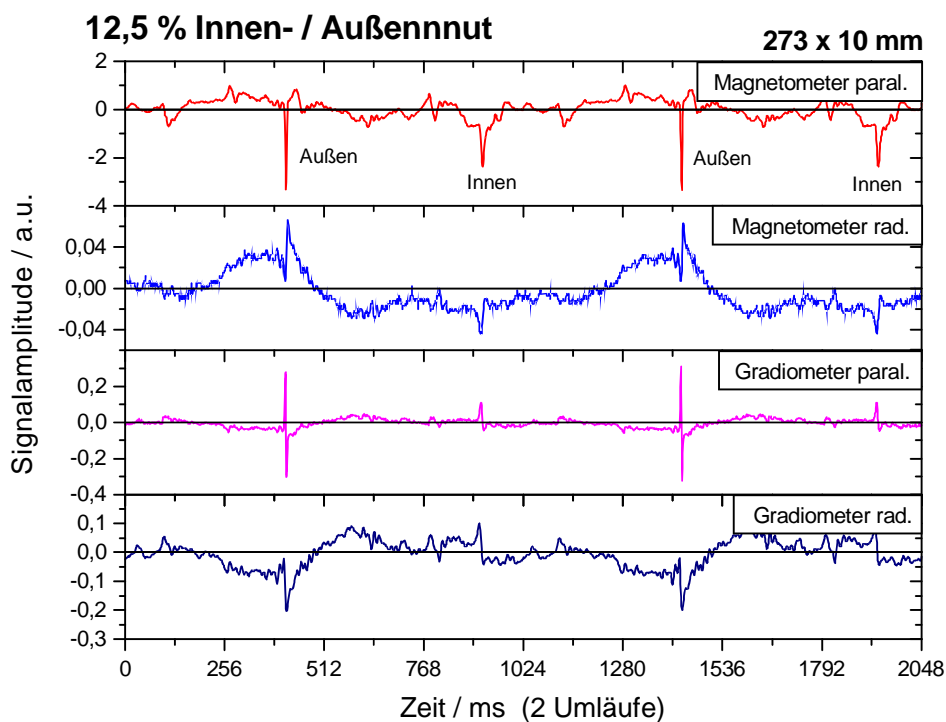


Bild 6: Streufluss-Signale von Innen- und Außenfehlern von Magnetometer- und Gradiometer-Sonden jeweils in horizontaler und vertikaler Ausrichtung.

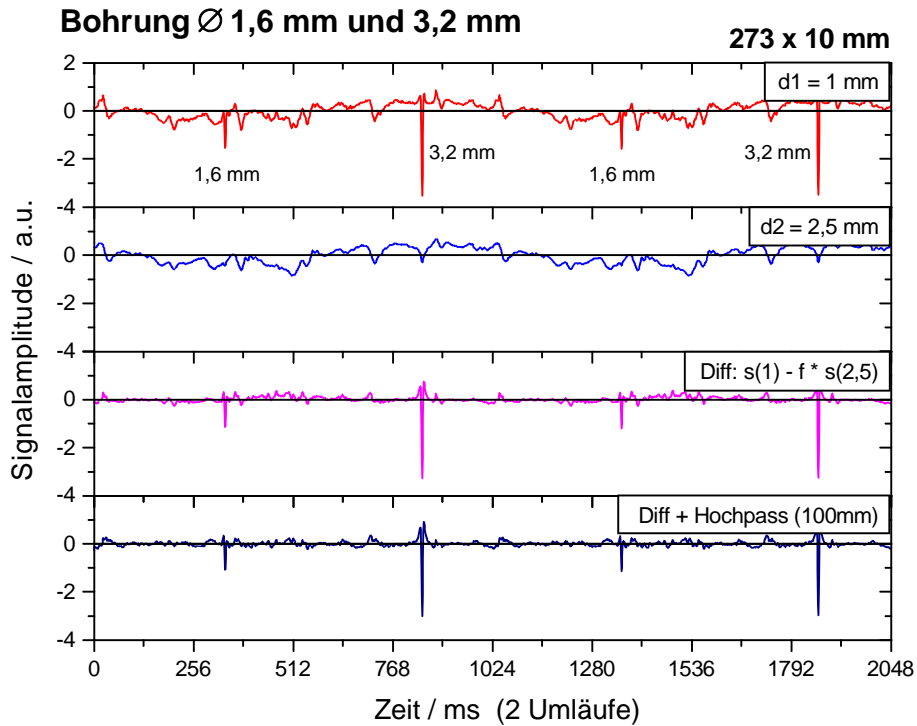


Bild 7: Streufluss-Signale aufgenommen unter betrieblichen Bedingungen von Durchgangsbohrungen von zwei übereinander liegenden Sonden.

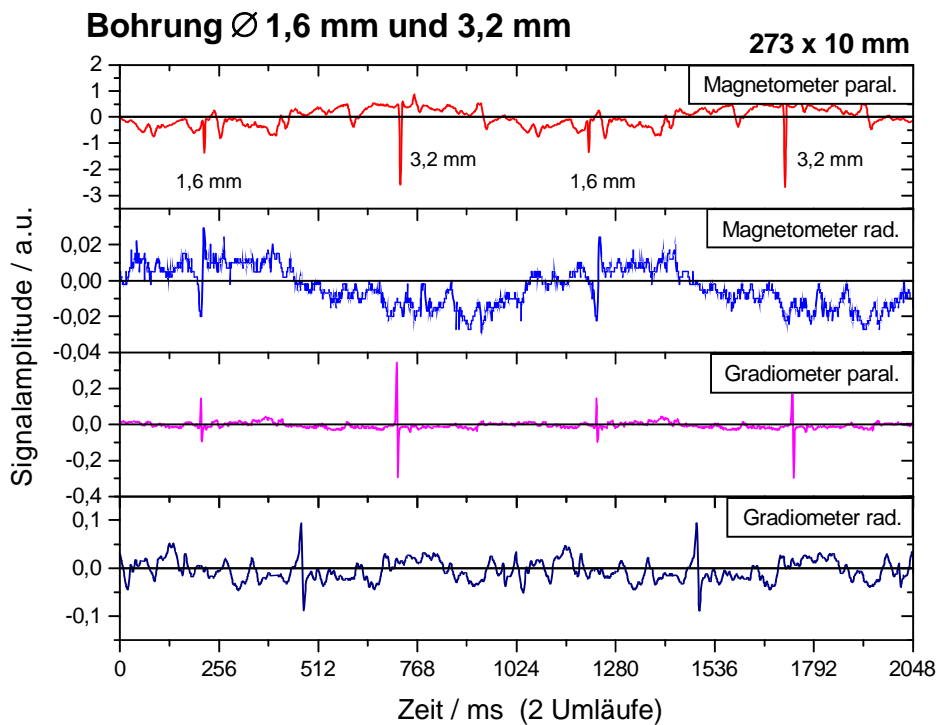


Bild 8: Streufluss-Signale von Durchgangsbohrungen von Magnetometer- und Gradiometer-Sonden jeweils in horizontaler und vertikaler Ausrichtung.

Durch die vorgestellten Techniken konnten für alle Fehlertypen die Signalqualitäten deutlich verbessert werden. Auch die Trennung von Innen- und Außenfehlern war möglich.

Nachweis weiterer Fehlertypen

Mit den entwickelten Sonden- und Auswertetechniken ließen sich in Versuchen auch solche Fehlertypen nachweisen, die wegen ungünstiger Magnetisierungsbedingungen oder schwach ausgeprägter Kanten häufig nur eine geringe Nachweisempfindlichkeit haben.

Bild 9 zeigt eine C-Bild Darstellung von Streufluss-Messungen an einem Rohr mit langen Nuten, die in Rohrlängsrichtung sowie unter Winkeln von 15°, 30° und 45° eingebracht sind. Da die Magnetisierung des Rohres in Umfangsrichtung erfolgte, nimmt die Nachweisempfindlichkeit der Testfehler mit zunehmender Schräglage durch die abnehmende Magnetisierungskomponente quer zur Nut ab. Sie lässt sich steigern, indem man für eine spezielle Schrägfehlerprüfung die Sonden ebenfalls verdreht.

Bild 10 zeigt die C-Bild Darstellung einer Einwalzung, die sowohl rund als auch lang gestreckt sein kann und häufig flach einlaufende Kanten aufweist. Hier liefert die konventionelle Methode der lokalen Differenzbildung nur sehr kleine und zum Teil nicht nachweisbare Anzeigen. Durch die Absolutsondencharakteristik lässt sich hier der Fehler deutlich über die ganze Länge statt nur im Ein- und Auslauf beobachten.

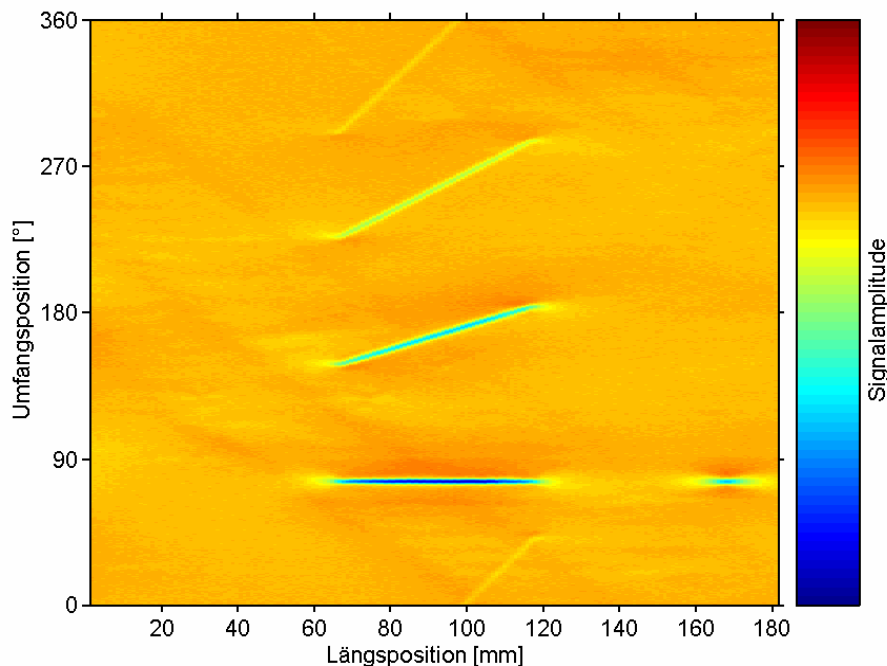


Bild 9: GMR-Streufluss-Signale von Nuten mit Ausrichtungen zwischen 0° und 45° zur Achsrichtung (Schrägfehler).

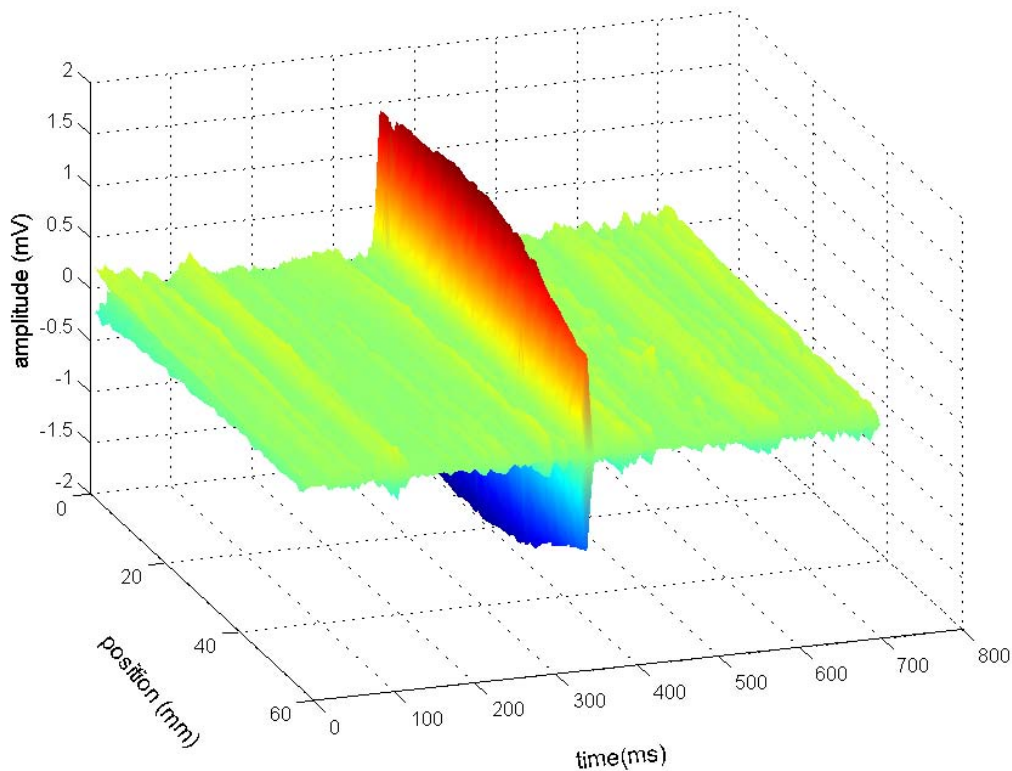


Bild 10: GMR-Streufuss-Signale von einer Einwalzung. Dieser Fehlertyp läuft häufig flach ein und hat keine scharfen Kanten.

Zusammenfassung

Der Einsatz von GMR-Sensoren mit all ihren Vorteilen gegenüber den klassischen Streufussensoren wie Induktionsspulen oder Hallsensoren macht neue interessante Ansätze zur Primär-Signalauswertung möglich. Für den vorliegenden Anwendungsfall konnte mit der GMR Lift-Off-Technik ein verbesserter Nutz-Stör-Abstand erzielt werden, ohne lokale Differenz-Techniken zu benutzen. Neue Ansätze zur Trennung von Innen- und Aussenfehlern wurden erprobt und zeigten in betrieblichen Versuchen positive Ergebnisse. Moderne, nachgeschaltete Signal-Processing-Techniken können auf der Basis der erzielbaren Signalgüte weitere Verbesserungen bringen. Eine Streufuss-Pilotanlage mit der neuen Technik, kombiniert mit einer modernen EMUS-Wanddicken- und Dopplungsprüfung wird momentan in der Stopfenstrasse der Vallourec Mannesmann Tubes in Düsseldorf-Rath realisiert.

[1] A. Yashan, R. Becker, A. Klein, 'Detection of Small Inclusions in Thin Steel Sheets by Magnetic Flux Leakage Technique', 8th European Conference on Non-Destructive Testing, Barcelona, 17.-21.06.2002

[2] B. Wincheski, M. Namkung, 'Deep Flaw Detection with GMR based Self-Nulling Probe', Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 19A, AIP,465, 2000