

Zerstörungsfreie Bestimmung von Qualitätsmerkmalen bei der Grobblechfertigung

B. Wolter, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken
O.-W. Buchholtz, ThyssenKrupp Stahl, Duisburg
U. Hofmann, Dillinger Hüttenwerke, Dillingen
P. Meilland, Arcelor Research, Maisières-lès-Metz (F)
R. Kern, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken
E. Schneider Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

Zusammenfassung

Der Einsatz der zerstörungsfreien Prüfung während oder unmittelbar nach dem Wärmebehandlungs- und Walzprozess ist ein wichtiges Hilfsmittel, um den steigenden Anforderungen hinsichtlich der Bestimmung und der Dokumentation der Produkt- und Prozessqualität in der Grobblechfertigung zu genügen. Basierend auf einem elektromagnetischen Multiparameter-Ansatz wurde ein Messverfahren entwickelt, das eine schnelle zerstörungsfreie Prüfung von Walzprodukten und damit eine kontinuierliche Überwachung der Produktqualität im Grobblechwalzwerk erlaubt. Mit dieser Prüftechnik können die Härte- und Festigkeitswerte in Grobblechen nach einer vorangegangenen Kalibrierung im Sekundentakt bestimmt werden. Wie gut die zerstörungsfrei ermittelten Messwerte mit den im Prüflabor zerstörend bestimmten Ergebnissen übereinstimmen, hängt wesentlich davon ab, wie effektiv störende Einflussparameter wie z. B. Zunderschichten, Gefügegradienten und Texturen, durch den Transport mit Elektromagneten bedingte remanente Magnetfelder oder auch mechanische Spannungen durch eine geeignete Kalibrierung unterdrückt werden können.

Key words: 3MA, Grobblech, Härte, Streckgrenze, Zugfestigkeit

1. Einleitung

Grobblech ist warmgewalztes Stahlblech mit einer Dicke von mehr als 3 mm. Es wird heutzutage in praktisch allen legierten und unlegierten Stahlsorten bei maximalen Dicken von mehr als 400 mm geliefert. Eingesetzt wird Grobblech zum Bau von Konstruktionen, die höchsten Lasten ausgesetzt sind, z. B. bei Containerschiffen, Baumaschinen, Kränen, Druckbehältern, Ölplattformen und Windkraftanlagen. Prominente Beispiele sind der Petronius Tower, die mit 564 m höchste Offshore-Ölplattform der Welt oder die so genannten Post-Panamax-Schiffe - Containerschiffe, die breiter sind als der Panama-Kanal.

Gefordert werden vermehrt höherfeste Stahlqualitäten, um die Konstruktionsdicken und damit das Eigengewicht reduzieren zu können. Diese müssen unter normalen Bedingungen immer noch gut schweißbar sein. Daneben werden oft auch eine gute Kaltzähigkeit und geringe Maßtoleranzen gefordert. Zur Darstellung solcher Stahlgüten kommen moderne Herstellungsverfahren, wie das normalisierende und thermomechanische Walzen, die Intensivkühlung, die Wasser/Luft-Vergüten, etc. zum Einsatz.

Gerade bei Walzprodukten muss eine hohe Gleichmäßigkeit der geometrischen und mechanischen Eigenschaften über Produktlänge und -querschnitt sichergestellt werden. Die hohen Anforderungen hinsichtlich der Bestimmung und der Dokumentation der Produktqualität bedingen umfangreiche Prüfungen. Oberflächenkontrolle, Form- und Maßkontrolle erfolgen im Produktionsfluss am Blech selbst. Auch die 100%-Fehlerprüfung mit prozessintegrierten oder mobilen Ultraschallsystemen gehört mittlerweile zum Stand der Technik [1, 2, 3].

Zur Prüfung der mechanisch-technologischen Eigenschaften werden aber immer noch Coupons aus der Walztafel der laufenden Produktion geschnitten. Die Bestimmung von Streckgrenze bzw. 0.2-Dehngrenze und Zugfestigkeit erfolgt anschließend im Prüflabor im standardisierten Zugversuch. Für Härteprüfungen muss die Oberfläche des Prüfstücks von Zunder und entkohnten Randschichtbereichen befreit werden. Diese Stichprobenprüfungen sind zeit- und kostenaufwendig. Für ein mittelgroßes Walzwerk fallen dadurch Kosten in Höhe von mehreren hundert tausend Euro allein durch den Materialschrott an. Daher besteht der Wunsch, auch die mechanisch-technologische Prüfung durch geeignete zerstörungsfreie Prüfungen zu ersetzen. Der Prüfvorgang kann dadurch vom Bereich der Qualitätssicherung in den Bereich der Fertigung verlagert werden. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung und Dokumentation der Produkt- und Prozessqualität.

Ziel eines durch die EGKS (Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl) geförderten Forschungsprojektes war die Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der zerstörungsfreien 3MA-Messtechnik zur Prüfung der Qualitätsmerkmale und der Homogenität von Grobblechen unmittelbar nach der Fertigung. Als Prüfkörper kamen hierbei Coupons aber auch ganze Walztafeln aus verschiedenen Stahlgüten und Wärmebehandlungszuständen mit Blechdicken zwischen 20 und 100 mm zum Einsatz. Die Forschungsarbeiten wurden in Zusammenarbeit mit den Unternehmen Dillinger Hütte AG, Arcelor Research, Fabrique de Fer, Salzgitter AG und ThyssenKrupp-Stahl AG durchgeführt.

2. Prüftechnik: 3MA

Am Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) werden u. a. elektromagnetische Prüfverfahren entwickelt, mit denen mechanisch-technologische Eigenschaften von ferromagnetischen Werkstoffen bestimmt werden können. Diese Verfahren basieren auf der Wechselwirkung der magnetischen Struktur (Bloch-Wandbewegungen und magnetische Domänen) mit der Mikrostruktur und den mechanischen Spannungsfeldern des Werkstoffs. Verändert sich die Mikrostruktur (Zusammensetzung, Gitterfehler, 2te Phasen, etc.) oder der Eigenspannungszustand des Werkstoffs, so beeinflusst dies nicht nur seine mechanisch-technologischen sondern auch dessen elektromagnetischen Eigenschaften. Daher kann indirekt aus den elektromagnetischen Eigenschaften auf beispielsweise Härte, Streckgrenze oder Zugfestigkeit geschlossen werden. Die so genannte 3MA-Messtechnik (Mikromagnetische Multiparameter Mikrostruktur und Spannungsanalyse, Bild 1) stellt eine Kombination mehrerer elektromagnetischer Prüfverfahren dar.



Bild 1: 3MA-Prüfsystem mit Sensor

Das für die hier beschriebenen Untersuchungen eingesetzte 3MA-Prüfgerät nutzt die Prüfverfahren

- Mehrfrequenzwirbelstrom (3MA-MFWS),
- Überlagerungspermeabilität (3MA-IP),
- Oberwellenanalyse der tangentialen Magnetfeldstärke (3MA-UH),
- Magnetisches Barkhausenrauschen (3MA-M).

Aus dieser Verfahrenskombination können bis zu 22 unterschiedliche Messgrößen genutzt werden, die in unterschiedlicher Weise auf Gefüge- und Spannungseinflüsse reagieren. Das Prüfsystem erlaubt es, diese Messgrößen mit einem einzigen Aufsatz-Prüfkopf simultan aufzunehmen. Das Prüfsystem ist unter dem Namen „KEMAG-Verfahren“ in der VDI/VDE-Richtlinie 2616 unter den nicht genormten Verfahren zur Härteprüfung an ferromagnetischen Materialien empfohlen.

3. Physikalischer Hintergrund

Die Abhängigkeiten zwischen den elektromagnetischen Messgrößen und den Mikrostruktureigenschaften, welche die mechanisch-technologischen Kennwerte bestimmen, sind vor allem bei den technischen Stählen sehr vielfältig und komplex. Erschwerend kommt hinzu, dass weitere Einflussgrößen, wie der Oberflächenzustand des Werkstoffs (z.B. Zunder) auf das Messergebnis einwirken. Im IZFP wurden die Zusammenhänge zwischen elektromagnetischen Messgrößen und Werkstoffkenngrößen (Zielgrößen) und weiteren Einflussgrößen (Störgrößen) in grundlegenden Forschungsarbeiten untersucht. Dabei wurden die Abhängigkeiten der 3MA Prüfinformationen von Gefüge- und Spannungszuständen an ausgesuchten Modellwerkstoffen herausgearbeitet [4]. Analysen zur sinnvollen Ergänzung der elektromagnetischen Prüfinformationen mit dem Modul „Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke“ wurden von H. Pitsch durchgeführt [5]. Die unterschiedlichen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen elektromagnetischen Messgrößen und den verschiedenen Gefüge- und Spannungszuständen, die im Material vorliegen, wurde in Arbeiten von W. Theiner und I. Altpeter diskutiert [6, 7]. Es zeigte sich beispielsweise, dass die Messgröße Koerzitivfeldstärke besonders sensitiv auf Gefügeänderungen reagiert. Die Messgrößen des magnetischen Barkhausenrauschens eignen sich besonders zur Untersuchung von Eigenspannungszuständen.

Weiterhin wurde festgestellt, dass eine Separation von Ziel- und Störgrößen nur dann möglich ist, wenn die zum Teil voneinander unabhängigen und teilweise redundanten Informationsinhalte mehrerer Messverfahren und Messgrößen miteinander verknüpft werden [2, 3, 4]. Mit Hilfe von empirischen Korrelationen kann ein Messgrößensatz ermittelt werden, der auf die jeweilige Prüfaufgabe (z.B. Bestimmung der mechanisch-technologischen Kennwerte, Charakterisierung von Härte, Härtetiefe und Eigenspannungen in der Randschicht) ausgerichtet ist. Das mathematische Hilfsmittel zur Ermittlung dieser Approximations- oder Kalibrierfunktionen, welche Mess- und Zielgrößen miteinander verknüpfen, ist das Verfahren der Multiplen Regression. Im vorliegenden Fall wurden die Kalibrierfunktionen für die Zielgrößen „Härte“, „Streckgrenze“ und „Zugfestigkeit“ bestimmt. Die Messgrößen wurden dabei nicht nur linear, sondern auch quadratisch, als Kehrwert und in Form ausgewählter Produkte und Quotienten in den Berechnungen berücksichtigt, da auch die magnetische Hysteresekurve keinen linear beschreibbaren Zusammenhang aufweist.

4. Anwendung, Kalibrierung

Zur einfacheren Handhabung des Prüfgeräts wurde ein Transportwagen entwickelt, mit welchem der 3MA-Prüfkopf ferngesteuert über eine Walztafel gefahren werden kann (Bild 2 und 3). Mit diesem Transportwagen kann eine halbautomatische Prüfung auch an heißen Walztafeln durchgeführt werden.



Bild 2: Transportwagen für die halbautomatische Prüfung von Walztafeln



Bild 3: Steuerpult für Transportwagen und Sensor

Für die elektromagnetische Datenaufnahme können unterschiedliche Sensoren eingesetzt werden. Sensoren vom Typ NF zeichnen sich dadurch aus, dass die Empfangsspulen direkt auf das U-förmige magnetische Erregerjoch aufgebracht sind. Dadurch können größere Wechselwirkungstiefen erreicht werden als bei den so genannten HF-Sensoren, bei denen eine Tastspule zwischen den Polen des Elektromagneten zur Signalaufnahme positioniert ist. Eine weitere Verbesserung des apparativen Signal-Rauschabstands zumindest für weiche Stahlqualitäten kann dadurch erzielt werden, dass ein GMR-Sensor (GMR = giant magneto resistance) statt mit einer Hallsonde für die Messung der tangentialen Magnetfeldstärke verwendet wird.

Allerdings muss die magnetische Feldstärke für die dynamische Magnetisierung der Prüfteile bei der Verwendung eines GMR-Sensors auf ca. 25 A/cm begrenzt werden. Diese Feldstärke ist für eine Prüfung von härteren Stahlqualitäten im Bereich von Härten größer 400 HB nicht ausreichend.

Deswegen musste eine Hallsonde als Magnetfeldsensor eingesetzt werden, die eine Magnetfeldaussteuerung von bis zu 40 A/cm erlaubt, um sämtliche Qualitäten mit einem einzigen Sensor prüfen zu können.

Die Kalibrierung des 3MA Prüfgerätes z. B. zur Härtemessung beginnt nach Eingabe eines Härte-Sollwertes, mit der Aufnahme der an der zugehörigen Messposition vorliegenden 3MA-Messwerte. Dieser Schritt wiederholt sich an einer ausreichenden Anzahl von Prüfpositionen mit abgestuften Werten der Zielgröße. Aus dem so erzeugten Datensatz werden mittels einer Multiparameter-Reggressionsrechnung diejenigen elektromagnetischen Messgrößen festgelegt, die hinsichtlich der Zielgröße die höchste Signifikanz aufweisen. Der so bestimmte Zusammenhang zwischen Mess- und Zielgrößen wird als Kalibrierfunktion vor der eigentlichen Kalibrierung im 3MA Prüfgerät eingegeben. Mit Abschluss des Kalibriervorgangs werden die Reggressionskoeffizienten der Kalibrierfunktion automatisch berechnet. Anschließend kann eine quantitative Messung der Zielgröße erfolgen.

Wie gut die zerstörungsfrei an Grobblechen ermittelten Messwerte mit den im Prüflabor zerstörend bestimmten Ergebnissen übereinstimmen, ist im wesentlichen davon abhängig, wie effektiv Einflussparameter wie z. B. Zunderschichten, Gefügegradienten und Texturen, durch den Transport mit Elektromagneten bedingte remanente Magnetfelder oder auch mechanische Spannungen unterdrückt werden können. Dies wiederum hängt von der verwendeten elektromagnetischen Sensorik ab, andererseits hat auch die verwendete Kalibrierstrategie einen wesentlichen Einfluss auf die Güte der zerstörungsfreien Messergebnisse.

5. Prüfkörper

Zur Kalibrierung und für die anschließende Überprüfung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit (Verifikation) wurden sowohl Walztafeln als auch aus Walztafeln entnommene Coupons verwendet, die von Walzwerken der Unternehmen Dillinger Hütte AG, IRSID, Fabrique de Fer, Salzgitter AG und ThyssenKrupp-Stahl AG zur Verfügung gestellt wurden. Im Verlauf der Untersuchungen wurden die von den 4 verschiedenen Walzwerken zur Verfügung gestellten Probensätze in unterschiedlicher Weise kombiniert:

- Kalibrierung an Grobblechen spezifisch für Walzwerk A, B, C oder D
- Anwendung der Kalibrierfunktionen von Walzwerk A zur Messung an Grobblechen von Walzwerk B usw.
- Stahlgütenspezifische Kalibrierung (Kombination der Datensätze von Proben verschiedener Walzwerke)
- Stahlgütenunabhängige Kalibrierung (Kombination der Datensätze von Proben verschiedener Walzwerke)

Nachfolgend sind die Kalibrierung und die Verifikationstests beschrieben, die auf Messungen basieren, welche direkt an Walztafeln durchgeführt wurden. Insgesamt wurden hierzu 88 Walztafeln verwendet, die jeweils an 8 verschiedenen Positionen mit 3MA geprüft wurden (siehe Tabelle 1). Anschließend wurden zerstörende Messungen der Härte und der Streckgrenze an diesen Walztafeln bzw. an entnommenen Coupons durchgeführt.

Stahlgüte	Wärmebehandlungszustand	Dicke [mm]	Anzahl
S355	normalisiert nach bzw. während des Walzens (N bzw. NE)	10 - 110	52
690-type	gequettet bzw. gequettet und angelassen (Q bzw. QA)	15 - 80	36

Tabelle 1: Stahlgüten und Wärmebehandlungszustände der Grobbleche für die Kalibrierung und die Verifikationstests

6. Ergebnisse

Die an den Messpositionen 1 bis 4 bestimmten Messwerte dienen der Kalibrierung, d.h. sie wurden zur Bestimmung der Kalibrierfunktionen für die Zielgrößen „Härte“, „Streckgrenze“ und „Zugfestigkeit“ verwendet. Diese Kalibrierfunktionen stellen jeweils eine Linearkombination aus 16 Variablen (Messgrößen, sowie deren Quadrate, Kehrwerte, etc.) dar. Als Ergebnis der Multiplen Regression ergab sich für die Härte eine Kalibrierfunktion mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.97$ und einer mittleren Standardabweichung von $\sigma = 11.9$ HB-Einheiten. Für die Streckgrenze ergaben sich die Werte $R^2 = 0.98$ und $\sigma = 20.9$ MPa. Der einkalibrierte Bereich war für die Härte 147 - 522 HB-Einheiten und für die Streckgrenze 325 - 1010 MPa.

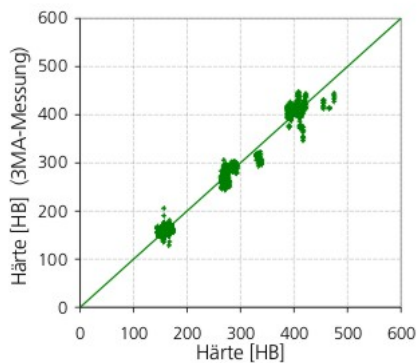


Bild 4: Verifikationstest, Härtemessung an Tafeln der Qualitäten N, NE, Q, QA

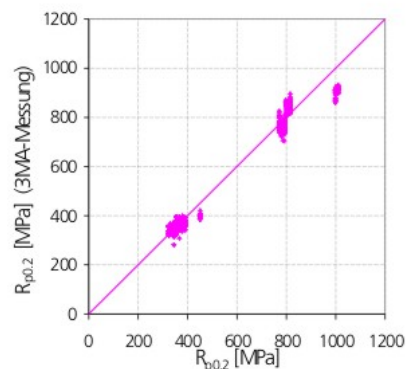


Bild 5: Verifikationstest, Messung von $R_{p0.2}$ an Walztafeln (N, NE, Q QA)

Die Messpositionen 5 bis 8 wurden für die Verifikation der zuvor ermittelten Kalibrierfunktionen verwendet. Die Gegenüberstellung der mittels 3MA-Messungen prognostizierten Werte und der zerstörend bestimmten Werte für die Härte und die Streckgrenze sind in den Bildern 4 und 5 gezeigt. Die Bilder 6 und 7 zeigen die Ergebnisse weiterer Verifikationstests an Coupons, wobei hier auch eine Gegenüberstellung der zerstörungsfrei und zerstörend gemessenen Werte der Zugfestigkeit R_m erfolgte.

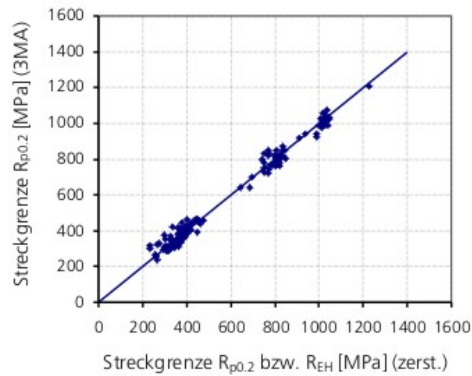


Bild 6: Verifikationstest, Messung der Streckgrenze $R_{p0.2}$ an Coupons verschiedener Qualitäten

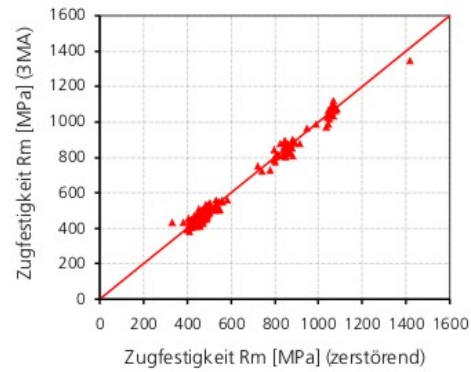


Bild 7: Verifikationstest, Messung der Zugfestigkeit R_m an Coupons verschiedener Qualitäten

Literatur

- [1] Barbian, O.A.; Haralamb, G.; Hullin, Ch.; Rieder, H.; Steuer, G.; „Qualitätskontrollen durch automatische Ultraschallprüfung von Grobblechen im Produktionsfluss“, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Meßwesen und Analysen. Luxemburg, 1987
- [2] Rieder, H.; Salzburger, H.J.: „ALOK-imaging and -reconstruction of surface defects on heavy plates with E.M.A.-Rayleigh wave transducers“, Rev. Progr. QNDE. 8A, 1989, S.1127-1135.
- [3] Schmitz, V.; Müller, W.; Staudt, J.; Schäfer G.; Chakhlov, S.: „Untersuchung von Grobblechen mit einer auf 3D-SAFT beruhenden mobilen Ultraschall-Scan-Einheit MUSE“, DACH - Jahrestagung, Salzburg, 17.-19.Mai 2004.
- [4] Borsutzki, M.; Kroos, J.; Reimche, W.; Schneider, E.: „Magnetische und Akustische Verfahren zur Materialcharakterisierung von Stahlblechen“; in: Stahl und Eisen 120(12), 2000, S. 115-121.
- [5] Pitsch, H.: „Die Entwicklung und Erprobung der Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke als neues Modul des 3MA-Ansatzes (Mikromagnetische Multiparameter Mikrostruktur- und Spannungsanalyse“; Saarbrücken, 1989, Dissertation.
- [6] Theiner, W. A.: „Micromagnetic Techniques“; in: Hauk, V.: „Structural and Residual Stress Analysis: Evaluation - Application - Assessment“; Amsterdam, Elsevier, 1997, S. 564-588.
- [7] Altpeter, I.: „Spannungsmessung und Zementitgehaltsbestimmung in Eisenwerkstoffen mittels dynamischer magnetischer und magnetoelastischer Messgrößen“; Saarbrücken, 1990, Dissertation.