

# Neuentwicklung eines Inspektionssystems zur Online-Streulflussprüfung kaltgewalzter Stahlbänder

Jakob SCHWARZMANN<sup>1</sup>, Horst KRAUHÄUSER<sup>1</sup>, Tim BEIKÜFNER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IMS Messsysteme GmbH, Dieselstr. 55, 42579 Heiligenhaus

<sup>2</sup> IMS Röntgensysteme GmbH, Dieselstr. 52, 42579 Heiligenhaus

Kontakt E-Mail: jakob.schwarzmann@ims-gmbh.de

**Kurzfassung.** Kaltgewalztes Stahlblech enthält häufig nichtmetallische Einschlüsse (non-metallic inclusions – NMIs). Diese gelangen bei der Stahlherstellung und dem anschließenden Brammenguss ins Material. Ein Teil der Einschlüsse bleibt über die Walzprozesse hindurch innerhalb des Materials, ohne die Materialoberfläche zu durchdringen. NMIs können bei nachfolgenden Produktionsschritten, insbesondere in Verbindung mit Umformung, Probleme verursachen. Eine optische Detektion solcher Defekte ist nicht möglich. Daher besteht der Bedarf nach einem Online-Inspektionssystem für die Detektion von nichtmetallischen, inneren Einschlüssen.

Magnetischer Streulfluss wird bereits weitläufig zur Detektion von Einschlüssen, Rissen und anderen Materialinhomogenitäten eingesetzt. Da viele NMIs nicht ferromagnetisch sind, ist eine Detektion mittels magnetischem Streulfluss grundsätzlich möglich. Allerdings beschränkt sich deren Einsatz bisher hauptsächlich auf die manuelle Inspektion von statischen Bauteilen, halbautomatische oder manuelle Inspektion von Werkstücken im Labor oder die Inspektion großer Teile mittels beweglicher Sonden (Detektion großer Inhomogenitäten durch Rohrleitungsmolche u.ä.). Das von der IMS Messsysteme GmbH entwickelte Inspektionsgerät ermöglicht die magnetische Streulfluss-Inspektion von Kaltband während der Produktion. Durch den Einsatz empfindlicher GMR-Sensoren mit optimierter Geometrie konnte der Messabstand im Vergleich zu Hall-Sensoren deutlich vergrößert werden. Sensoren, Magnet und Signalverarbeitung wurden zu einem Sensormodul zusammengefasst. Mehrere Sensormodule bilden eine magnetische Zeilenkamera. Diese bietet eine vollständige Materialabdeckung und ist beliebig skalierbar.

Die Bildübermittlung findet über den GigE - Kamerastandard statt. Erfasste Defekte werden über eine erweiterte Oberflächeninspektionssoftware klassifiziert und in Form eines Defektdiagramms sowie optimierter Bilder dargestellt. Dies ermöglicht eine Bewertung des produzierten Materials sowie eine Optimierung vorausgehender Prozesse.

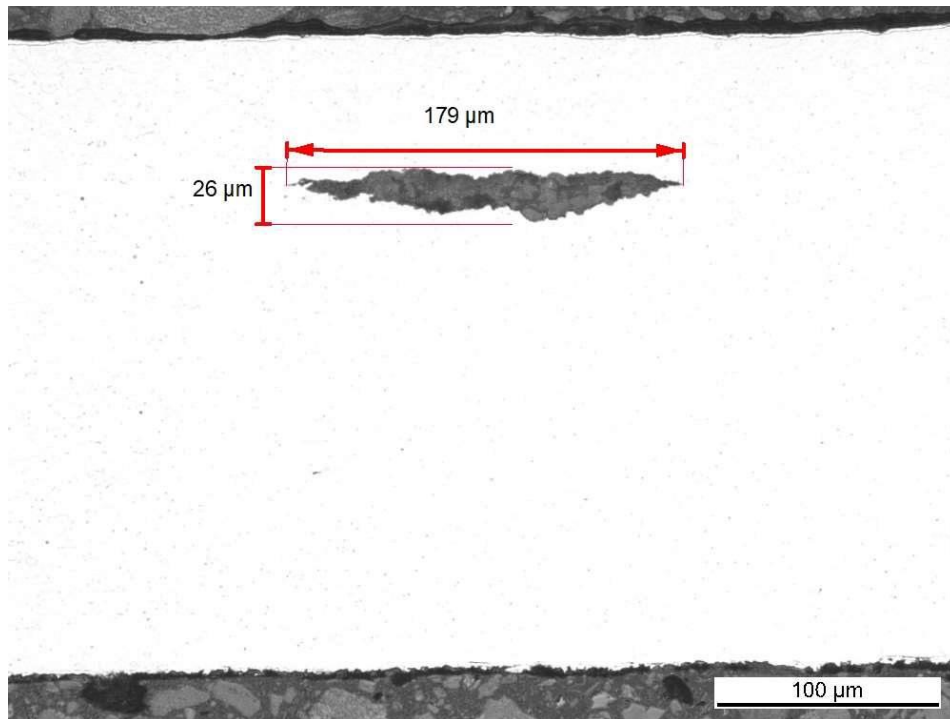
Der Vortrag beinhaltet die Entwicklung des Inspektionssystems, dessen Spezifikationen und die Vorstellung von Messergebnissen aus laufender Produktion.

## Grundlagen, Aufgabenstellung, Lösungsansatz

Bandstahl kommt in einer Vielzahl von Anwendungen zum Einsatz und unterliegt hinsichtlich der Qualität und Produktionseffizienz einem kontinuierlichen Entwicklungsprozess. Diese Entwicklung erfordert eine exakte Führung der Produktion. In

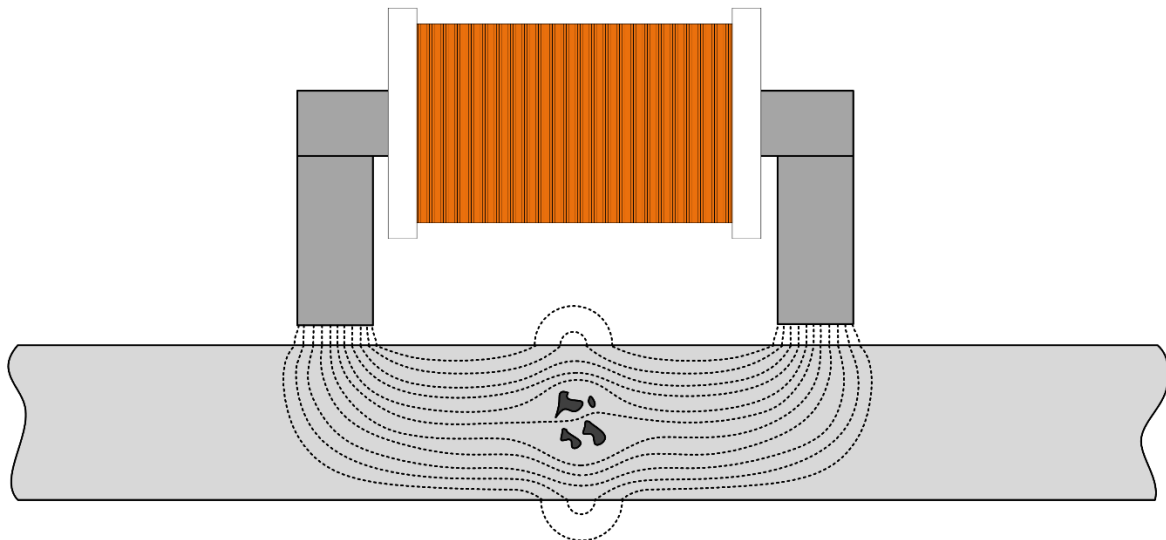


vielen Fällen sind dabei Stichproben zur Überwachung von Materialeigenschaften nicht ausreichend. Diese müssen vielmehr über die gesamte Materiallänge sichergestellt sein. Eine Materialeigenschaft, welche als Reinheit bezeichnet wird, beschreibt die Abwesenheit von inneren Einschlüssen und Seigerungen. Solche nichtmetallischen Partikel können beim Brammenguss ins Material gelangen und verbleiben zum Teil im Produkt. Bei Abbildung 1 handelt es sich um die Mikroskopaufnahme des Querschliffs eines typischen Einschlusses.



**Abb. 1.** Mikroskopaufnahme des Querschliffs eines typischen nichtmetallischen Einschlusses in Kaltband

Bei den dunklen Streifen am oberen und unteren Bildrand handelt es sich um Vergussmasse zur Fixierung der Blechprobe, der helle Bereich in der Bildmitte ist der Querschnitt des nicht geätzten Bandes und der mit Maßen versehene, dunkle Bereich innerhalb des Bandes ist der Einschluss. Solche Einschlüsse können, insbesondere bei einer Weiterverarbeitung mit hohen Umformgraden, zu Schäden am Produkt und am Werkzeug führen. Daraus ergibt sich ein Bedarf nach einem berührungslosen und zerstörungsfreien Inspektionssystem für den Reinheitsgrad. Da die Defekte häufig vollständig unter der Materialoberfläche liegen, können diese nicht optisch detektiert werden. Eine Detektion mittels Röntgen-Durchstrahlungsprüfung bei üblichen Anlagengeschwindigkeiten von bis zu 20 m/s ist auf Grund der kleinen Defektmaße mit den aktuell verfügbaren Komponenten nicht realisierbar [1]. Gleiches gilt für eine Detektion mittels Ultraschallprüfung, da die maximal einsetzbare Frequenz durch die Streuung des Schalls an der Kornstruktur des Stahls begrenzt ist [2]. Da die magnetische Permeabilität von nichtmetallischen Einschlüssen deutlich unter der Permeabilität des umgebenden Materials liegt, wäre eine Detektion mittels magnetischer Streuflussprüfung möglich. Dabei wird das Material mittels eines durch dieses geleiteten Stroms oder eines externen Magneten magnetisiert. Gibt es im Material Bereiche mit erhöhtem magnetischem Widerstand, etwa durch Risse oder Einschlüsse mit niedrigerer Permeabilität, kommt es zu einer Verdrängung von magnetischem Fluss, wobei ein kleiner Anteil als Streufluss aus dem Material austritt. Die durch den großen Permeabilitätsunterschied zwischen Luft und Material auftretende magnetische Brechung sorgt für eine den ursächlichen Defekt deutlich übersteigende räumliche Ausdehnung des Streuflusses. Dies ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt.



**Abb. 2.** Schematische Darstellung eines magnetisierten Werkstücks mit Einschluss und Streufluss

Die Nutzung von magnetischem Streufluss in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung ist in Form der Magnetpulverprüfung seit langem etabliert. Magnetischer Streufluss wird dabei durch das lokale Anhaften eines feinen ferromagnetischen Pulvers auf der Materialoberfläche angezeigt. Dadurch eignet sich das Verfahren jedoch nicht für den Einsatz auf bewegtem Band während der Produktion. Das von der IMS Messysteme GmbH entwickelte Inclusion Detection System (IDS) detektiert magnetischen Streufluss mittels empfindlicher Magnetfeldsensoren. Die Anforderungen an das Inspektionssystem umfassen einen auf charakteristische Defekte optimierten Aufbau und eine uneingeschränkte Funktionsfähigkeit unter den voraussichtlichen Produktionsbedingungen. Die räumliche Dichte und Empfindlichkeit der Sensoren müssen an typische Einschlüsse angepasst sein und eine vollständige Inspektion des Materials ermöglichen. Externe Störungen sollen einen möglichst geringen Einfluss auf die Inspektionsergebnisse haben. Auf Grund der kleinen Abmessungen typischer Streuflüsse müssen die Sensoren an das bewegte Material herangeführt werden können.

### **Entwicklung des IDS-Inspektionssystems**

Das IDS setzt zur Detektion des magnetischen Streuflusses von Defekten elektronische Magnetfeldsensoren ein. Diese sind in Gruppen innerhalb von Elektromagneten angeordnet. Die Auswahl, Konfiguration und Anordnung dieser Komponenten wurde auf Grundlage von Labormessungen auf künstlichen Fehlern optimiert. Die künstlichen Fehler wurden in Anlehnung an von Kaltbandherstellern zur Verfügung gestellte Defektproben mittels Lasermikrobearbeitung hergestellt. Als Substrat dient 200 µm dickes, kaltgewalztes Stahlband. Da die Bewegung des Materials signifikanten Einfluss auf das magnetische Verhalten der Defekte hat, erfolgen alle Messungen bei mittels entsprechenden Prüfstands simulierter Bandgeschwindigkeit. Auf diesem werden etwa 30 mm starke Ronden aus Hartgewebe mit einem Durchmesser von bis zu 520 mm befestigt und in Rotation versetzt. Auf den Hartgeweberonden werden mittels Konstruktionskleber ebenfalls rund zugeschnittene Probenbleche befestigt. Ein stabiler Kreuzsupport ermöglicht eine genaue Positionierung des Versuchsaufbaus sowie ein Abdrehen der Hartgeweberonden zur Erzielung eines optimalen Planlaufs.

## 1. Magnetisierung

Die Durchstrahlungsprüfung sowie die optische Untersuchung von Schliffen von Defektproben haben ergeben, dass die meisten Defekte durch Walzvorgänge längliche Formen annehmen. Daher werden die künstlichen Fehler als Nuten mit einer Länge von 1 mm, einer Breite von 100  $\mu\text{m}$  und einer Tiefe von 10  $\mu\text{m}$  – 50  $\mu\text{m}$  ausgeführt. Zur Simulation von kompakten Einschlüssen oder einzelnen Bruchstücken werden auch Durchgangsbohrungen mit einem Durchmesser von 70  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$  untersucht.

Die Magnetisierungsrichtung hat großen Einfluss auf den von unterschiedlichen Defekten verursachten Streufluss. Zur Feststellung der optimalen Magnetisierungsrichtung wird eine Magnetisierung quer, parallel und im 45°-Winkel zur Walzrichtung untersucht. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die Signal-zu-Rausch-Verhältnisse einer 25  $\mu\text{m}$  tiefen Nut und einer 100  $\mu\text{m}$  Bohrung, jeweils in 200  $\mu\text{m}$  starkem Kaltband, in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Sensor und Materialoberfläche und der Magnetisierungsrichtung.

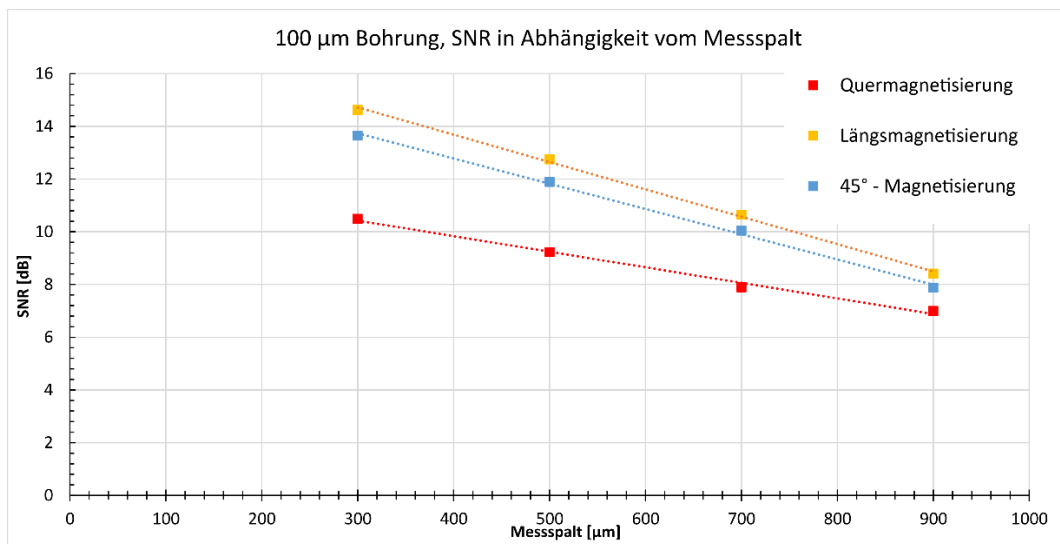


Abb. 3. Signal-zu-Rausch-Verhältnis einer 100  $\mu\text{m}$  Bohrung in Abhängigkeit vom Messspalt bei unterschiedlichen Magnetisierungsrichtungen

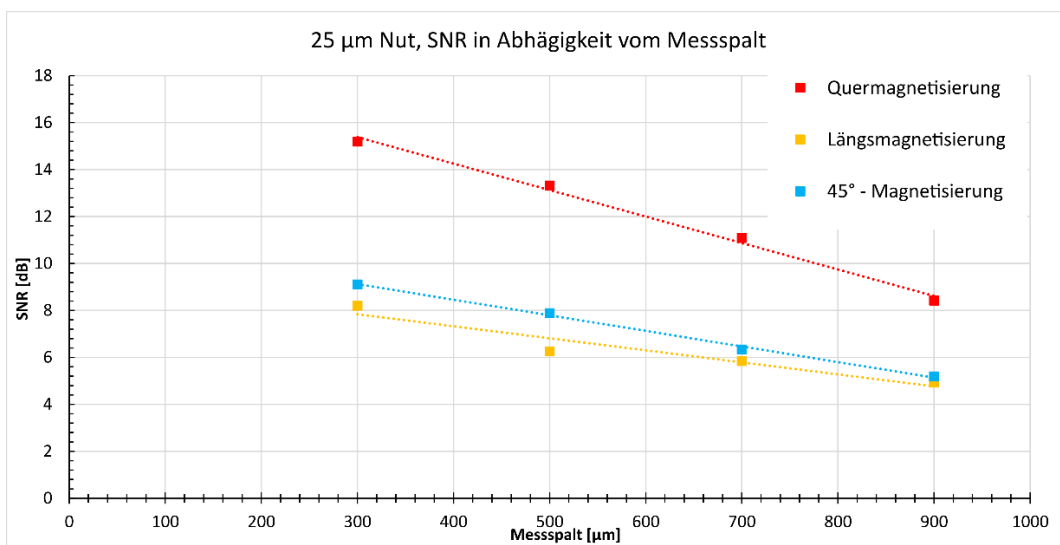


Abb. 4. Signal-zu-Rausch-Verhältnis einer 25  $\mu\text{m}$  tiefen, 100  $\mu\text{m}$  breiten und 1 mm langen Nut in Abhängigkeit vom Messspalt bei unterschiedlichen Magnetisierungsrichtungen

Die Ergebnisse für Löcher sind für alle Magnetisierungsrichtungen vergleichbar. Für Nuten werden bei einer Magnetisierung quer zur Walzrichtung die besten Signal-zu-Rausch-Verhältnisse erzielt. Da durch den Walzprozess von länglichen Fehlerformen auszugehen ist, setzt das IDS eine Magnetisierung quer zur Walzrichtung ein. Bei bewegtem Material und einer Magnetisierung quer zur Walzrichtung ist die maximale Jochweite des Magneten begrenzt. Daher werden zur Abdeckung üblicher Materialbreiten mehrere Magneten benötigt. Eine lückenlose Inspektion erfordert zudem mindestens 2 versetzte Magnetreihen.

## 2. Sensoren

Das IDS setzt GMR-Sensoren zur Erfassung von Streufluss ein. Diese bestehen aus mehreren elektrisch leitfähigen, sehr dünnen Schichten. Der elektrische Widerstand der Anordnung ist durch spezielle Positionierung und daraus resultierenden quantenmechanischen Effekten abhängig von der magnetischen Induktion. Da der elektrische Widerstand eines solchen Elements zudem stark temperaturabhängig ist, werden bei kommerziell verfügbaren GMR-Sensoren meist 4 Sensorelemente zu einer wheatstoneschen Messbrücke verschaltet. Je nach Positionierung und Schirmung der Sensorelemente lassen sich unterschiedliche Funktionalitäten implementieren. Durch die magnetische Abschirmung von 2 der 4 Sensorelemente erhält man ein in Abbildung 5 schematisch dargestelltes Magnetometer: Die differentielle Ausgangsspannung ist abhängig vom absoluten Wert der magnetischen Induktion.

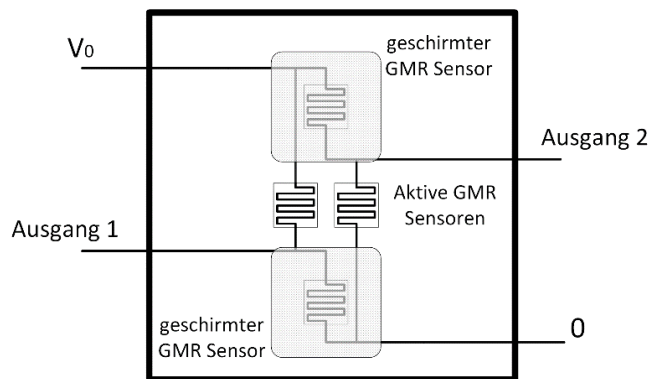


Abb. 5. Aufbau eines GMR-Magnetometers

Wird auf eine Abschirmung von Sensorelementen verzichtet und werden jeweils 2 Sensorelemente räumlich zusammengefasst, ist die Ausgangsspannung abhängig von der Differenz der magnetischen Induktion. Eine solche, in Abbildung 6 dargestellte, Konfiguration kommt im IDS zum Einsatz und wird als Gradiometer bezeichnet. [3][4][5]

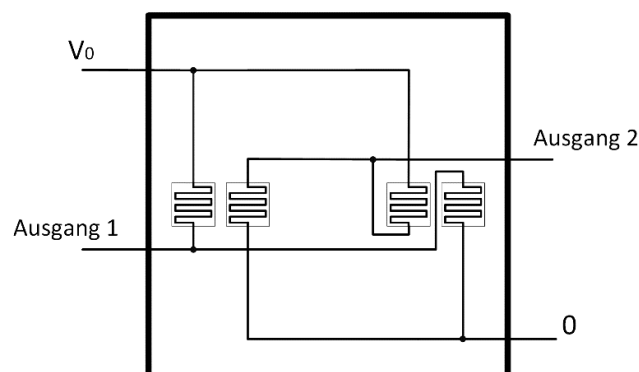


Abb. 6. Aufbau eines GMR-Magnetometers

Da ausgedehnte Felder keinen Einfluss auf das Ausgangssignal von Gradiometern haben, erlauben diese höhere Verstärkungen, wodurch besonders kleine lokale Magnetfeldinhomogenitäten detektiert werden können. Die erforderliche räumliche Auflösung wurde ermittelt, indem die Ausdehnungen der Streuflüsse kleiner künstlicher Fehler untersucht wurden. Wie in den Abbildungen 7 und 8 zu sehen, liegen diese trotz der deutlich kleineren Fehler bei über 1 mm. Eine räumliche Auflösung der Sensoren von 1 mm ist somit ausreichend für die Detektion jeglicher Defektgrößen.

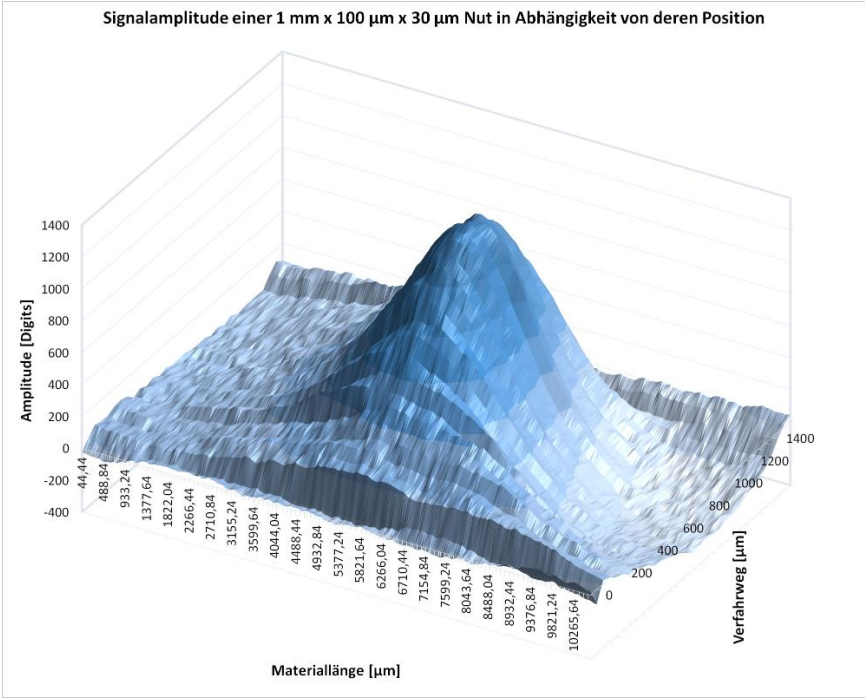


Abb. 7. Amplitudenverlauf einer 30 µm tiefen, 100 µm breiten und 1 mm langen Nut

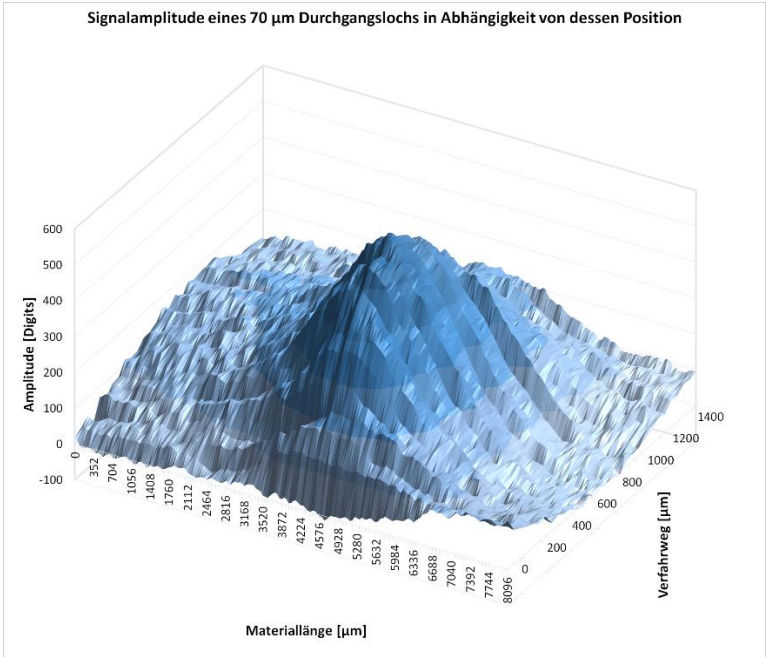


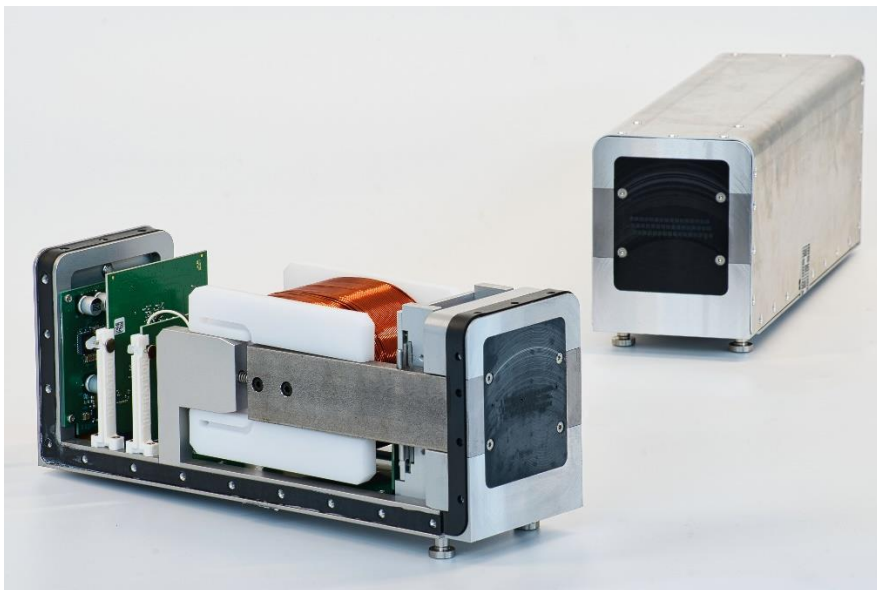
Abb. 8. Amplitudenverlauf einer 70 µm Durchgangsbohrung



Da ausgedehnte Felder keinen Einfluss auf das Ausgangssignal von Gradiometern haben, erlauben diese höhere Verstärkungen und somit Empfindlichkeiten, ohne dass es zu einer Sättigung durch externe Störungen kommt.

### **IDS-Inspektionssystem**

Auf Grund der begrenzten Magnetjochbreite bei einer Magnetisierung quer zur Walzrichtung wurden jeweils ein Magnet mit den sich innerhalb des Jochs befindlichen Sensoren, deren analoger Verstärkung, Filterung und AD-Wandlung sowie der Magnetansteuerung und Spannungsversorgung zu kompakten Einheiten zusammengefasst. Eine präzise Fertigung dieser Sensormodule ermöglicht einen schnellen Austausch ohne anschließende Justagearbeiten. Die Schutzklasse IP 64 der Sensormodule ermöglicht den direkten Einsatz in den meisten Produktionsumgebungen. Die Sensoren sind innerhalb eines Aluminiumrahmens zu einem Sensorblock vergossen. Durch die glatte Oberfläche wird einer Verschmutzung oder Beschädigung der Sensoren vorgebeugt. Im Falle einer Beschädigung lässt sich ein Sensorblock leicht austauschen. Abbildung 9 zeigt Sensormodule zusammengebautem und geöffnetem Zustand.



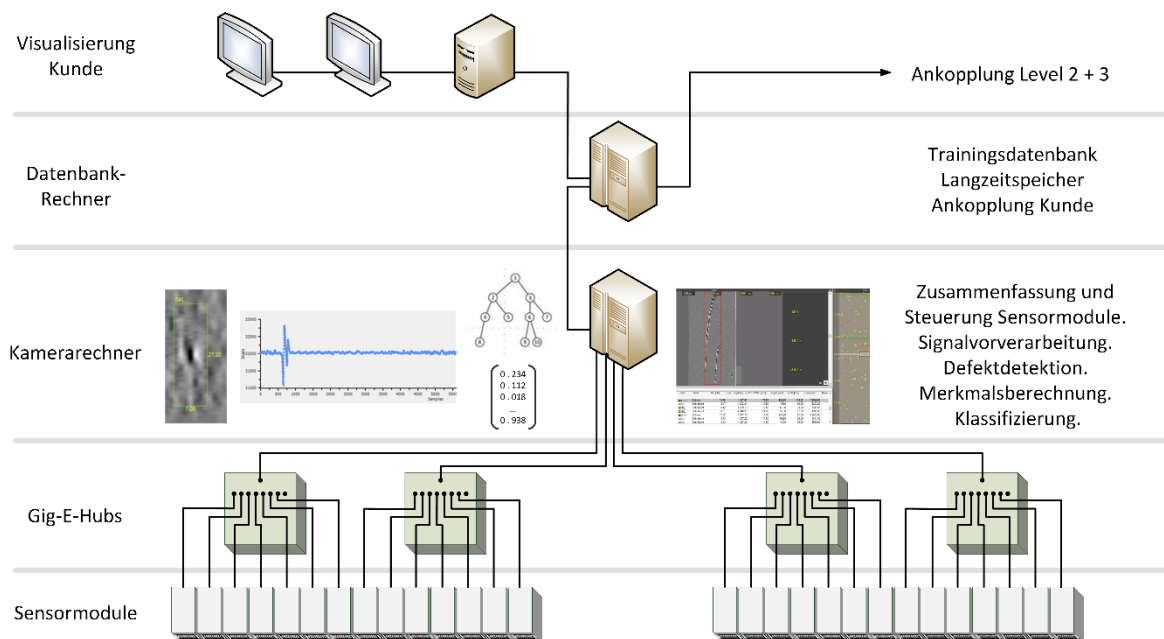
**Abb. 9.** IDS-Sensormodule

Ein Sensormodul beinhaltet bei einer Gesamtbreite von 95 mm 48 GMR-Gradiometer. Bei einer räumlichen Auflösung von 1 mm wird somit eine Breite von 48 mm abgedeckt, sodass eine lückenlose Inspektion mit 2 Sensormodulzeilen möglich ist. Bis zu 8 Sensormodule werden von einem Gig-E-Hub angesteuert und deren digitalisierte Signale zum Gig-E-Kamerastandard umgewandelt. Ein in Abbildung 10 dargestellter Gig-E-Hub mit voller Sensormodulbestückung stellt so eine magnetische Zeilenkamera mit 384 mm Breite dar. Die Längsauflösung beträgt bei 15 Bit Auflösung geschwindigkeitsunabhängig 0,1 mm bis zu einer maximalen Abtastrate von 187,5 kHz (entsprechend einer Geschwindigkeit von 1125 m/min).



**Abb. 10.** IDS Gig-E-Hub

Mehrere Gig-E-Hubs übertragen Sensormoduldaten an einen Kamerarechner. Dieser detektiert Defekte, berechnet deren Merkmale und nimmt auf Grundlage einer Trainingsdatenbank eine Klassifikation vor. Detektierte Defekte werden an einen Datenbankserver übertragen. Hier werden die Fehlerbilder sowie die Produktions- und Trainingsdatenbank verwaltet, visualisiert und an die Kundendatenbank angebunden. Abbildung 11 zeigt den grundlegenden Ablauf der Signalverarbeitung beim IDS.



**Abb. 11.** IDS-Signalverarbeitung

In der ersten Hälfte 2020 wurde nach Durchführung umfangreicher Laboruntersuchungen und Online-Messungen durch ein Pilotsystem ein 28 Sensormodule umfassendes Inspektionssystem in einer Verzinnungslinie eingebaut und in Betrieb genommen. Gemessen wird auf einer Umlenkrolle aus austenitischem Stahl. Die Position der Sensormodule über dem Band wird mittels Servomotoren automatisch an unterschiedliche Materialstärken angepasst. Ein zusätzlicher pneumatischer Antrieb dient dem schnellen Abschwenken des



Systems bei Gefahr einer Bandkollision und zum Verfahren in eine Parkposition, welche eine Wartung bei laufender Produktion ermöglicht. Der Abstand zum Band wird permanent durch 3 kapazitive Abstandssensoren pro Sensormodulzeile überwacht. Zusätzlich befindet sich 10 m – 20 m im Bandlauf vor der Messstelle ein als Laserlichtschranke ausgeführter Faltdetektor, sodass die Sensormodulzeilen bei Falten rechtzeitig abgeschwenkt werden können. Eine Abgleichvorrichtung ermöglicht die automatische Überprüfung aller Sensoren auf Magnetfeldempfindlichkeit und Zeitverhalten. Die Sensormodulzeilen und deren Träger sind zwecks Wärmeabfuhr und Gewährleistung der mechanischen Stabilität wassergekühlt. Abbildung 12 zeigt das Inspektionssystem im Betrieb.



**Abb. 12.** IDS-Signalverarbeitung

Die Daten der inspizierten Produkte sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die auf diesem Material erzielte Genauigkeit findet sich in Tabelle 2.

**Tabelle 1.** Daten der durch das Pilotsystem inspizierten Produkte

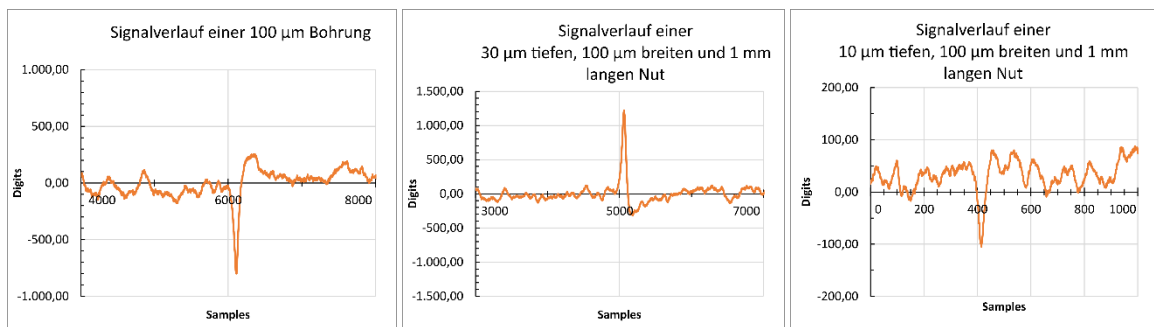
Banddicke	0,1 mm – 0,6 mm (max. 1 mm)
Bandbreite	600 mm – 1250 mm
Bandgeschwindigkeit	max. 1000 m/min
Messabstand	> 0,5 mm

**Tabelle 2.** Durch das Inspektionssystem erzielte Genauigkeit

Detektierbare Fehlergröße (bei 200 µm starkem Material)	70 µm Bohrung, 10 µm tiefe, 100 µm breite, 1 mm lange Nut
Abstandseinfluss	1 dB / 100 µm
Reproduzierbarkeit	> 98 %

## 1. Labormessungen

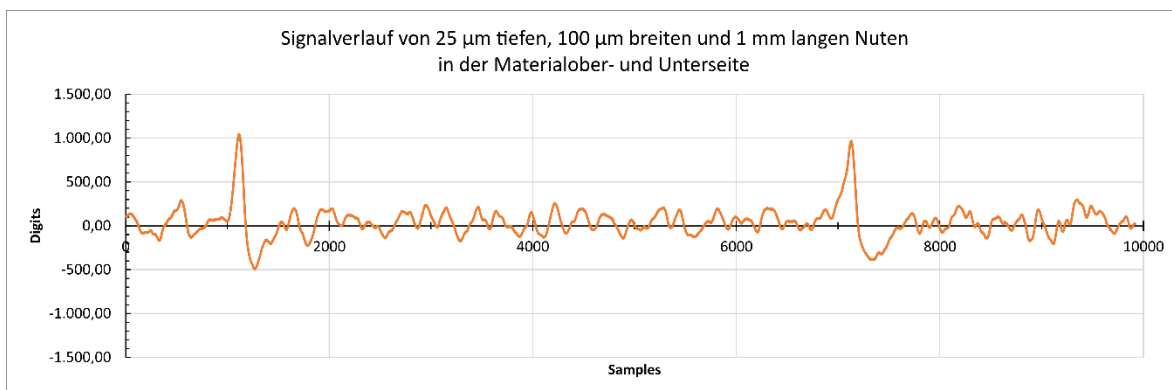
Die in den Abbildungen 13 – 15 gezeigten Rohsignale wurden bei der Untersuchung künstlicher Fehler in 200  $\mu\text{m}$  starkem Kaltband bei einem Messabstand von 500  $\mu\text{m}$  und einer Geschwindigkeit von 500 m/min im Labor aufgenommen. Abbildung 13 zeigt das Signal einer 100  $\mu\text{m}$  Bohrung und die Abbildungen 14 und 15 die Signale von 30  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  tiefen, 100  $\mu\text{m}$  breiten und 1 mm langen Nuten.



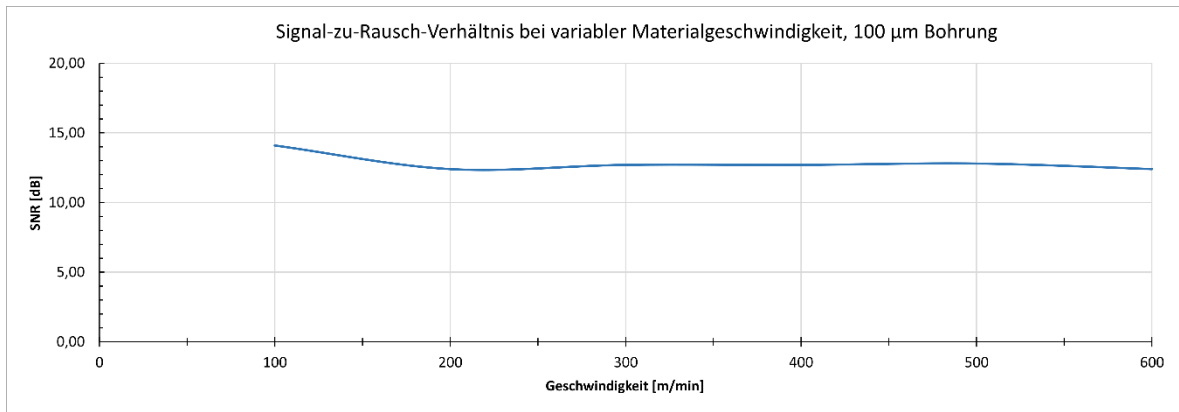
**Abb. 13-15.** Defektsignale einer 100  $\mu\text{m}$  Bohrung und einer 10  $\mu\text{m}$  und 30  $\mu\text{m}$  tiefen, 100  $\mu\text{m}$  breiten und 1 mm langen Nut

Defekte können auch auf der dem Inspektionssystem gegenüberliegenden Seite des Materials detektiert werden. In Abbildung 16 wird dies anhand des Signals zweier Nuten mit je 25  $\mu\text{m}$  Tiefe, 100  $\mu\text{m}$  Breite und 1 mm Länge gezeigt. Die erste Nut befindet sich auf der gleichen Materialseite wie das Inspektionssystem, die 2. Nut auf der gegenüberliegenden Materialseite.

Abbildung 17 zeigt den Zusammenhang zwischen Materialgeschwindigkeit und Signal-zu-Rausch-Verhältnis des Defektsignals einer 100  $\mu\text{m}$  Bohrung. Der Geschwindigkeitseinfluss auf die Empfindlichkeit des Inspektionssystems ist bei typischen Geschwindigkeiten von Kaltband-Verarbeitungslinien somit sehr gering.



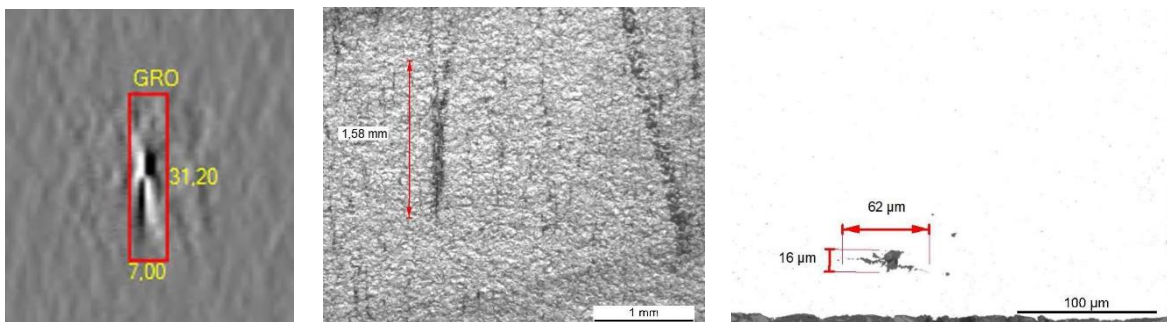
**Abb. 16.** Signal von 25  $\mu\text{m}$  tiefen, 100  $\mu\text{m}$  breiten und 1 mm langen Nuten in der Materialober- und Unterseite



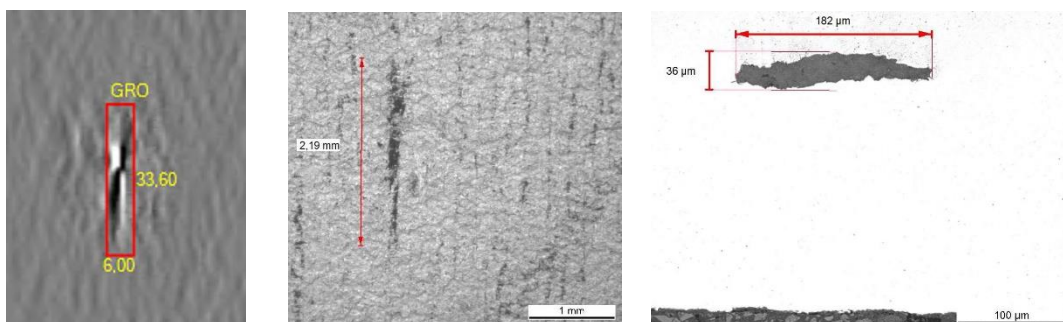
**Abb. 17.** Zusammenhang zwischen Materialgeschwindigkeit und Signal-zu-Rausch-Verhältnis einer 100 µm Bohrung

## 2. Betriebsmessungen

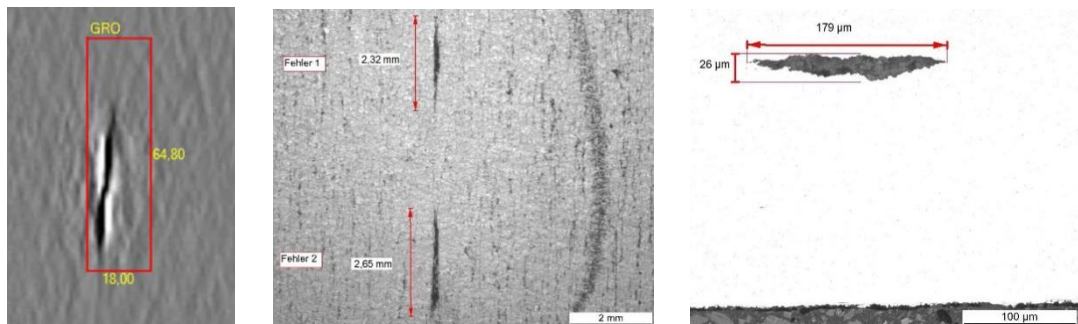
Einige in der Produktion detektierte Einschlüsse wurden durch Magnetpulverprüfung lokalisiert und mittels Anfertigung mehrerer Schlibfbilder quer zur Walzrichtung untersucht. Die Abbildungen 18 – 20 zeigen jeweils die IDS-Aufnahme, ein Foto der Magnetpulverprüfung und ein Schlibfbild eines näher untersuchten Einschlusses. Beim schwarzen Rand im oberen beziehungsweise unteren Bildteil der Schlibfbilder handelt es sich um Vergussmasse, in welche die Proben eingebettet werden. Das Band erscheint als homogene weiße Fläche, da keine Ätzung stattfindet.



**Abb. 18.** IDS-Aufnahme, Magnetpulverprüfung und Schlibfbild eines Einschlusses in Kaltband (1)

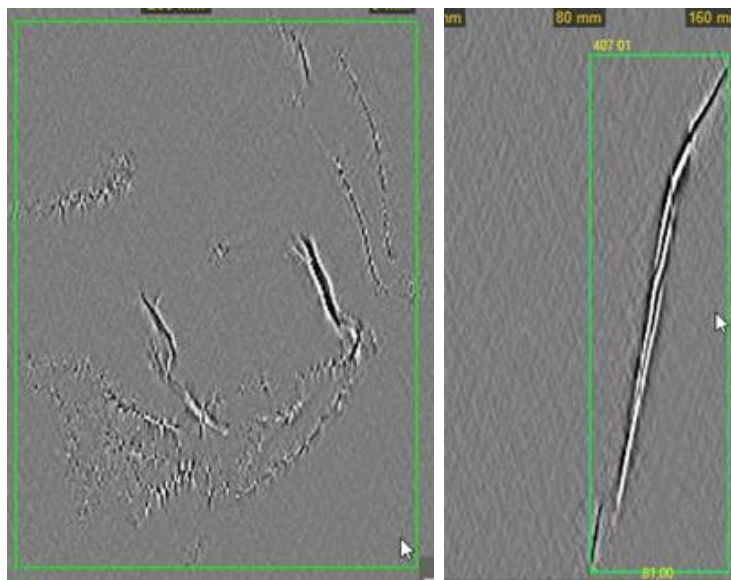


**Abb. 19.** IDS-Aufnahme, Magnetpulverprüfung und Schlibfbild eines Einschlusses in Kaltband (2)



**Abb. 20.** IDS-Aufnahme, Magnetpulverprüfung und Schliffbild eines Einschlusses in Kaltband (3)

Auch großflächige Defekte wie Kratzer und Falten können detektiert werden. Die IDS-Aufnahmen von zwei solchen Defekten sind in Abbildung 21 dargestellt.



**Abb. 21.** IDS-Aufnahmen großflächiger Defekte

Eine Auswertung der detektierten Fehler findet einerseits auf Grundlage der Fehlerfläche und Intensität und andererseits mittels der berechneten Merkmale statt.

Die Leistung des Inspektionssystems wird regelmäßig mittels eines Kalibriercoils überprüft. Dieses enthält eine besonders große Anzahl Fehler. Üblicherweise wird hierfür aus Übergangsbrammen gefertigtes Kaltband eingesetzt. Bei der regelmäßigen Überprüfung wird eine Reproduzierbarkeit der Inspektionsergebnisse von  $> 98\%$  erreicht.

- [1] Michael Schwan. Erkennung von Einschlüssen in Stahlbändern mittels Röntgendurchstrahlverfahren. Master's thesis, TFH Georg Agricola, Fachbereich Maschinen- und Verfahrenstechnik, 2013
- [2] Michael Schwan. Abschlussbericht Entwicklungsprojekt "Ultraschallmessung für dünne Bänder", 2011.
- [3] NVE Corporation. GMR Sensor Catalog, 2012.
- [4] Dipl.-Ing. André Yashan. Dissertation: Über die Wirbelstromprüfung und magnetische Streuflussprüfung mittels GMR-Sensoren, S. 24 ff, 2008.
- [5] Matthias Pelkner, Andreas Neubauer, Verena Reimund, Thomas Erthner, Nicolai Panke, Marc Kreuzbruck. Automatisierte Streuflussprüfung und Bewertung von Zylinderlagerringen unter Anwendung von GMR-Sensorarrays. DACH-Jahrestagung 2012 in Graz - Mo.2.A.2, 2012.