Mikromagnetische Detektion von Hardspots an Grobblechen

Sargon YOUSSEF [1], Meisam AMIRI [1], Amir YOUSSEF [1], Sergey PUSHKAREV [1], Daniel MOLENDA [2], Horst BALLMANN [3]
[1] Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken
[2] ROSEN Technology and Research Center GmbH, Lingen
[3] ROSEN Germany GmbH, Stutensee

Kontakt E-Mail: sargon.youssef@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung. Um den hohen Qualitätsansprüchen von Stahlerzeugnissen gerecht zu werden, ist bereits eine hohe Qualität des Ausgangsmaterials erforderlich. Die Homogenität der mechanisch-technologischen Eigenschaften, wie z.B. die Härte bei Grobblechen, stellt ein wichtiges Qualitätsmerkmal dar. Beispielsweise dürfen Pipelinestähle für den Sauergaseinsatz eine Härte von 250 HV10 nicht überschreiten. Für diese Aufgabenstellung wurde das am Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP entwickelte 3MA-X8 Prüfsystem (3MA = Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse) zur Detektion von lokalen Härteinhomogenitäten (sogenannte Hardspots) weiterentwickelt und für den Praxiseinsatz optimiert. Dieses System kombiniert drei unabhängige Prüfverfahren mit unterschiedlicher Eindringtiefe und Sensitivität, um im Hinblick auf Störeinflüsse (z.B. Restmagnetfelder, Zunder) im Material eine stabile und zuverlässige Bewertung zu ermöglichen. Aus diesen Prüfverfahren werden charakteristische Merkmale extrahiert, die mit Hilfe von maschinellen Lernalgorithmen und einer mobilen Härteprüfung als Referenzmethode eine Auflösung von Härteunterschieden von mindestens +/- 30 HV10 bei einem minimalen Durchmesser von 10 mm detektieren. Im Rahmen einer von der Firma ROSEN beauftragten und begleiteten Qualifizierungsstudie wurden praxisrelevante Untersuchungen durchgeführt. Ein wesentlicher Punkt dieser Studie war die Untersuchung der im Walzwerk vorhandenen Einflussfaktoren und der damit verbundenen Robustheit und Stabilität des Systems um Hardspots zuverlässig unter Praxisbedingungen zu detektieren.

1. Ausgangssituation

Stahlerzeugnisse sowie Komponenten im Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbau unterliegen hohen Qualitätsansprüchen. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, ist bereits eine hohe Qualität des Ausgangsmaterials erforderlich. Die Homogenität der mechanisch-technologischen Eigenschaften, wie z.B. die Härte bei Grobblechen, stellt ein wichtiges Qualitätsmerkmal dar.
Der Bedarf an der zerstörungsfreien Charakterisierung der Materialeigenschaften von Grobblechen für die Pipelineindustrie ist in den letzten Jahren stark gestiegen. Nach ISO15156, NACE MR0175 oder DNV-OS-F101 dürfen die Stähle für den Sauergaseinsatz eine Härte von 250 HV10 nicht überschreiten. Ab Härtewerten von ca. 300 HV10 reduziert sich die Dehnbarkeit bei kohlenstoffhaltigen Stählen und die Anfälligkeit auf Materialfehler

Lizenz: https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.de

sowohl beim Verlegen der Rohre, als auch während des Betriebs erhöht sich. Aus wirtschaftlichen Gründen werden von den Betreibern oft höhere Stahlgüten (z.B. X60, X65, etc.) auch für Pipelines mit saurem Medium bevorzugt eingesetzt. Höhere Stahlgüten weisen eine höhere Grundhärte des Materials auf; X65 beispielsweise besitzt eine Grundhärte von ca. 220 HV10. Die Differenz zur erlaubten Maximalhärte von Sauergasanwendungen beträgt ca. 30 HV10. Ab Härtewerten von etwa 300 HV10 reduziert sich die Dehnbarkeit bei kohlenstoffhaltigen Stählen und die Anfälligkeit auf Materialfehler sowohl beim Verlegen der Rohre, als auch während des Betriebs erhöht sich.

2. Aufgabenstellung

Aus diesem Grund suchen Grobblechhersteller und deren Kunden, entweder als Rohrlieferant oder als Endanwender nach geeigneten Möglichkeiten, diese Härteinhomogenitäten (engl. Hardspots) sicher zu detektieren, um die Qualität des gesamten Blechs bereits nach dem Walzprozess beurteilen zu können. Für diese Aufgabenstellung sind relevante Härteunterschiede von +/- 30 HV10 bei einem minimalen Durchmesser von 10 mm zu detektieren.

3. Prüfverfahren 3MA-X8

Das am Fraunhofer IZFP entwickelte 3MA-X8 Verfahren (3MA = Mikromagnetische Multiparameter Mikrostruktur und Spannungs-Analyse) nutzt Effekte in der magnetischen Hysterese und kombiniert drei unabhängige Prüfmethoden mit unterschiedlicher Eindringtiefe und Sensitivität, um im Hinblick auf Störeinflüsse (z.B. Restmagnetfelder, Zunder) im Material eine stabile und zuverlässige Charakterisierung des Werkstoffzustandes zu ermöglichen. Daraus werden bis zu 21 mikromagnetische Merkmale zur Charakterisierung von Materialeigenschaften wie z.B. der Härte extrahiert. Einzelne extrahierte Merkmale sind bereits von einem Materialkennwert (z.B. Härte) abhängig, sofern keine weiteren Einflussgrößen (Gefügevariation, Spannungseinfluss, magnetische Restfelder, etc.) vorliegen. In der Praxis liegt jedoch häufig eine Überlagerung der Einflussgrößen vor. Die Oberflächenhärte führt beispielsweise häufig zu Veränderungen des Eigenspannungszustandes bzw. unterschiedlichen Einhärtetiefen. Hinzu kommen fertigungsbedingte Schwankungen im Bearbeitungsprozess oder chargenbedingte Gefügeschwankungen. Diese sogenannten Störeinflüsse wiederum beeinflussen ebenfalls die mikromagnetischen Merkmale, so dass sich beim Betrachten eines einzelnen Merkmals Mehrdeutigkeiten ergeben. 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. Die Kalibrierproben sollten auch die in der Praxis relevante Variation an zusätzlichen Einflussgrößen abbilden. Die Kalibrierung kann hier abhängig vom eingesetzten Lernalgorithmus qualitativ (z.B. Hart / Weich) oder quantitativ (z.B. Härte in HV10) erfolgen.
Im Rahmen einer von der Firma ROSEN beauftragten und begleiteten Qualifizierungsstudie wurden praxisrelevante Untersuchungen durchgeführt. Ein wesentlicher Punkt dieser Studie betraf die Untersuchung der im Walzwerk vorhandenen Einflussfaktoren und der damit verbundenen Robustheit und Stabilität des Systems um Hardspots zuverlässig unter Praxisbedingungen zu detektieren.

4. Qualifizierungsstudie

Zur Qualifizierung des Prüfsystems wurden unterschiedliche Bleche von der Firma ROSEN bearbeitet und zur Verfügung gestellt, um verschiedene Mechanismen der Entstehung von Hardspots (z.B. Aufkohlung oder thermische Behandlung) unter Variation von Zunder und magnetischer Restfelder und Temperatur (-20 °C – 80 °C) zu untersuchen. Die Einflussfaktoren wurden größtenteils unabhängig voneinander betrachtet, um die prinzipielle Eignung des Verfahrens für die Anwendung im Stahlwerk zu demonstrieren.

4.1. Zunder und magnetische Restfelder

Zundervariationen und magnetische Restfelder treten im Herstellungsprozess bei Stahlblechen als Störeinflüsse auf. Die genaue Variation der Zunderschicht ist im Stahlherstellungsprozess häufig unbekannt. Aus diesem Grund wurde der allgemeine 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 Abbildung 1 unten links). Häufig werden die Bleche im Stahlwerk mit Magnetkränen transportiert Die Kalibrierung wurde mit Hilfe der multivariaten Regressionsanalyse erstellt.

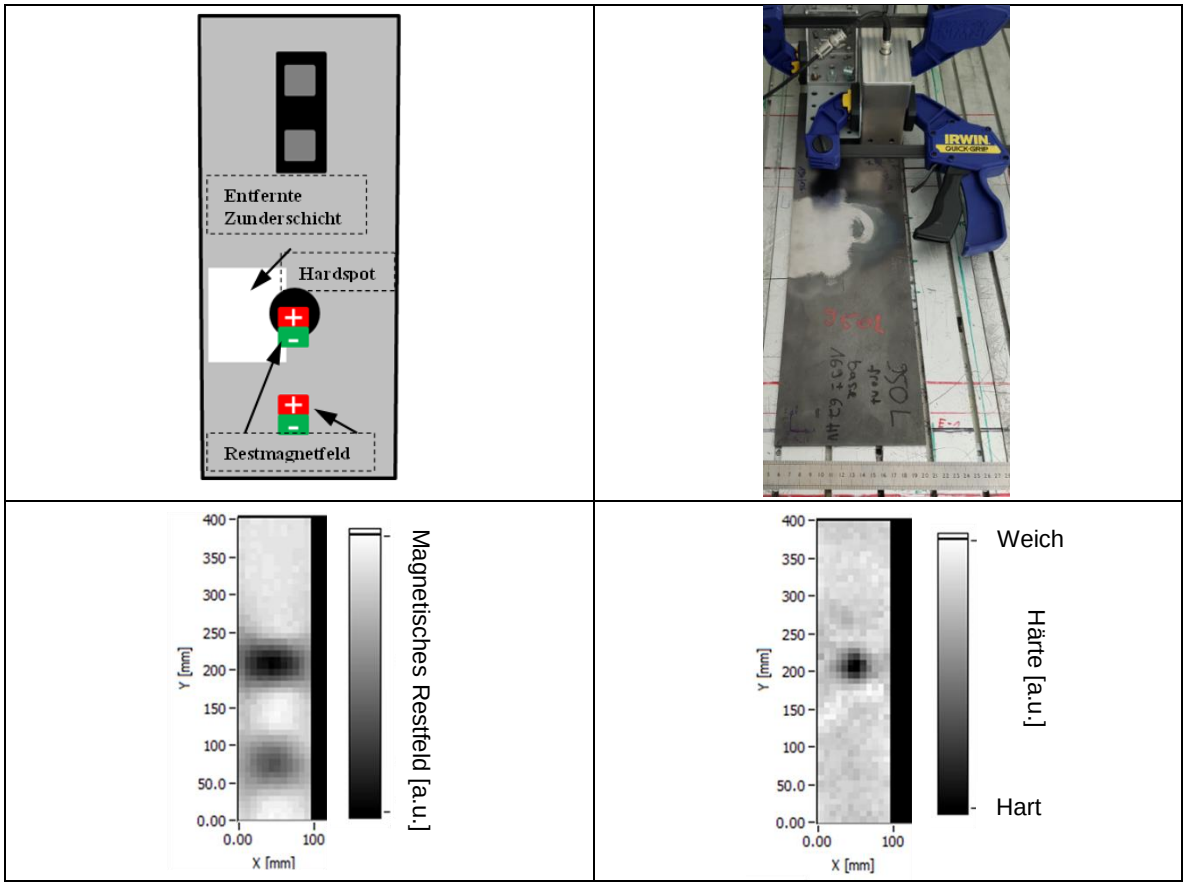

Abbildung 1: Schematische Darstellung des vermessenen Blechs mit entferntem Zunder, Restmagnetfeld und einer lokalen Aufhärtung von 30 HV (oben links), Foto des Messaufbaus, (oben rechts) restmagnetfeldabhängiges 3MA-X8 Merkmal Rem (unten links), Ergebnis nach Kalibrierung (unten rechts)

Der Einfluss der Störgrößen in den mikromagnetischen Merkmalen ist im Ergebnisbild nach der Kalibrierung kompensiert (vgl. Abbildung 1 unten rechts).

4.2. Temperatur

Einige der mit dem 3MA-X8 Ansatz extrahierten Merkmale zeigen eine lineare, signifikante Abhängigkeit von der Blechtemperatur. Zur Untersuchung des Temperaturverhaltens wurde die Probe mit Sensor im Klimaschrank sowohl auf einer weichen als auch auf einer um 30 HV10 aufgehärteten Position platziert und die Temperatur während der Messung von -20 °C bis 80 °C in 20 K Schritten mit einer Haltezeit von vier Stunden variiert (vgl. Abbildung 2 links). 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 existiert.
Das Merkmal Zmean zeigt eine signifikante Temperaturabhängigkeit (vgl. Abbildung 2 rechts und Abbildung 3 links). Diese Abhängigkeit kann durch aktive Messung der Temperatur mit einem vom magnetischen Verhalten unabhängigen externen 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 passiv kompensiert.

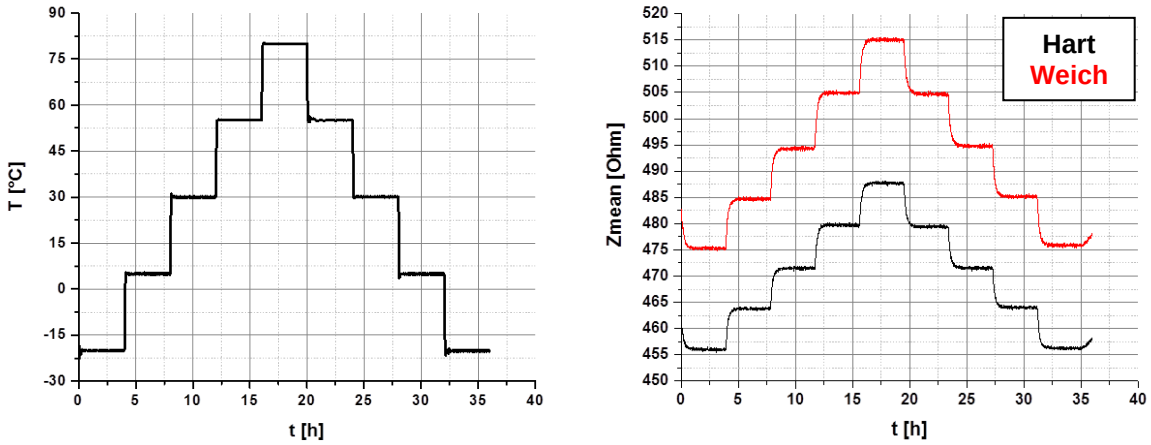

Abbildung 2: Temperaturprofil (links) und Temperaturabhängigkeit des Merkmals Zmean (rechts)

Alternativ zur Erweiterung des Merkmalsraums kann die Information der Blechtemperatur zur aktiven Kompensation des Temperatureinfluss auf die Merkmale verwendet werden. Hierzu wird das Verhalten im untersuchten Temperaturbereich ausgenutzt und die betroffenen Merkmale mit Hilfe einer linearen Regression vom Temperatureinfluss kompensiert (vgl. Abbildung 3 rechts).

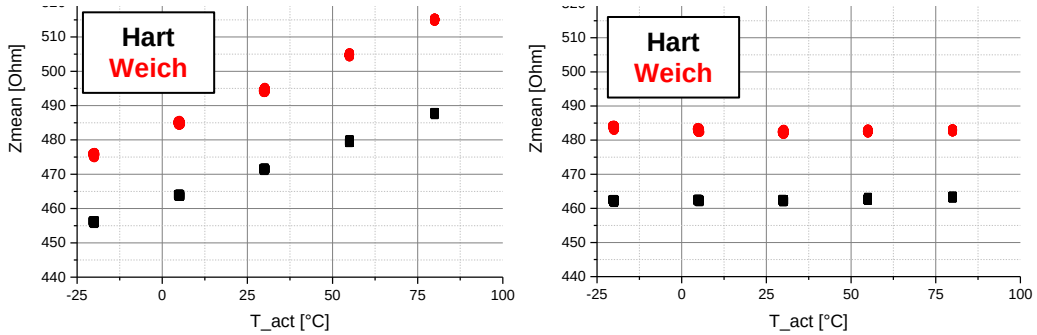

Abbildung 3: Zmean vor (links) und nach (rechts) der aktiven Temperaturkompensation des Merkmals Zmean

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

5. Anwendung und gerätetechnische Umsetzung zur Detektion von Hardspots an Grobblechen

5.1. Kalibrierung

In der Praxis ist bei der Prüfung von Grobblechen der Aufwand zum Kalibrieren zu berücksichtigen. Neben den in der Qualifizierungsstudie untersuchten Einflussfaktoren variieren zusätzlich noch die Mechanismen, die zu Hardspots auf dem Grobblech führen. Dies führt teilweise zu Mehrdeutigkeiten in den mikromagnetischen Merkmalen. Um diese Einflussgrößen zu kompensieren, ist ein repräsentativer Probensatz mit in der Praxis vorkommender Variation ggf. für unterschiedliche Stahlqualitäten und Stahlzusammensetzungen erforderlich. Sowohl die Erstellung dieses Probensatzes, als auch die Ermittlung der Referenzwerte ist aufgrund der Variationsvielfalt mit einem sehr 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 quantitativen Schwelle (z.B. 250 HV10) erfolgt eine qualitative Kalibrierung (OK = Härtewert im spezifizierten Bereich / NOK = Härtewert über dem spezifizierten Bereich / ERROR = Materialzustand unbekannt). Zunächst wird das Prüfsystem 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 positioniert werden und dieser Zustand als „NOK“ kalibriert werden. Durch Bewegen des Trolleys über das Blech werden weitere Positionen auf dem Blech gemessen.

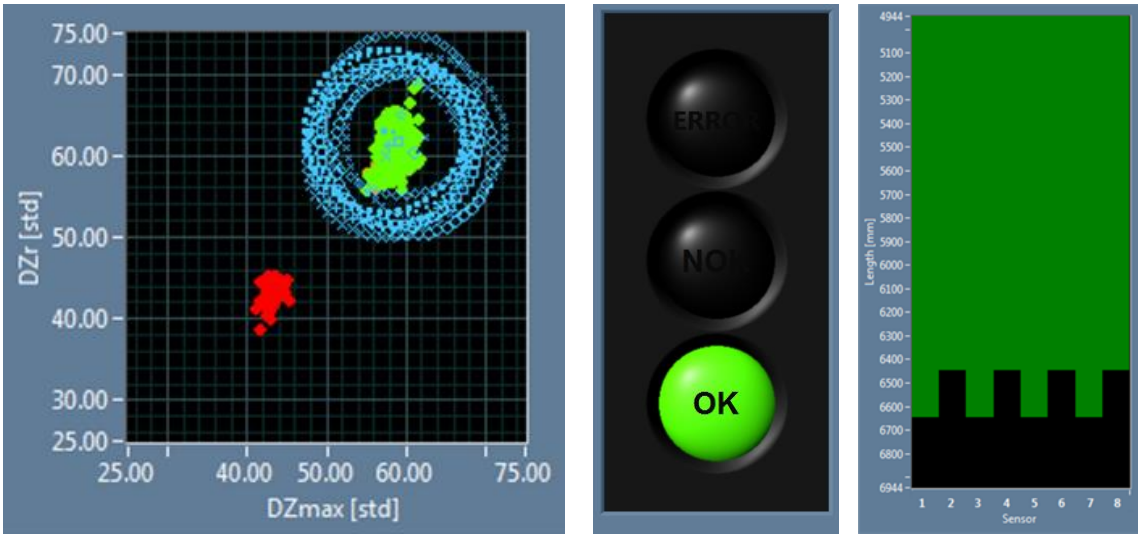

Abbildung 4: "OK" und "NOK" kalibrierte Datenbank (links), als "OK" klassifizierte Messung des Werkstoffzustands (Mitte), Ergebnisbild des Handwagens auf einem Blech ohne lokale Aufhärtung (rechts)

Die Klassifizierung „OK“ / „NOK“ erfolgt mit Hilfe eines „K-Nächste-Nachbar-Klassifikators“. Dieser Klassifikator bewertet den Abstand vom aktuellen Messwert zu den kalibrierten Daten in der Datenbank. Messwerte nahe den kalibrierten Daten (Kalibrierdaten innerhalb Kreis Abbildung 4 - Abbildung 7 links) werden künftig entsprechend als „OK“ / „NOK“ klassifiziert (vgl. Abbildung 4, Abbildung 5 und Abbildung 7 Mitte).

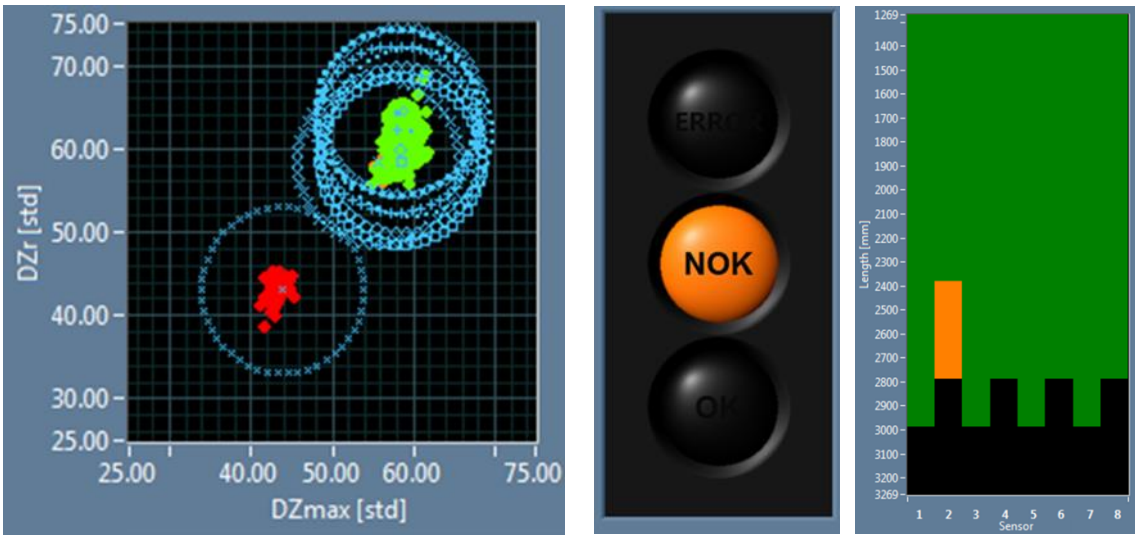

Abbildung 5: "OK" und "NOK" kalibrierte Datenbank (links), als "NOK" klassifizierte Messung des Werkstoffzustands (Mitte), Ergebnisbild des Handwagens auf einem Blech mit lokaler Aufhärtung auf Kanal 2 des Sensorarrays (rechts)

Signifikante Abweichungen von den kalibrierten Daten werden als „ERROR“ gekennzeichnet (vgl. Abbildung 6 Mitte) entsprechen einem unbekannten Materialzustand und sind mit einer geeigneten Referenzmethoden (z.B. Rückprall-Härteprüfung nach Leeb) nachzuprüfen und entsprechend in der Kalibrierdatenbank zu aktualisieren.

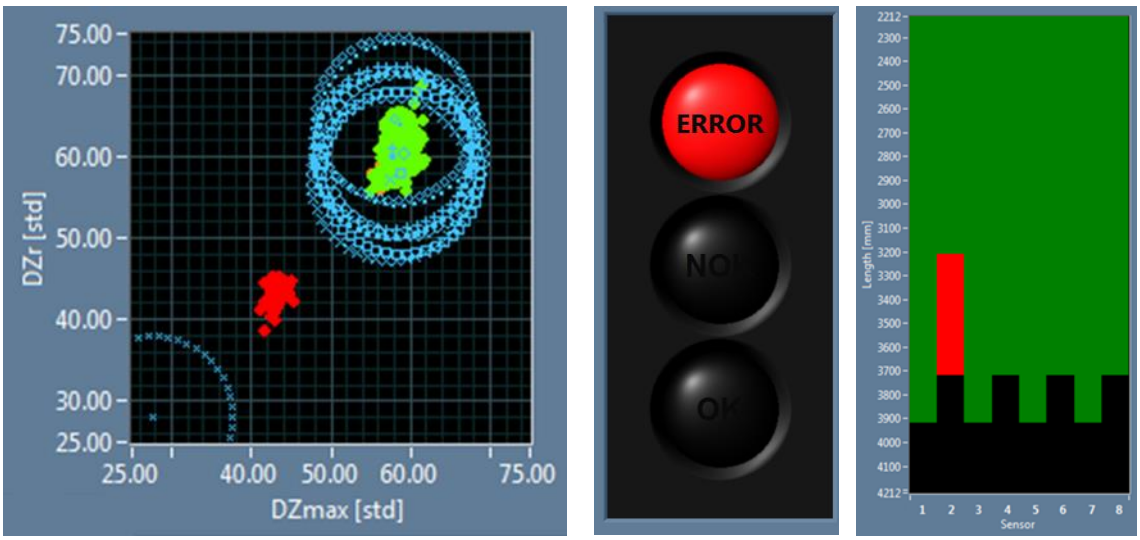

Abbildung 6: "OK" und "NOK" kalibrierte Datenbank (links), als "ERROR" klassifizierte Messung des Werkstoffzustands (Mitte), da keine Kalibrierdaten im spezifizierten Bereich (Kreis), Ergebnisbild des Handwagens auf einem Blech mit unbekanntem Materialzustand auf Kanal 2 (rechts)

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.
Die Ergebnisdarstellung 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.

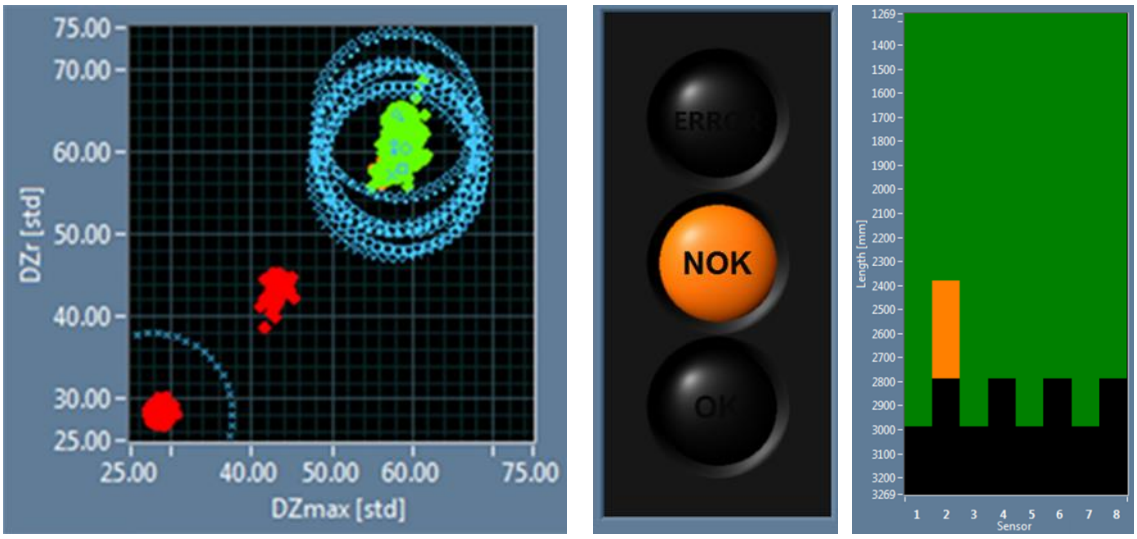

Abbildung 7: "OK" und "NOK" kalibrierte Datenbank (links), als "NOK" klassifizierte Messung des Werkstoffzustands (Mitte), Ergebnisbild des Handwagens auf einem Blech mit lokaler Aufhärtung (rechts) nach Aktualisierung der Kalibrierdatenbank

Auf diese Art und Weise lässt sich mit geringem Aufwand eine flexible und stetig erweiterbare Kalibrierung realisieren, die unterschiedliche Stähle mit unterschiedlichen Aufhärtungsmechanismen in einer einzigen Kalibrierdatenbank bewerten kann.

5.2. Gerätetechnische Umsetzung (Trolley)

Die Implementierung des Prüfverfahrens erfolgte in Form eines achtkanaligen Handwagens zur flächendeckenden Detektion von Hardspots auf Grobblechtafeln (vgl. Abbildung 8 links). Die Anforderung an den Handwagen ist 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 Kompensation Temperatureinflusses nicht erforderlich. Wesentliche Baugruppen dieses Handwagens sind zwei versetzt angeordnete vierkanalige Sensorzeilen mit einer Gesamtprüfbreite von 240 mm, ein Weggeber zur ortsgetreuen Zuordnung der Messungen und zur Detektion von Prüfgeschwindigkeiten oberhalb 1 m/s. Die Ergebnisse werden in der Software als Messteppich in Form einer OK (grün) / NOK (orange) Verteilung dargestellt (vgl. Abbildung 8 rechts). Auf Fehlfunktionen der Sensoren oder einer zu schnellen Bewegung über das Blech wird in der Software hingewiesen.

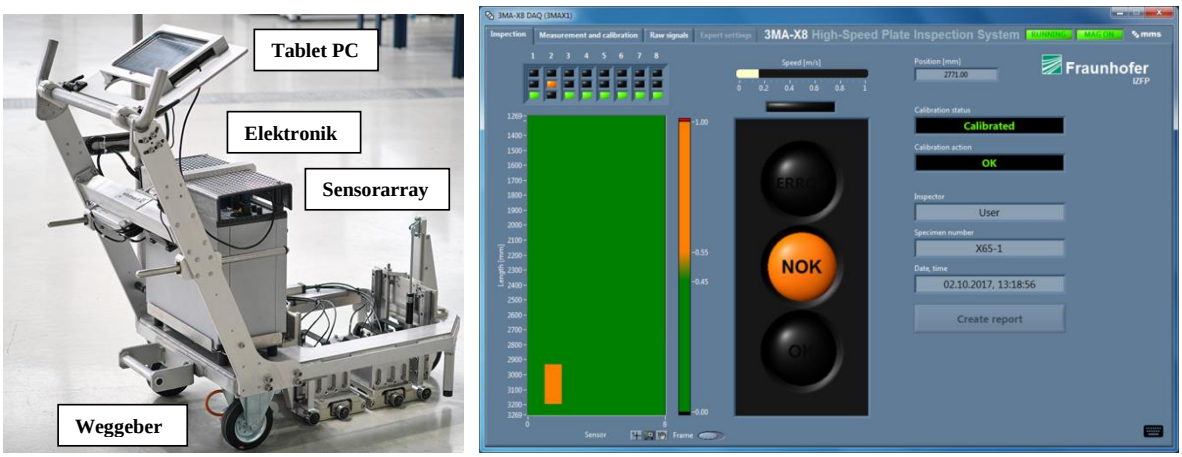

Abbildung 8: Achtkanaliger Handwagen (links) und Darstellung der Software im Prüfbetrieb (rechts)

6. Zusammenfassung

Der wesentliche Vorteil der 3MA-X8-Prüftechnik liegt in der Robustheit und Stabilität des Prüfverfahrens im Hinblick auf Störeinflüsse im Walzwerk, verbunden mit einer flexiblen, mit wenig Aufwand stetig erweiterbaren Möglichkeit zur Kalibrierung des Prüfsystems. Hinzu kommen noch eine hohe Messgeschwindigkeit und die Mehrkanalfähigkeit.
Mit Hilfe von maschinellen Lernalgorithmen und einer mobilen Härteprüfung als Referenzmethode erlaubt das 3MA-X8 Verfahren die Detektion von Härteunterschieden von mindestens 30 HV10 bei einem minimalen Durchmesser von 10 mm und wurde bereits in Stahlwerken unter realen Bedingungen an Grobblechen demonstriert.

Literatur

[1] Altpeter, I., Becker, R., Dobmann, G., Kern, R., Theiner, W., Yashan, A.: Robust Solutions of Inverse Problems in Electromagnetic Non-Destructive Evaluation, in: Inverse Problems 18, 2002, S. 1907-1921