

Online-Inspektionssystem IDS Inclusion Detection System (IDS)

IMS ermöglicht Früherkennung von inneren Einschlüssen

Die exakte Führung von Produktionsprozessen bei der Herstellung von Bandstahl und Flachprodukten ist entscheidend für die Erzeugung qualitativ hochwertiger Produkte mit homogenen Eigenschaften über die gesamte Länge. Zum Nachweis ist es erforderlich, diverse Materialkenngrößen über die gesamte Länge und nicht nur punktuell an den Enden zu bestimmen. Es sind berührungslose und zerstörungsfreie Prüfmethoden notwendig, denn Einschlüsse in kaltgewalztem Bandstahl bergen ein großes Gefahrenpotenzial für die Weiterverarbeitung mit hohen Verformungsgraden.

Bei der Stahlherstellung und dem anschließenden Gießprozess gelangen während des metallurgischen Prozesses Einschlüsse in die Schmelze. Ein Teil dieser nichtmetallischen Partikel verbleibt in den Produkten. Die Menge, Teilchengröße und räumliche Verteilung der Einschlüsse definieren den Reinheitsgrad des Stahls.

Nichtmetallische Einschlüsse in Flachstahlprodukten können in Weiterverarbeitungsprozessen, wie etwa beim Umformen, zu Schädigungen des zu fertigenden Produktes beziehungsweise der Werkzeuge führen.

Im Kaltbandbereich haben selbst kleinste Reinheitsgradfehler beziehungsweise Einschlüsse negative Auswirkungen. Tritt der Einschluss nicht an die Materialoberfläche, ist eine Detektion durch optische Systeme nicht möglich. Die relative magnetische Permeabilität solcher Einschlüsse ist deutlich geringer als die des umgebenden Materials. Daher kann eine Erkennung mittels magnetischem Streufluss erfolgen. Das geprüfte Material wird magnetisiert, wobei bei einer homogenen Struktur auch das Magnetfeld an dessen Oberfläche homogen ist. **(Bild 1)**

Gibt es im Material, lokale Bereiche mit deutlich niedriger Permeabilität, etwa durch nicht metallische Einflüsse, Risse und Eindrücke an der Oberfläche, steigt an dieser Stelle der magnetische Widerstand. Ein Teil des magnetischen Flusses wird so an die Materialoberfläche gedrängt. Durch die Differenz zwischen der relativen Permeabilität des Materials und der umgebenden Luft kommt es zu ausgeprägter magneti-

scher Brechung. Die Ausdehnung des aus der Materialoberfläche austretenden Streufelds ist daher deutlich größer als der ursächliche Defekt, was die Detektion ermöglicht.

Entwicklung eines IDS-Messsystems

Das entwickelte Streufluss-Detektionssystem für innere Einschlüsse bietet die Funktionalität einer vollständigen Streuflussprüfung im laufenden Produktionsbetrieb. Zur Magnetisierung des Materials werden Elektromagneten eingesetzt. Diese lassen sich in ihrer Leistung an die Beschaffenheit, Struktur und Geometrie des inspizierten Materials anpassen sowie zu Wartungs- und Reinigungszwecken abschalten. Die Detektion der Streufelder geschieht mittels GMR-Differenzsensoren (Gradiometer), die in Form einer wheatstoneschen Messbrücke verschaltet sind. Je zwei der vier Sensoren sind räumlich zusammengefasst. In Abhängigkeit von der Differenz der magnetischen Feldstärke zwischen den beiden empfindlichen Bereichen wird ein Differenzsignal gebildet. Die empfindlichen Bereiche der verwendeten Sensoren besitzen einen Mittenabstand von 1 mm.

Der Einsatz von Gradiometern ermöglicht eine im Vergleich zu absoluten Sensoren (Magnetometern) deutliche höhere Verstärkung, da externe Felder keinen Einfluss auf das Sensorsignal haben. Dadurch können besonders kleine lokale Magnetfeldinhomogenitäten detektiert werden.

Im IDS-Messsystem wird eine Magnetisierung quer zur Walzrichtung eingesetzt. Die Wahl der Magnetisierungsrichtung beruht auf Labormessungen mit künstlichen Fehlern. Als solche wurden Durchgangslöcher unterschiedlicher Durchmesser sowie Nuten mit einer Länge von 1 mm, einer Breite von 100 µm und variabler Tiefe definiert. Die im Kaltband auftretende inneren Einschlüsse nehmen durch die starke Verformung normalerweise längliche Formen an. Somit entsprechen Nuten am ehesten den tatsächlich auftretenden Fehlern. Für Nuten konnte mit einer Magnetisierung quer zur Walzrichtung deutlich bessere Signal-zu-Rausch-Verhältnisse erzielt werden. Dies lässt sich leicht durch den in dieser Richtung größeren Defektquerschnitt erklären. Eine Magnetisierung im 45°-Winkel zur Walzrichtung stellt keinen Kompromiss dar, da diese das Signal-zur-Rausch-Verhältnis für kompakte Fehler im Vergleich zur parallelen Magnetisierung verschlechtert, ohne dass es zu einer Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses für längliche Fehler kommt.

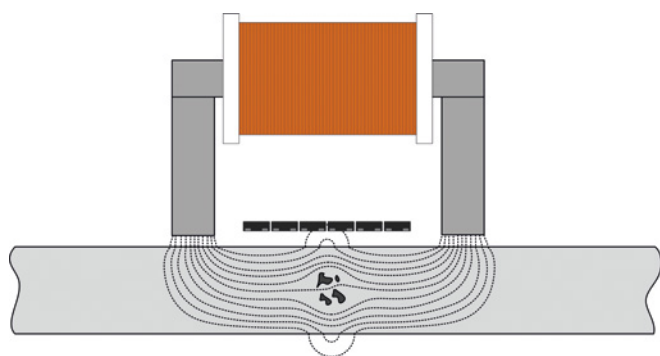


Bild 1: Schematische Abbildung des magnetischen Feldverlaufs bei einem inneren Einschluss (Quelle: IMS)

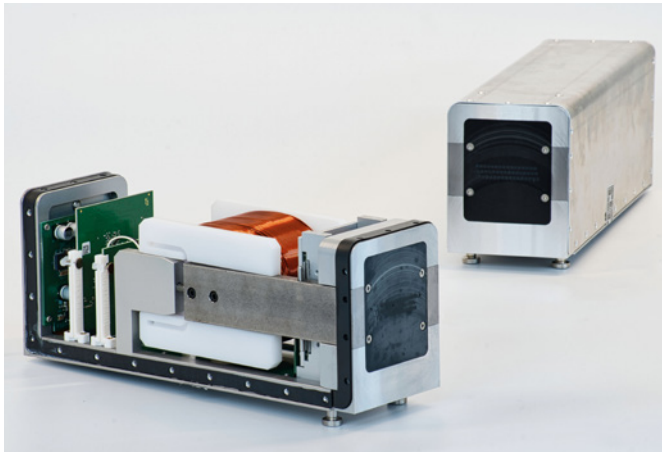


Bild 2: Sensormodul (Quelle: IMS)

Bei einer Magnetisierung quer zur Walzrichtung ist die maximale Jochweite des Magneten begrenzt. Aufgrund einer geeigneten Magnetfeldhomogenität wurde die Jochweite so gewählt, dass ein jeweils 48 mm breiter Bereich gemessen wird. Folglich sind mehrere Magnete notwendig, um die unterschiedlichen Materialbreiten abzudecken. Da im Bereich der Polschuhe der Magnete keine Messung möglich ist, werden die Sensormodule für eine lückenlose Abdeckung in zwei Reihen angeordnet.

Mit steigendem Abstand findet ausgehend vom minimalen Luftspalt von 200 µm ein annähernd linearer Abfall von etwa 1 dB / 100 µm zusätzlichem Luftspalt statt. In der Praxis ist für diese Anwendung und Auflösung ein Luftspalt von 700 µm ausreichend.

Aufbau des Sensorblocks

Je ein Magnet sowie die sich darin befindliche Sensorzeile wurde zu einem kompakten Sensormodul zusammengefasst. Eine einfache Wartung, Reparatur und Skalierbarkeit des Messsystems sind somit garantiert. (Bild 2)

Als wesentliche Komponenten beinhaltet ein Modul die Sensoren, die Verstärkung und Filterung der Sensorsignale, AD-Wandler sowie die Ansteuerung des Elektromagneten und stabilisierte Spannungsversorgungen. Die reproduzierbare und schnelle Installation der Sensormodule am Messsystem findet über Schnellspanner in Verbindung mit Passschrauben statt. Eine mechanische Justage ist nicht erforderlich. Die

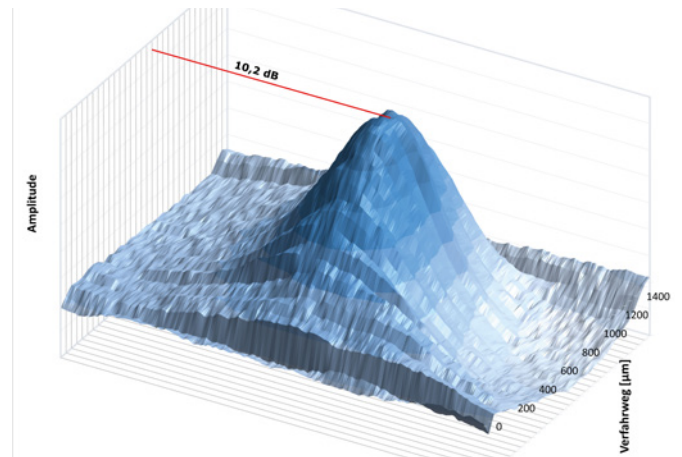


Bild 3: Signalamplitude einer 1mm x 100µm x 30µm Nut in Abhängigkeit von deren Position (Quelle: IMS)

GMR-Sensoren sind innerhalb eines schützenden und stabilisierenden Aluminiumrahmens zu einem Sensorblock vergossen. Das erschwert das Anhaften von Schmutz und bietet Schutz vor mechanischer Beschädigung.

Die Sensormodule entsprechen der Schutzart IP 64, was den direkten Einsatz in rauer Umgebung ermöglicht. Ein Sensormodul besitzt eine äußere Breite von 95 mm, wodurch eine lückenlose Abdeckung des Materials mit zwei Sensormodulzeilen erreicht wird. Jedes Sensormodul beinhaltet in der Mitte des Magneten 48 GMR-Differenzsensoren. Der Abstand der Sensoren quer zur Walzrichtung beträgt 1 mm.

Dies ist vorteilhaft, da auch die Größe der Streufelder kleinster Defekte über 1 mm liegt. In Bild 3 zeigt die Signalamplitude einer 1 mm langen, 100 µm breiten und 30 µm tiefen Nut. Die von einem Sensor detektierten Defekte werden über die Signalamplitude ermittelt.

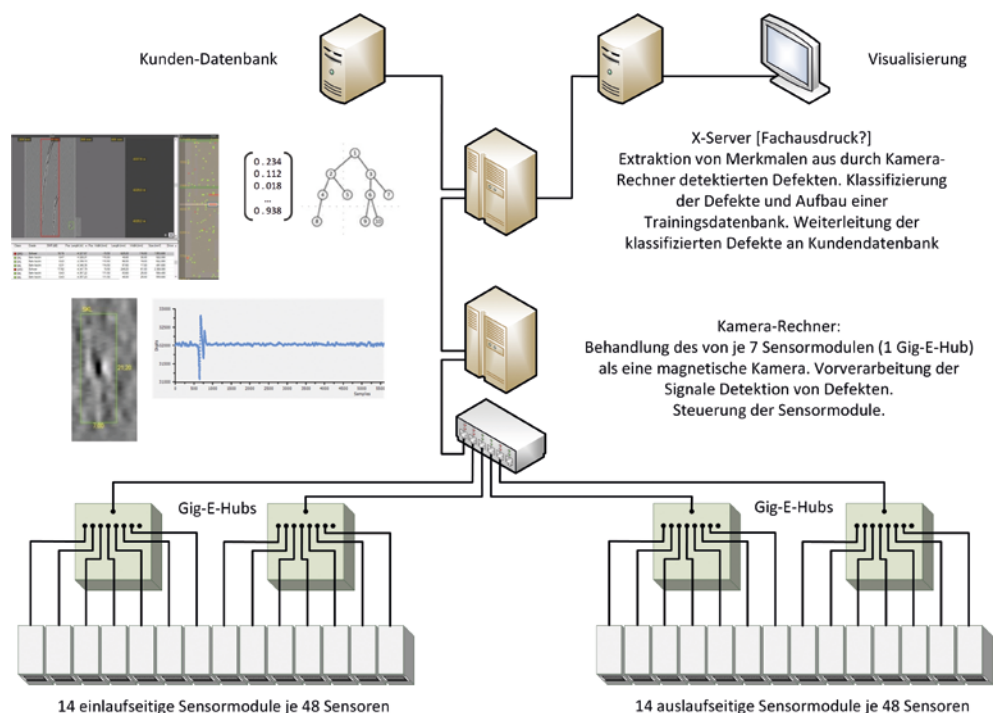


Bild 4: Signalverarbeitung (Quelle: IMS)

Tabelle 1

Produktdaten	
Banddicke	0,1-0,6 mm (max. 1 mm)
Bandbreite	600-1250 mm Messbreite 1344 mm)
Bandgeschwindigkeit	max. 1000 mm/min bei voller Auflösung
Messabstand	> 0,5 mm
Messgenauigkeit	
Defektierbare Fehlergröße (Ersatzfehler)	Loch: 70 µm, Nut: 10 µm Tiefe, 100 µm Breite, 1000 µm Länge in 250 µm starkem Band Minimale Fehlergröße muss je nach Anwendung bestimmt werden
Abstandseinfluss	1 dB / 100 µm
Reproduzierbarkeit	> 98 %

Das Gesamtsystem ist hierarchisch aufgebaut: Die einzelnen Ebenen arbeiten aufgabenorientiert und sind über schnelle Netzwerktechnik miteinander verbunden. Die Sensorsignale werden Analog-Digital mit einer Abtastrate von bis zu 187,5 kHz bei einer Auflösung von 15 Bit gewandelt. Es erfolgt eine längenabhängige Abtastung mit einer konstanten Längsauflösung (Walzrichtung) von 0,1 mm.

Die digitalisierten Sensorsignale von bis zu acht Sensormodulen werden einem gemeinsamen Gig-E-Hub zugeführt und zum Gig-E-Kamerastandard umgewandelt. Die Gig-E-Hubs werden an einem Kamerarechner angeschlossen. Dieser Kamerarechner hat folgende Aufgaben:

- Signalvorverarbeitung
- Detektion der Fehler
- Merkmalsberechnung
- Klassifikation
- Steuerung und Abgleich der Sensormodule

Dem Kamerarechner ist der Datenbankserver überlagert. Dieser speichert die Fehlerbilder und beinhaltet die Produktions- und Trainingsdatenbank. Die Visualisierung der Fehler sowie die Anbindung der Kundendatenbank erfolgt über den Datenbankserver. **Bild 4** zeigt die Signalverarbeitung mit den Funktionen Detektion, Klassifikation und Postprozessor.

Produktionstechnische Ausführung

Nach umfangreichen Laboruntersuchungen sowie Einsatz eines Pilotsystems wurde in der ersten Hälfte 2020 ein Mess-

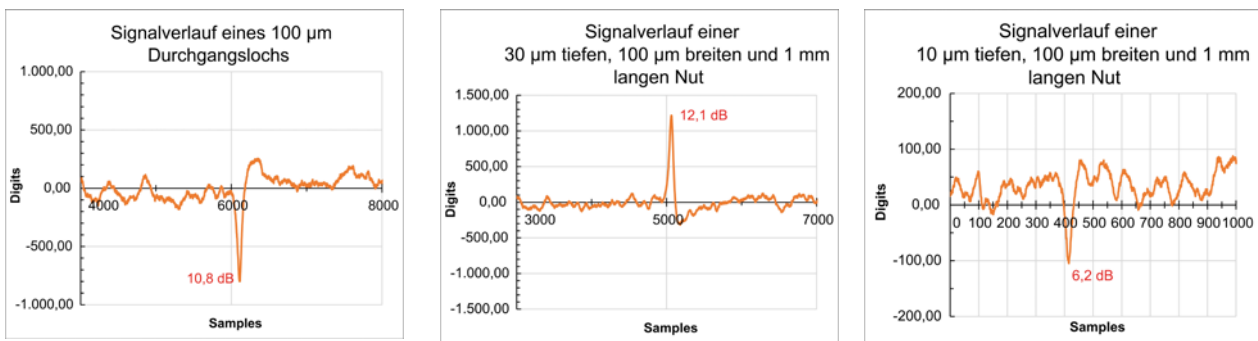
system mit 28 Sensormodulen (maximale Materialbreite 1344 mm) in einer Verzinnungslinie eingebaut und in Betrieb genommen (**Tabelle 1**).

Die Messung erfolgt auf einer Umlenkrolle mit zwei Sensor-modulreihen. Die Positionen der Sensormodule können mittels Servomotoren an unterschiedliche Materialstärken angepasst werden. Zur Sicherstellung der mechanischen Stabilität werden die Sensormodulzeilen sowie deren Träger mittels Wasser in der Temperatur konstant gehalten. Die Wasserkühlung dient gleichzeitig der Abfuhr der Abwärme der Sensormodule.

Das Messsystem verfügt zusätzlich über einen pneumatischen Antrieb, um die Sensorzeilen von der Bandoberfläche vollständig an und abzuschwenken. Der Antrieb wird für einen schnellen Rückzug des Messsystems von der Bandoberfläche, bei Gefahr einer Kollision mit dem Messgut automatisch aktiviert.

Der Abstand der Sensormodule zur Bandoberfläche wird permanent durch jeweils drei kapazitive Abstandssensoren je Sensormodulzeile überwacht. Als zusätzliche Sicherheitsvorrichtung verfügt das Messsystem über einen optischen Falten-detektor. Dabei handelt es sich um eine Laserlichtschranke, welche im Bandlauf 10-20 m vor der Messstelle eingebaut wird. Im Falle von Falten werden die Sensorzeilen abgeschwenkt.

Das Messsystem kann in Parkposition außerhalb der Anlage gefahren werden. In dieser Position erfolgt ein automatischer Abgleich der Sensoren und es können Wartungsarbeiten bei laufender Anlage durchgeführt werden. Beim Abgleich werden alle Sensoren auf festgelegte Magnetempfindlichkeit normiert und es werden defekte Sensoren ermittelt.



Bilder 5-7: Signalverläufe eines 100 µm Lochs und 10 µm und 30 µm tiefen, 100 µm breiten und 1 mm langen Nuten (Quelle: IMS)

(Quelle alle: IMS)

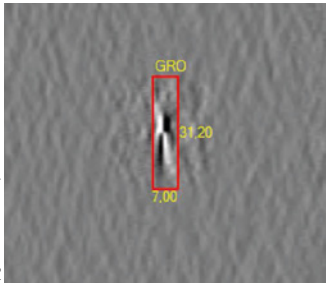


Bild 8: IDS-Aufnahme Fehler 1

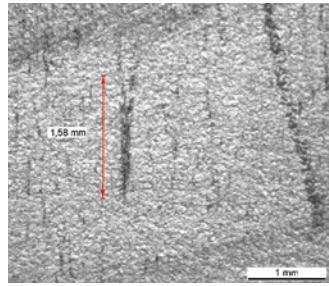


Bild 9: Magnetpulver-Aufnahme Fehler 1



Bild 10-12: 1. Schliff Fehler 1, 2. Schliff Fehler 1 und 3. Schliff Fehler 1

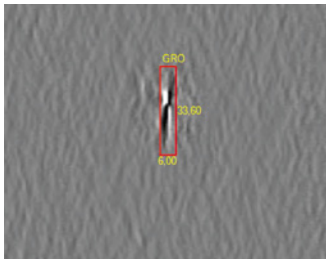


Bild 13: IDS-Aufnahme Fehler 2

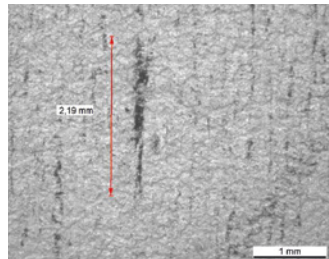


Bild 14: Magnetpulver-Aufnahme Fehler 2

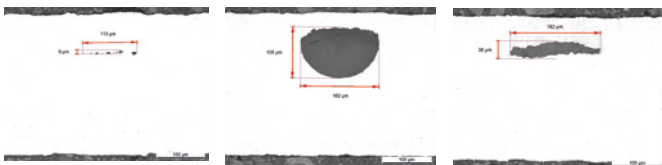


Bild 15-17: 1. Schliff Fehler 2, 2. Schliff Fehler 2 und 3. Schliff Fehler 2

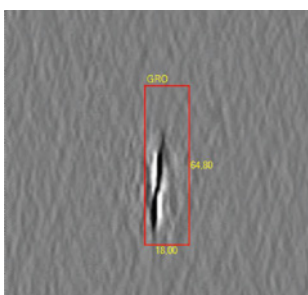


Bild 18: IDS-Aufnahme Fehler 3

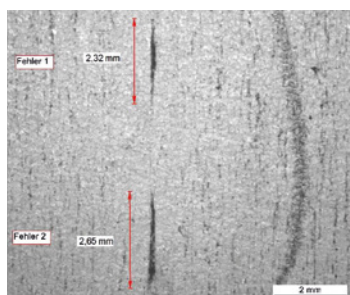


Bild 19: Magnetpulver-Aufnahme Fehler 3

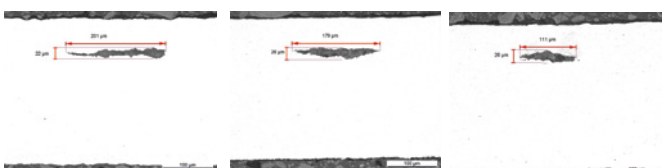


Bild 20-22: 1. Schliff Fehler 3, 2. Schliff Fehler 3 und Dritter Schliff Fehler 3

Messergebnisse

Bild 5, Bild 6 und **Bild 7** zeigen die Rohsignale von künstlichen Fehlern: ein Loch mit 100 µm Durchmesser und eine an der Oberfläche liegende Nut mit den Maßen 1 mm x 100 µm x 30 µm in jeweils 200 µm starkem Stahlband bei einem Messabstand von 500 µm und einer Geschwindigkeit von 500 m/min.

Oberflächenfehler auf der dem Messsystem gegenüberliegenden Seite des Materials lassen sich ebenfalls detektieren. **Bild 7** zeigt das Rohsignal von Nuten mit den Maßen 1 mm x 100 µm x 25 µm in 200 µm starkem Stahlband. Die erste Nut befindet sich auf der dem Messsystem zugewandten, die zweite auf der gegenüberliegenden Materialseite.

Die Geschwindigkeit hat nur geringen Einfluss auf das Signal-zu-Rausch-Verhältnis von Defektsignalen.

Betriebsmessungen

Die gemessenen inneren Einschlüsse werden wie folgt ausgewertet:

- Aufgrund der Fehlergröße (Amplitude/Volumen)
- Aufgrund der Klassifizierung (z.B. Schalen, Risse, Überlappungen, M-Fehler, Kratzer, Eindrücke)

Einige detektierte Einschlüsse wurden mittels Magnetpulverprüfung genau lokalisiert und anschließend durch die Anfertigung von jeweils drei Schliffen quer zur Walzrichtung untersucht: **Bilder 8-22**

Kalibriercoil

Das gesamte Messsystem einschließlich der Klassifikationsleistung erfolgt durch zyklische Überprüfung mittels eines Kalibriercoils. Das Kalibriercoil sollte möglichst viele Fehler enthalten. Geeignet hierfür ist Kaltband, welches aus Übergangsbrammen hergestellt wurde. Bei der zyklischen Überprüfung wurde eine Reproduzierbarkeit > 98% erreicht.

Fazit

Das IDS-Messsystem wird zur vollständigen Bewertung des Reinheitsgrades eingesetzt. Die maximale Banddicke bei voller Empfindlichkeit beträgt 1 mm und ist an für beliebige Bandbreiten skalierbar. Das Messsystem kann an die jeweilige Kundenspezifikation angepasst werden.

Durch die eingesetzte Bildverarbeitung mit Merkmalsberechnung und Klassifikation werden die Fehler anhand ihrer Größe und Fehlerart unterschieden. Die Klassifikation wird an das jeweilige Material sowie die Kundenspezifikation angepasst. Darüber hinaus werden die Messergebnisse für die Optimierung der Vormaterialstufen verwendet. Durch Verbesserung der Qualität und der Ausbringung werden Ressourcen geschont und Kosten reduziert.

Kontakt

Jakob Schwarzmann

Entwicklung Messtechnik
IMS Messsysteme GmbH
Heiligenhaus