

Mikromagnetische Detektion von Härteinhomogenitäten an Grobblechen

Sargon Youssef¹, Martin Schuppmann¹, Werner Bähr¹, Sergey Pushkarev¹, Hendrik Theado¹, Philipp Stopp¹, Jens Wagner¹, Daniel Molenda², Olaf Stawicki²

¹ Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP
Campus E3 1
66123 Saarbrücken, Deutschland

² ROSEN Technology and Research Center GmbH
Am Seitenkanal 8
49811 Lingen (Ems)

Zusammenfassung

Die hohen Qualitätsansprüche von Stahlerzeugnissen und Komponenten im Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbau erfordern eine hohe Qualität des Ausgangsmaterials. Beispielsweise stellt die Homogenität der mechanisch-technologischen Materialeigenschaften wie die Härte bei Grobblechen, ein wichtiges Qualitätsmerkmal dar. Zur Detektion von Härteinhomogenitäten in Grobblechen wurde das 3MA-X8 Verfahren weiterentwickelt und in einen Handwagen implementiert. In einer umfangreichen von der Firma ROSEN beauftragten und begleitenden Qualifizierungsstudie wurden verschiedene Einflussfaktoren wie Zündervariationen, magnetische Restfelder und Blechtemperatur auf die zuverlässige Detektion von Härteinhomogenitäten im industriellen Umfeld untersucht. Die positiven Ergebnisse resultierten in der Implementierung des Prüfverfahrens in eine automatisierte Prüfanlage. Im Rahmen dieses Beitrages werden die Ergebnisse der Qualifizierungsstudie und die aktuellen Fortschritte bei der Implementierung in die automatisierte Prüfanlage vorgestellt. Neben dem mechanischen Konzept wird ein Überblick über die verfahrensseitige FPGA-basierte Implementierung gegeben.

Keywords: Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Materialcharakterisierung, Maschinelles Lernen, Grobblech, Hardspot,

Einleitung

Die hohen Qualitätsansprüche von Stahlerzeugnissen und Komponenten im Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbau erfordern eine hohe Qualität des Ausgangsmaterials. Beispielsweise stellt die Homogenität der mechanisch-technologischen Materialeigenschaften wie die Härte bei Grobblechen, ein wichtiges Qualitätsmerkmal dar. Hieraus resultiert ein in den letzten Jahren steigender Bedarf an der zerstörungsfreien Charakterisierung der Materialeigenschaften von Grobblechen für die Pipelineindustrie. Nach ISO15156, NACE MR0175 oder DNV-OS-F101 dürfen die Stähle für den Sauer gas-einsatz eine Härte von 250 HV10 nicht überschreiten. Bei Härtewerten ab ca. 300 HV10 reduziert sich die Dehnbarkeit bei kohlenstoffhaltigen Stählen und die Anfälligkeit auf Materialfehler beim Verlegen der Rohre, oder auch während des Betriebs erhöht sich. Aus wirtschaftlichen Gründen werden von den

Betreibern oft hochwertige Stahlgüten (z.B. X60, X65, etc.) auch für Pipelines mit saurem Medium bevorzugt eingesetzt. Diese Stahlgüten weisen eine höhere Grundhärte des Materials auf. Beispielsweise X65 besitzt eine Grundhärte von ca. 220 HV10. Die Differenz zur erlaubten Maximalhärte von Sauer gasanwendungen beträgt demnach ca. 30 HV10. Deshalb suchen Grobblechhersteller und deren Kunden, entweder als Rohrlieferant oder als Endanwender nach geeigneten Möglichkeiten, diese Härteinhomogenitäten (engl. Hardspots) sicher zu erfassen. Dadurch kann die Qualität des gesamten Blechs bereits nach dem Walzprozess beurteilt werden. Für diese Aufgabenstellung sind Härteinhomogenitäten von +/- 30 HV10 bei einem minimalen Durchmesser von 10 mm zu detektieren.

3MA-X8 Prüfverfahren

Das am Fraunhofer IZFP entwickelte 3MA-X8 Verfahren (3MA = Mikromagnetische Multipa-

parameter Mikrostruktur und Spannungs-Analyse) nutzt Effekte in der magnetischen Hysterese aus [1] und kombiniert basierend auf diesen Effekten drei unabhängige Prüfmethoden mit unterschiedlicher Eindringtiefe und Sensitivität, um im Hinblick auf Störeinflüsse (z.B. Zunder, Restmagnetfelder, Blechtemperatur) im Material eine zuverlässige und stabile Charakterisierung des Werkstoffzustandes zu ermöglichen. Daraus werden bis zu 21 mikromagnetische Merkmale zur Charakterisierung von Materialeigenschaften wie z.B. der Härte extrahiert [2]. Einzelne Merkmale sind bereits von einem Materialkennwert (z.B. Härte) abhängig, sofern keine weiteren überlagerten Einflüsse wie Gefügevariation, Spannungseinfluss, magnetische Restfelder, etc. vorhanden sind. In der Praxis liegt aber oft eine Überlagerung der Einflussgrößen vor. Die Oberflächenhärte führt beispielsweise häufig zu Veränderungen des Eigenspannungszustandes und variierender Einhärtetiefe, hinzu kommen fertigungsbedingte Schwankungen im Bearbeitungsprozess oder chargenbedingte Gefügeschwankungen. Diese Störeinflüsse beeinflussen wiederum die mikromagnetischen Merkmale, so dass sich beim Betrachten eines einzelnen Merkmals Mehrdeutigkeiten ergeben können. Diese Mehrdeutigkeit kann durch eine Verknüpfung mehrerer Merkmale mit Hilfe von maschinellen Lernalgorithmen (sog. Kalibrierung) minimiert werden. Bei der Kalibrierung erfolgt zunächst eine Zuordnung der mikromagnetischen Merkmale zu den entsprechenden Zielgrößen (z.B. Härte) [1]. Wichtig für die Qualität der Kalibrierung ist in der Anlernphase jedoch die valide Kenntnis der Zielgröße an repräsentativen Kalibrierproben. Diese sollten auch die in der Praxis relevante Variation an zusätzlichen Einflussgrößen abbilden. Die Kalibrierung kann hier abhängig von der Aufgabenstellung qualitativ (z.B. Hart / Weich) oder quantitativ (z.B. Härte in HV10) durchgeführt werden. Im Rahmen einer von der Firma ROSEN beauftragten und begleiteten Qualifizierungsstudie wurden für die Praxis relevante Untersuchungen durchgeführt. Ein wesentlicher Punkt betraf die Untersuchung der im Walzwerk vorhandenen Einflussfaktoren und der damit erforderlichen Robustheit und Stabilität des Systems um Hardspots zuverlässig unter Praxisbedingungen zu detektieren.

Qualifizierungsstudie

Zur Qualifizierung des Prüfsystems wurden unterschiedlich bearbeitete Bleche von der Firma ROSEN zur Verfügung gestellt, um

verschiedene Mechanismen der Entstehung von Hardspots (z.B. Aufkohlung oder thermische Behandlung) unter Variation von Zunder und magnetischer Restfelder und Blechtemperatur ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) zu untersuchen (vgl. Abb. 1 oben links und rechts).

Magnetische Restfelder und Zundervariation

Magnetische Restfelder und Zundervariationen treten im Herstellungsprozess bei Stahlblechen als Störgrößen auf. Die genaue Variation der Zunderschicht ist im Stahlherstellungsprozess oft unbekannt. Deshalb wurde der Einfluss des Zunders auf die mikromagnetischen Merkmale bzw. auf das Ergebnis der Kalibrierung untersucht (vgl. entfernter Zunder Abbildung 1 oben links und oben rechts). Analog verhält es sich mit Restmagnetfeldern (vgl. lokale Aufmagnetisierung von ca. 15 A/cm an zwei Stellen auf dem Blech, Abb. 1 unten links). Dies ist vor dem Hintergrund relevant, die Bleche im Stahlwerk oft mit Magnetkränen transportiert werden. Die Kalibrierung wurde mit Hilfe der multiplen linearen Regressionsanalyse durchgeführt.

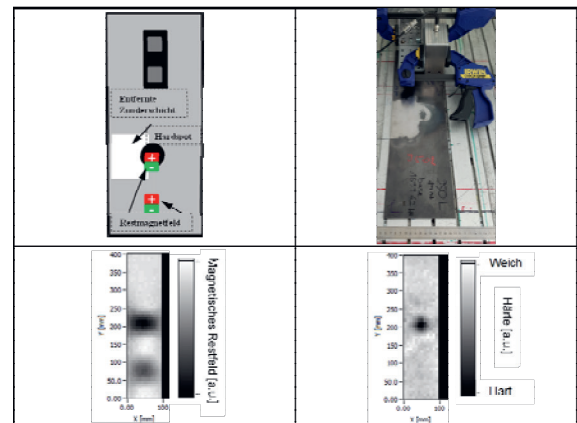


Abb. 1: Darstellung (schematisch) eines Blechs mit partiell entferntem Zunder, magnetischen Restfelder und einer lokalen Aufhärtung von 30 HV (oben links), Foto des Messaufbaus (oben rechts), restfeldabhängiges 3MA-X8 Merkmal Rem (unten links), Ergebnis nach Kalibrierung (unten rechts)

Der Einfluss der Störeinflüsse in den mikromagnetischen Merkmalen wird im Ergebnisbild nach der Kalibrierung kompensiert (vgl. Abb. 1 unten rechts).

Blechtemperatur

Einige der mit dem 3MA-X8 Ansatz extrahierten Merkmale zeigen eine lineare,

signifikante Abhängigkeit von der Blechtemperatur. Zur Untersuchung des Temperaturverhaltens wurde je ein Sensor im Klimaschrank auf einer weichen und auf einer um 30 HV10 aufgehärteten Stelle eines Testblechs positioniert und die Temperatur während der Messung von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ in 20 K Schritten mit einer Haltezeit von vier Stunden variiert (vgl. Abb. 2 oben). In einer getrennten Messreihe wurden Sensor und Blech getrennt den Temperatureinflüssen in der Klimakammer ausgesetzt, um den Einfluss der Temperatur auf beide Einheiten getrennt zu untersuchen mit dem Ergebnis, dass kein signifikanter Temperatureinfluss der Sensoren vorliegt.

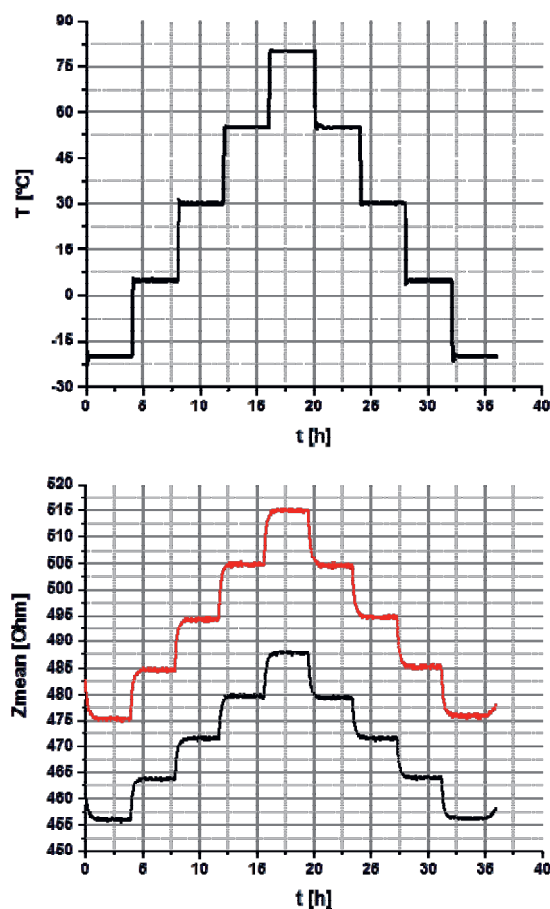


Abb. 2: Temperaturprofil (oben) und Temperaturabhängigkeit von Z_{mean} (unten)

Bei Variation der Blechtemperatur sind verschiedene Merkmale aber stark temperaturabhängig. Das Merkmal Z_{mean} beispielsweise zeigt eine signifikante Temperaturabhängigkeit (vgl. Abb. 2 unten und Abb. 3 oben). Diese Abhängigkeit kann durch aktive Messung der Temperatur mit einem vom magnetischen Verhalten unabhängigen Sensor auf zwei Arten kompensiert werden. Die erste

Möglichkeit ist die Erweiterung des Merkmalsraums um die Temperaturinformation. Statt maximal 21 mikromagnetischer Merkmale erhält man ein weiteres ausschließlich von der Blechtemperatur abhängiges Merkmal, mit deren Hilfe der maschinelle Lernalgorithmus den Temperatureinfluss berücksichtigt und diesen passiv kompensiert. Alternativ zur Erweiterung des Merkmalsraums kann die Information der Blechtemperatur zur aktiven Kompensation des Temperatureinflusses auf die mikromagnetischen Merkmale verwendet werden. Hierzu wird das Verhalten im untersuchten Temperaturbereich ausgenutzt und die betroffenen Merkmale mit Hilfe einer linearen Regression vom Temperatureinfluss kompensiert (vgl. Abb. 3 oben).

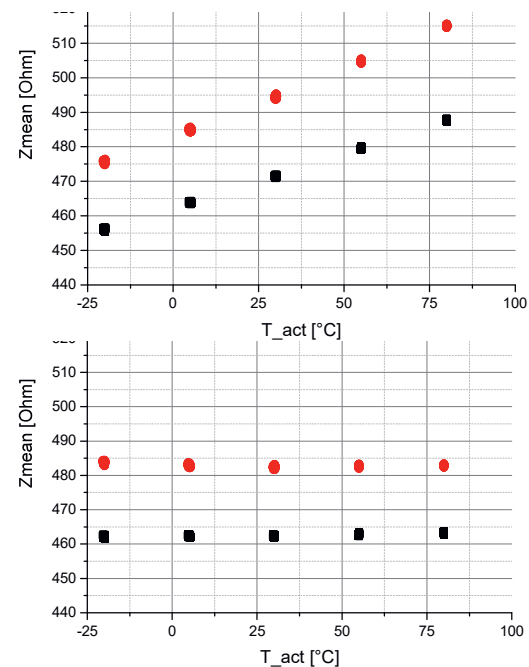


Abb. 3: Temperaturabhängigkeit von Z_{mean} (oben) und Z_{mean} nach der Kompensation (unten)

Beide Möglichkeiten erlauben eine Kompensation des Temperatureinflusses, die Auswahl der Kompensationsmethode ist im Anwendungsfall zu prüfen.

Kalibrierung

Bei der Prüfung von Grobblechen ist der erforderliche Aufwand zum Kalibrieren zu berücksichtigen. Neben den untersuchten Einflussfaktoren variieren zusätzlich noch die Mechanismen, die zu Hardspots auf dem Grobblech führen. Dies führt unter Umständen zu Mehrdeutigkeiten in den Daten der mikromagnetischen Merkmale. Um diese zu kompensieren, ist ein repräsentativer

Probensatz mit in der Praxis vorkommender Variation ggf. für unterschiedliche Stahlqualitäten und Stahlzusammensetzungen erforderlich. Die Erstellung dieses Probensatzes und die Ermittlung der Referenzwerte ist aufgrund der Variationsvielfalt mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand für die Stahlhersteller verbunden, weshalb ein alternativer und im Messbetrieb schneller und wirtschaftlicher Kalibrieransatz erforderlich ist. Als alternativer Kalibrieransatz kann die Kalibrierung des 3MA-X8-Prüfsystems (statt wie bisher im Vorfeld) im laufenden Betrieb stattfinden. Durch Vorgabe einer Schwelle (z.B. 250 HV10) erfolgt eine qualitative Kalibrierung (OK = Härtewert im spezifizierten Bereich / NOK = Härtewert über dem spezifizierten Bereich / ERROR = Materialzustand unbekannt).

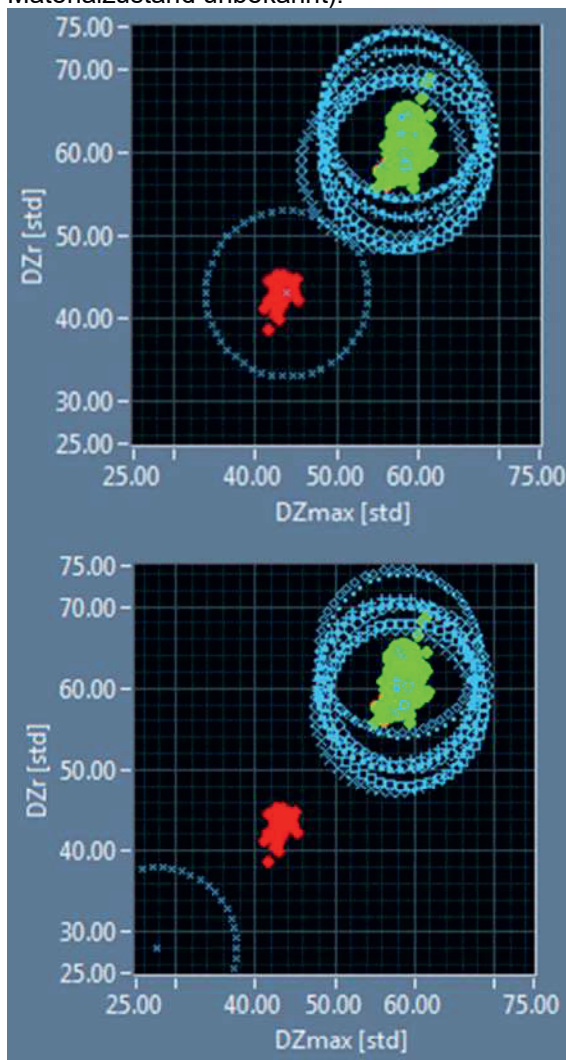


Abb. 4: Einkalibrierte Zustände, OK in grün, NOK in rot (oben) und Zustand ERROR (unten)

Zunächst wird der Sensor auf einer Stelle des Bleches mit einem Härtewert unterhalb des

spezifizierten Bereichs positioniert und als „OK“ kalibriert. Zusätzlich kann das Prüfsystem optional auf einer Stelle mit einem Härtewert oberhalb des spezifizierten Bereichs platziert werden und dieser Zustand als „NOK“ kalibriert werden. Durch Aufnahme verschiedener Positionen auf dem auf Blech können weitere Zustände einkalibriert werden (vgl. Abb. 4). Die Klassifizierung „OK“ / „NOK“ erfolgt mit Hilfe eines „K-Nächste-Nachbar-Klassifikators“. Dieser Klassifikator bewertet den Abstand vom aktuellen Messwert zu den einkalibrierten Daten in der Datenbank. Messwerte nahe den kalibrierten Daten (Kalibrierdaten innerhalb Kreis in Abb. 4 oben) werden entsprechend als „OK“ / „NOK“ klassifiziert, Messwerte ohne ausreichend viele Kalibrierdaten innerhalb des Kreises werden als ERROR klassifiziert (vgl. Abb. 4 unten) und sind mit einem Referenzverfahren nachzuprüfen und in der Kalibrierdatenbank aktualisieren. Liegt die Härte im spezifizierten Bereich, wird diese Position als „OK“ kalibriert. Liegt die Härte über dem spezifizierten Bereich, wird diese Position als „NOK“ kalibriert (vgl. Abb. 5).

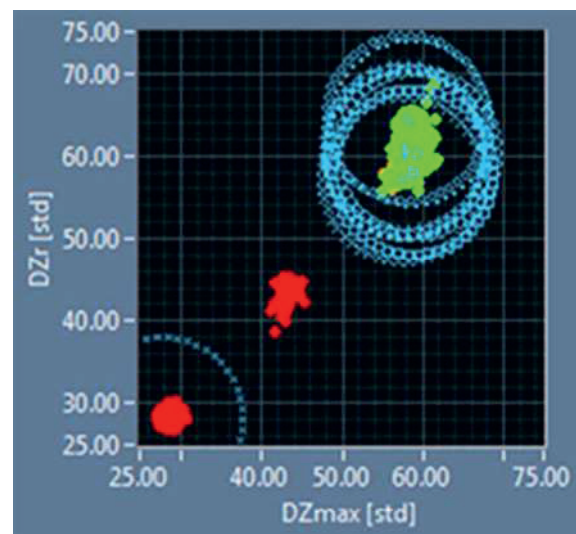


Abb. 5: Aktualisierte Kalibrierdatenbank

Die Visualisierung erfolgt in Form eines Messteppichs, der sich in Echtzeit auf dem Auswerterechner aufbaut. Als „OK“ klassifizierte Messwerte werden in grün, „NOK“ klassifizierte Messwerte werden in orange und als „ERROR“ klassifizierte Messwerte werden in rot dargestellt (vgl. Abb. 6).

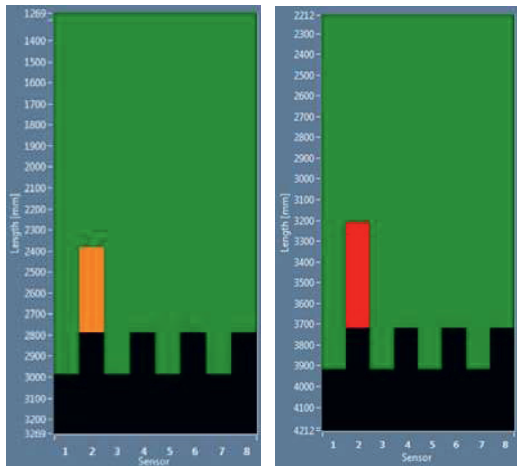


Abb. 6: Messteppich mit OK (grün), NOK (orange) und ERROR (rot)

Dadurch lässt sich mit geringem Aufwand eine flexible und stetig erweiterbare Kalibrierung umsetzen, die unterschiedliche Stähle mit unterschiedlichen Aufhärtungsmechanismen in einer einzigen Kalibrierdatenbank bewerten kann.

3MA-X8 Trolley

Das Prüfverfahren wurde in einen achtkanaligen Handwagens zur flächen-deckenden Detektion von Hardspots auf Grobblechtafeln implementiert (vgl. Abb. 7).



Abb. 7: 3MA-X8 Handwagen

Anforderungen an den Handwagen sind die Detektion lokaler Härteinhomogenitäten mit einem Durchmesser von mindestens 10 mm

und einer Aufhärtung von 30 HV10 bei einer Prüfgeschwindigkeit von maximal 1 m/s im Temperaturbereich von 20 °C bis 50 °C. In diesem Temperaturbereich ist eine keine Kompensation des Temperatureinflusses erforderlich. Wesentliche Baugruppen dieses Handwagens sind zwei versetzt angeordnete vierkanalige Sensorzeilen mit einer Prüfbreite von 240 mm, ein Weggeber zur positionsgetreuen Zuordnung der Messungen und zur Detektion von Prüfgeschwindigkeiten oberhalb 1 m/s. Die Ergebnisse werden in der Bediensoftware (vgl. Abb. 8) als Messteppich in Form einer OK (grün) / NOK (orange) Verteilung dargestellt, auf Fehlfunktionen der Sensoren oder einer zu schnellen Bewegung über das Blech wird in der Software hingewiesen.



Abb. 8: 3MA-X8 Bediensoftware

3MA-X8 Prüfanlage

Aktuell wird das Prüfverfahren in Kooperation mit der Firma ROSEN in eine online laufende Hardspot-Prüfanlage implementiert. Die Prüfanlage basiert auf einem modularen Konzept, dass sich für konventionelle Ultraschall-Blechprüfanlagen bewährt hat. Je nach Applikation und zu verwendender Technologie können unterschiedliche Module konfiguriert werden. Abb. 9 zeigt einen Überblick über die allgemeine Konfiguration der Prüfanlage.



Abb. 9: Allgemeine Konfiguration der Prüfanlage

Das Grundkonzept der Hardspot-Prüfanlage basiert auf zwei stabilen Rahmen für die Flächenprüfung. Entsprechende Prüfwagen können zur Wartung oder bei Nutzung des Rollgangs ohne Prüfung aus dem Rollgang herausgefahren werden. Die Flächenprüfwagen sind positionierbar ausgeführt. Damit ist eine optimale Ausrichtung der Prüfkopfhalterungen in Abhängigkeit von der Blechbreite möglich. Die Prüfwagen bestehen aus modularen Prüfgruppen mit jeweils 8 Sensorhalterungen. Entsprechend der zu prüfenden Blechbreite wird die benötigte Anzahl an den Prüfwagenrahmen angebaut. Die Sensorhalterungen sind über Pneumatikzylinder anstellbar und sind beweglich ausgeführt, so dass sie der Blechoberfläche folgen können (vgl. Abb. 10 oben).

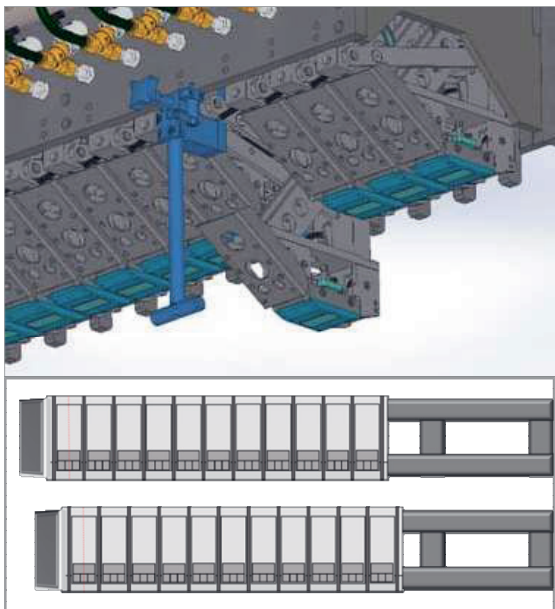


Abb. 10: Sensorhalterung (oben) und versetzte Prüfwagen (unten)

Zwischen den einzelnen Halterungen eines Prüfwagens entsteht eine Prüflücke, die durch eine versetzte Anordnung auf dem zweiten Prüfwagen aufgefüllt wird (vgl. Abb. 10 unten).

Parallel erfolgt die verfahrensseitige Implementierung. Hierfür wurde am Fraunhofer IZFP ein FPGA-basierter IP-core (IP = Intellectual Property) entwickelt der die Extraktion der 21 mikromagnetischen Merkmale in Echtzeit aus bis zu acht parallel arbeitenden Prüfkänen ermöglicht. Diese Variante eignet sich insbesondere zur Integration in kundenspezifische, automatisierte Prüfanlagen, da hier die besonders zeitkritischen Verarbeitungsschritte und die Reduktion der Daten unmittelbar hinter

dem Sensor stattfinden und nur die Ergebnisse an eine Leitstelle übermittelt werden müssen. Zusammen mit dem streng deterministischen Zeitverhalten der hardwarebasierten Verarbeitung können, unter Nutzung mehrerer Instanzen der IP, automatisierte Prüfanlagen mit einer großen Anzahl an parallel arbeitenden Prüfkänen realisiert werden. Die IP kann von Kunden leicht in seine eigene FPGA Infrastruktur eingebunden und verwendet werden (vgl. Abb. 11).

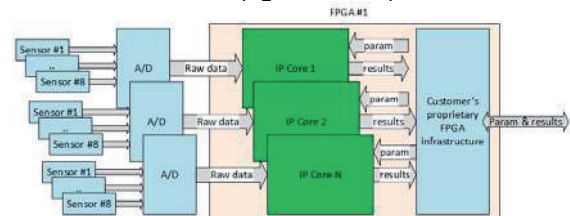


Abb. 11: FPGA-Infrastruktur

Die hardwarebasierte Merkmalsextraktion wird ergänzt von einer speziell für den industriellen Einsatz entwickelten Signalanregungsstufen- und Signalaufnahmeelektronik (vgl. Abb. 12). Bei der Entwicklung standen hierbei Platzersparnis sowie Energieeffizienz im Vordergrund. Um insbesondere die Abwärme bei der Erzeugung der Magnetisierungsströme zu reduzieren wurde ein achtkanaliges Klasse-D Endstufenkonzept entwickelt und implementiert. Das energieeffiziente Design ermöglicht die vollständig passive Kühlung aller Elektronikkomponenten und damit deren Integration in sensornahe, hermetisch verschlossene Gehäuse.

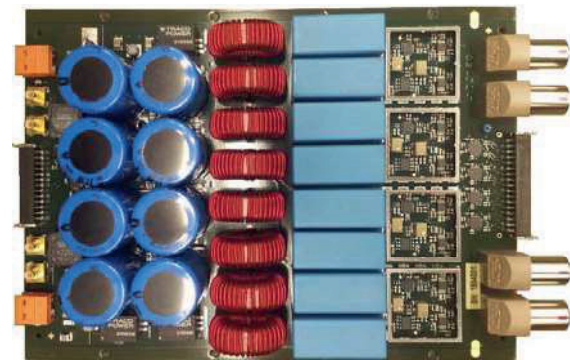


Abb. 12: FPGA-Infrastruktur

Literaturnachweis

- [1] Kneller, E.: Ferromagnetismus. Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg. 1962.
- [2] Youssef, Sargon, Cyril Zimmer, Klaus Zielasko, Andreas Schütze: "Bewertung subjektiver und automatisierter Merkmalsextraktion periodischer Zeitsignale am Beispiel des 3MA-X8-Verfahrens" in - Technisches Messen, 0.0 (2019): Retrieved 24 Jan. 2019, from doi:10.1515/teme-2018-0074