

Betriebliche Erfahrungen mit einer neuen Ganztafel-Ultraschallprüfanlage

Wolfram WEBER*, Eva AUGENSTEIN*, Olaf EHRICH*, Gerhard FINGER**, Roman KOCH**, Heiko SACKENREUTHER**

* ThyssenKrupp Steel Europe AG

** GE Sensing & Inspection Technologies GmbH

Kurzfassung. Im Grobblechwalzwerk der ThyssenKrupp Steel Europe AG wurde im Januar 2012 eine neue Ganztafel-Ultraschallprüfanlage in Betrieb genommen. Durch den Einsatz der Anlage sollen qualitätsbeeinträchtigende innere Fehlstellen in den Grobblechen nachgewiesen werden, so dass ausgeschlossen ist, dass Bleche mit Werkstoffschwächungen in hochbeanspruchten, sicherheitsrelevanten Konstruktionen Einsatz finden. Gemeinsam mit dem Lieferanten, Fa. GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, wurde das Anlagenkonzept für die Integration in der Scherenstrecke des Grobblechwalzwerkes erarbeitet. Entsprechend dem Fertigungsfluss erfolgt die Prüfung vor dem Besäumen der Bleche. Zur kantennahen Anstellung der Prüfköpfe ist die Prüfanlage mit einer Konturerkennung ausgestattet, die entsprechend der Blechform die Prüfköpfe anstellt. In der Anlage sind 76 segmentierte Ultraschall-Prüfköpfe mit insgesamt 304 einzelnen Prüfkanälen integriert. Diese große Anzahl von Prüfkanälen ermöglicht eine nahezu vollständige Prüfung des Werkstoffvolumens. Die Algorithmen der Signalverarbeitung ermöglichen online die Durchführung der Fehlerprüfung und die gleichzeitige Messung der flächigen Blechdickenverteilung. Um den stets einwandfreien Anlagenzustand zu belegen, wird in festgelegten Intervallen ein präpariertes Testblech geprüft, in das bekannte Fehlstellen mit definierten Eigenschaften eingebracht sind. Auf der Datenbasis dieser Wiederholungsmessungen erfolgte eine statistische Untersuchung hinsichtlich der Auffindwahrscheinlichkeit (POD-Probability of Detection) für verschiedene Fehlstellen. Die berechneten Kennwerte beschreiben die Eigenschaften der Ultraschallprüfanlage und sind durch die Betriebserfahrungen im Produktionseinsatz bestätigt worden. In dem Beitrag werden das Prüfkonzept und der Prüfablauf dargestellt. Durch umfangreiche Untersuchungen im Rahmen der Inbetriebnahme wurden die Nachweiseigenschaften der Prüfanlage ermittelt und dokumentiert.

Einführung

Die Grobblechfertigung der ThyssenKrupp Steel Europe AG ist an dem Standort Duisburg-Süd konzentriert. Die Anlagenauslegung ermöglicht die Herstellung von rund 1Mio. Tonnen Quarto-Grobbleche und Bandbleche auf Anlagen, die in den letzten Jahren kontinuierlich modernisiert und erweitert worden sind. Das Walzgerüst erzeugt Walzkräfte von bis zu 1800t. Es können Bleche mit Dicken von 4 bis 150mm Dicke in Gewichten bis 14t hergestellt werden. Die Anlagenausstattung des Standortes ermöglicht die Herstellung von allgemeinen Baustählen, Druckbehälterstählen, verschleißfesten Stählen, Sicherheitsstählen sowie sonstigen Stahlsorten.



Die vor dem Einbau eingesetzte Ultraschallprüfanlage war bis Dezember 2011 im Betrieb. Sie war mit zwei Randzonenprüfwagen und einem Flächenprüfwagen mit Exzenterantrieb versehen. Der Flächenprüfwagen war mit 32 einzeln ansteuerbaren SE-Prüfköpfen ausgestattet, die einen Abstand von 100mm zueinander aufwiesen. Die maximale Prüfgeschwindigkeit lag bei 1 m/s im Durchlaufbetrieb ohne Oszillation, wobei eine Mindest-Flächenabdeckung von etwa 10% erreicht wurde [1]. Durch Einsatz des Exzenterantriebes konnte die Flächenabdeckung gesteigert werden, welches jedoch zu einer ungleichmäßigen Produktionsgeschwindigkeit in der Scherenstrecke führte und somit eine Verminderung der Adjustageleistung bedeutete. Im Jahr 2010 erfolgte die Entscheidung für die Investition in eine neue Ultraschallprüfanlage aufgrund des steigenden Wartungsaufwandes und der Notwendigkeit die Auffindwahrscheinlichkeiten für Werkstofffehler zu vergrößern. Durch das betriebliche Erfordernis einer gleichmäßigen Produktionsgeschwindigkeit wurde das Prüfkonzept mit starren Flächenprüfwagen, einer sogenannten 100%-Prüfanlage [2], an dem gleichen Standort im Einlauf der Scherenstrecke verfolgt.

1. Integration der Prüfanlage in die Scherenstrecke

1.1 Prüfkonzept zur Dickenmessung und Fehlerprüfung

Der Standort der Ultraschallprüfanlage ist unmittelbar hinter dem Kühlbett des Walzwerkes, im Einlauf in die Scherenstrecke. Hier werden die Bleche auf die geforderten Kundenabmessungen geschnitten und die Bleche einer Ultraschallprüfung unterzogen. In diesem Prozessschritt sind alle Fertigungsschritte zur Gewährleistung der mechanisch-technologischen Werkstoffeigenschaften abgeschlossen.



Abb. 1: Anlagenintegration in die Scherenstrecke, Grobblechwalzwerk Hüttenheim [3]

© ThyssenKrupp Steel Europe AG, 2013

Die Anforderungen an die Mess- und Prüfverfahren werden durch die Lieferbedingungen bestimmt. Sie folgen der DIN EN 10029 [4] für zulässige Maß-, Form- und

Gewichtsabweichungen oder entsprechenden ausländischen Vorschriften. Der Nachweis der Qualität hinsichtlich der Ultraschallprüfung erfolgt gemäß der DIN EN 10160 [5], sowie nach weiteren nationalen und internationalen Vorschriften nach Vereinbarung. Die Auslegung der Prüftechnik wird bestimmt durch die Blecheigenschaften und die Produktionsbedingungen an dem gewählten Standort entsprechend Tabelle 1.

Nenn-Blechdicke	: 4 - 60mm	Blecheinlaufemperatur	: max 150°C
Blechlänge	: 4000 - 26 000mm	Rollgangsgeschwindigkeit	: max. 60m/s
Blecbreite	: 1000 - 3600mm, im Regelfall nicht gesäumt, Seitenschrott: 40 - 100mm	Oberflächenqualität	: walzrau

Tabelle 1: Blecheigenschaften und Prüfbedingungen

1.2 Anlagenaufbau

Im Februar 2011 erfolgte die Beauftragung der Fa. GE Sensing & Inspection Technologies zur Realisierung der Prüfanlage, die zum Jahreswechsel 2011/12 in dem Walzwerk eingebaut wurde. In die Ultraschallprüfanlage sind insgesamt 76 pneumatisch einzeln angesteuerte Prüfkopfstanstellen verbaut. Eingesetzt sind Sender-Empfänger Prüfköpfe mit einer Nennfrequenz vom 5MHz. Die verwendeten Mehrfachschwinger haben eine Breite von 50mm und sind 4-fach geteilt, woraus sich 304 einzeln zu verarbeitende Prüfköpfe ergeben. Die Prüfkopfstanstellen sind in zwei, um eine Prüfkopfbreite zueinander versetzte, Flächenprüfwagen eingebaut. Hierdurch wird eine vollständige Flächenerfassung erreicht. Abbildung 2 zeigt die Anordnung der Prüfkopfstanstellenmechanik für einen Flächenprüfwagen.

Jede Prüfkopfstanstelle ist mit einem vorgelagerten Luftultraschallsensor verknüpft, der die Stellbewegungen entsprechend der Blechkontur bei dem Blechdurchlauf durch die Anlage ansteuert. Zusätzlich zu der Funktion des Nachweises von Ungängen im Werkstoffvolumen besteht die Forderung die Blechdicke hochauflösend für eine erweiterte Qualitätssicherung zu messen. Hierfür wurden auf-



Abb. 2: Anordnung der Prüfkopfstanstellenmechanik im Flächenprüfwagen
© ThyssenKrupp Steel Europe AG, 2013

wändig die Algorithmen für die Anzeige von Werkstofftrennungen für eine zeitgleiche Wandstärkenmessung unter den Vorgabewerten der Schallgeschwindigkeit erweitert.

Da nur ein Teil der durchlaufenden Bleche prüfpflichtig ist, wurde bei der Prüf-anlagenrealisierung eine zusätzliche Dickenmessung integriert. Hierfür ist eine mehrspurige optische Dickenquerprofil-messanlage der Fa. nokra ausgewählt. Diese Ver-fahrenskombination ist erstmalig in einem Grob-blechwalzwerk ein-gesetzt. Zur Messung des Dickenquerprofils sind elf Messspuren mit einem



Abb. 3: Aufbau der optischen Dickenmessanlage
© ThyssenKrupp Steel Europe AG, 2013

Abstand von 350mm über der Rollgangsbreite angeordnet. Jede Messspur besteht aus einem Sensorpaar, das mit Hilfe der optischen Lasertriangulation eine zeitsynchrone Abstandsmessung von der Blechober- und der Blechunterseite ausführt. Die Sensoren sind in einem thermisch stabilisierten O-Rahmen angeordnet. Im Gegensatz zur Dickenmessung mit Ultraschall wird bei diesem Verfahren die Dicke unabhängig von Werkstoffkennwerten wie der Schallgeschwindigkeit gemessen.

1.3 Mess- und Prüfkonzept

Entsprechend dem Prüfkonzept sind die einzelnen Funktionsgruppen der Anlage angeordnet. Im Blecheinlauf erfolgt zunächst die Messung der Dicke durch die optische Dickenmessanlage. Hinter der optischen Dickenmessanlage erfasst ein Messbalken die Blechkontur im Blechdurchlauf. Hierfür sind 76 Luftultraschallsensoren eingesetzt, deren Rasterabstand 50mm beträgt, entsprechend des Abstands der Ultraschallprüfköpfe zur Fehlerprüfung. Sobald die Blechkontur vollständig vorliegt, werden die Ergebnisse der optischen Dickenmessung mit der Blechkontur verknüpft. Des Weiteren steuern die Luftultraschallsensoren der Konturerfassung das Aufsetzen der Ultraschallprüfköpfe von beiden Flächenprüfwagen. Die Wegzuordnung zur Steuerung der Mess- und Prüfvorgänge erfolgt durch 4 Messräder.

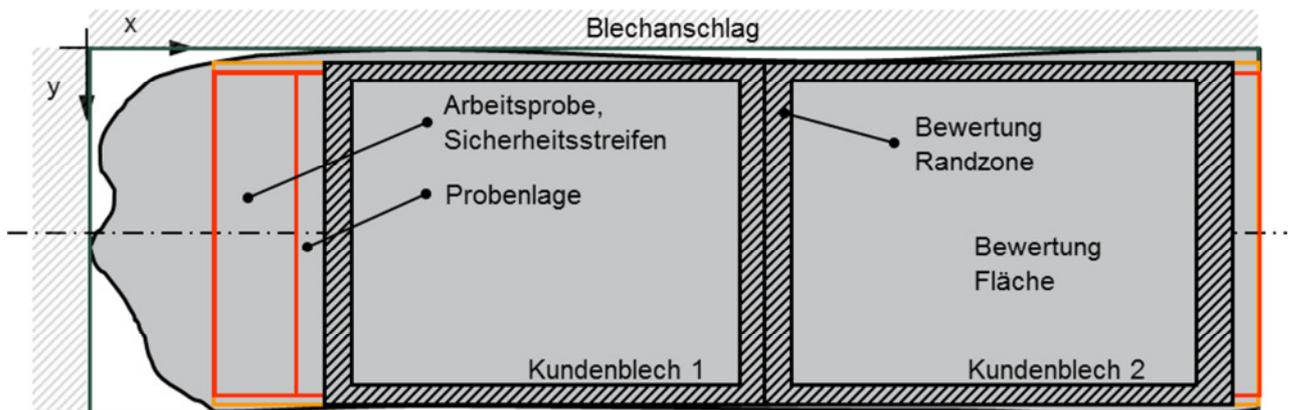


Abb. 4: Mess- und Prüfkonzept entsprechend der DIN 10160 [4]

Nach Abschluss der Ultraschallprüfung werden die Prüfergebnisse auf die Blechoberfläche projiziert. Für jede Blechprüfung werden von einem zentralen Fertigungsleitsystem die Längen und Breiten der Kundenbleche, die Prüfklassen entsprechend der vorgegebenen Normen zur Blechbewertung sowie Positionen von Proben vorgegeben. Die Proben dienen für die zerstörende Werkstoffprüfung zur Bestätigung der mechanisch-technologischen Werkstoffeigenschaften. In Kombination mit der Blechkontur ergeben sich hieraus die Bewertungsbereiche für die Randzonen- und Flächenprüfung entsprechend der geforderten Prüfnormen.

1.4 Signalverarbeitung

Die Einzelschritte bei der Signalverarbeitung von der Aufnahme der Ultraschallsignale bis zur abschließenden Blechbewertung unterteilen sich in drei einzelne Teilschritte. In einer Vorverarbeitung erfolgen während des Blechdurchlaufs die Aufnahmen der einzelnen A-Bilder bei gleichzeitiger Digitalisierung und Reduzierung des Datenumfanges nach dem ALOK-Verfahren. Anschließend werden beim Überschreiten einer relativen Schwelle von Amplitudenwerten, entsprechend der AVG-Kennlinie der Prüfköpfe, Vergleichsfehlerflächen zugeordnet. Danach wird unter Beachtung der Ortspositionen von Einzelanzeigen die Gesamtkontur für Vergleichsfehlerflächen ermittelt, indem benachbarte Einzelanzeigen zusammengefasst werden. Die abschließende normgerechte Blechbewertung erfolgt dann unter Beachtung der Regeln für die Rand- und Flächenbewertung der einzelnen Fehlerflächen. Abschließend wird für jede Blechprüfung ein Prüfprotokoll erstellt.

2. Optimierung und Nachweis der Prüfeigenschaften während der Inbetriebnahme

2.1 Auswahl von Vergleichsfehlern

Für den Nachweis von Prüfeigenschaften im Betriebseinsatz erfolgt mindestens alle 8 Stunden der Einsatz eines Testbleches. In dieses Testblech sind Gruppen von Bohrungen und Nuten entsprechend Tabelle 2 eingebracht. Die Eigenschaften der Testfehler entsprechen dabei den Kriterien zur normgerechten Fehlerflächenbewertung und erfüllen die Kontrollfunktionen zum Nachweis der Prüfeigenschaften.

Testblechgeometrie (Soll): Länge: 7m, Breite: 3,6m, Dicke 30mm		
Nachweis- und Kontrollfunktion	Bohrung Ø [mm]	Tiefenlage (Soll)
Allgemeine Anforderung DIN EN 10160	11, 8	5, 10, 15, 20, 25mm;
Besondere Anforderung für SE-Prüfköpfe	5	16, 33, 50, 66, 83%
Abschätzung der schalltoten Zonen	5	2, 28mm; 7, 93%
Abschätzen der erweiterten Nachweisempfindlichkeit	3	5, 9, 13, 17, 21, 25mm; 16, 30, 43, 56, 70, 83%
Nachweis des Aufsetzverhaltens im Randbereich	5	15mm; 50%
Signalkontrolle aller eingesetzten Prüfköpfe	Nut	Breite: 8mm, Tiefe: 8mm

Tabelle 2: Testfehlereigenschaften zur Bestimmung der Nachweiseigenschaften

2.2 Anwendung des vereinfachten POD-Verfahrens zum Nachweis der Prüfeigenschaften

Die Ergebnisse der Testblecheinsätze werden, wie auch die Ergebnisse der betrieblichen Blechprüfungen, in einer Datenbank der Prüfanlage hinterlegt. Somit stehen Prüfergebnisse für statistische Untersuchungen zur Verfügung. Während der Inbetriebnahme wurden sie, in vereinfachter Form, in Anlehnung an die Methoden zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Zfp-Verfahren (POD-Verfahren) ausgewertet [6, 7]. Wesentlicher Vorteil des Verfahrens ist, dass der Nachweis der Prüfeigenschaften nicht aus einem einmaligen Prüfergebnis ermittelt wird, sondern dass durch die statistische Auswertung einer Vielzahl von Prüfvorgängen

alle betrieblichen Störgrößen auf den Prüfprozess mit eingeschlossen werden. Diese sind z.B. Lageveränderungen des Testbleches auf dem Rollgang bei den Prüfvorgängen oder das Verschleißverhalten der Prüfköpfe. Die Auswertung ergibt damit wesentliche Hinweise für die Optimierung der Anlage unter betrieblichen Einsatzbedingungen.

Bei dem POD-Verfahren (probability of detection) wird die statistische Auffindwahrscheinlichkeit von Fehlstellen in Abhängigkeit von den Nachweiseigenschaften der Anlage und Anlagenschwellen bestimmt. Abbildung 5 fasst das Vorgehen zusammen. Zunächst werden unter Einsatz des zerstörungsfreien Prüfverfahrens Bauteile mit bekannten Fehlstellen unterschiedlicher Eigenschaften geprüft. Die bekannten Fehleigenschaften werden den ermittelten Fehlereigenschaften in sogenannten a versus \hat{a} Diagrammen gegenüber gestellt, in denen auch die Streuung des Prüfverfahrens erkennbar ist. Durch eine Modellfunktion wird danach empirisch der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Fehlereigenschaften erfasst. Unter Kenntnis der Streuung kann abschließend die Auffindwahrscheinlichkeit für die Fehlereigenschaften in Abhängigkeit von den Anlagenschwellen bestimmt werden.

Bei der Ultraschallprüfung von Grobblech wurden zunächst die bekannten Flächeninhalte „ a “ der Testfehler den von der Anlage zugewiesenen Flächeninhalten „ \hat{a} “ gegenüber gestellt. Abbildung 6 zeigt exemplarisch die zugewiesenen Fehlerflächen der Bohrungen des Testbleches in Abhängigkeit des Ligaments im Werkstoff für einen Untersuchungszeitraum. Das Ligament ist dabei die Wegstrecke des Schalls vom Prüfkopf bis zur Stirnseite der jeweiligen Bohrung. In der exemplarisch dargestellten Auswertung sind insgesamt 29 Testblecheinsätze untersucht. In Abhängigkeit von den eingestellten Schwellen ist zudem die Häufigkeiten bestimmt mit der die Testfehler zur Anzeige gebracht wurden.

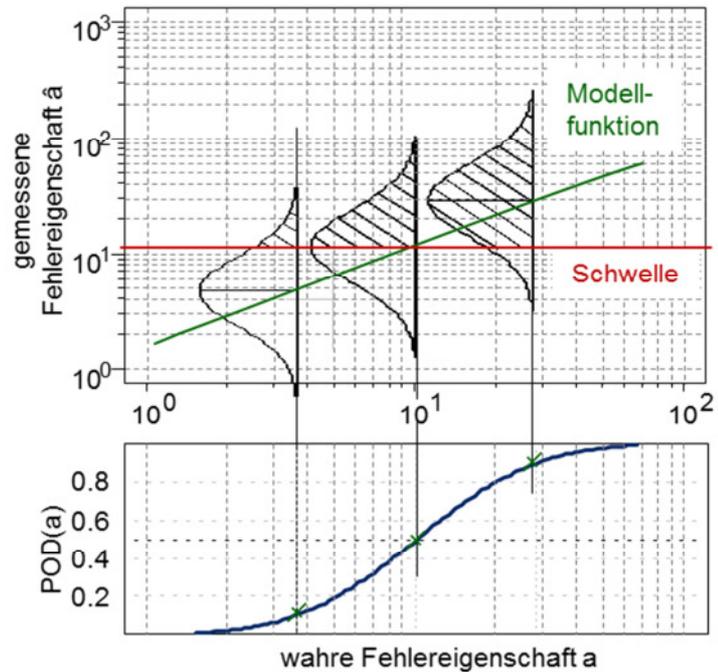


Abb. 5: Entwicklung der POD-Kurve aus der Zuordnung gemessener und tatsächlicher Fehlermerkmale
© ThyssenKrupp Steel Europe AG, 2013

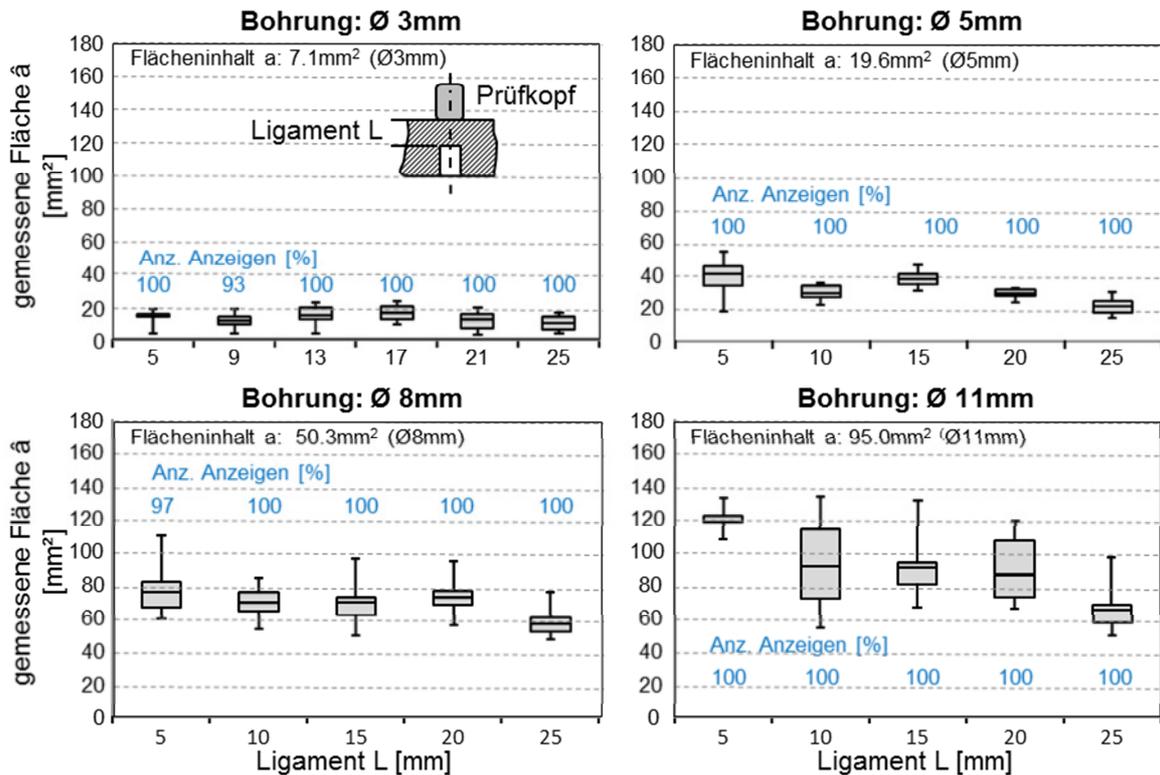


Abb. 6: Zuordnung der Fehlerflächen a versus \hat{a} aus 29 Testblecheinsätzen
© ThyssenKrupp Steel Europe AG, 2013

Hieraus lässt sich nun die in Abbildung 7 gezeigte vereinfachte POD-Kurve ermitteln. Das exemplarische Beispiel zeigt das Testfehler mit einer Fläche von mindestens 20mm² und einem Ligament von 25mm mit einer Auffindwahrscheinlichkeit von 100% nachgewiesen werden. Anhand der Abschätzung können nun ebenfalls die Fehlerflächen S_{95} und S_{50} ermittelt werden, mit der Vergleichsfehlerflächen mit einer Auffindwahrscheinlichkeit von 50% und 95% nachgewiesen werden.

Von erheblicher betrieblicher Bedeutung ist die Angabe der Fehlerfläche S_{95} für Fehlerflächen mit unterschiedlichen Abständen von der Blechoberseite in die Werkstofftiefe. Abbildung 8 zeigt die Nachweiseigenschaften zu Beginn (1) der Inbetriebnahme und nach der abgeschlossenen Anlagenverbesserung (2). Zunächst wurden erheblich tiefenabhängige Nachweiseigenschaften mit Hilfe des Testbleches ermittelt. Durch Verbesserungen in der Datenverarbeitung, unter Beachtung des Schallfeldes der eingesetzten Prüfköpfe, wurde die erkennbare Tiefenabhängigkeit deutlich reduziert. Einhergehend wurde die erforderliche Vergleichsfehlerfläche S_{95} verringert,

Auffindwahrscheinlichkeit POD in Abhängigkeit der Fehlerfläche

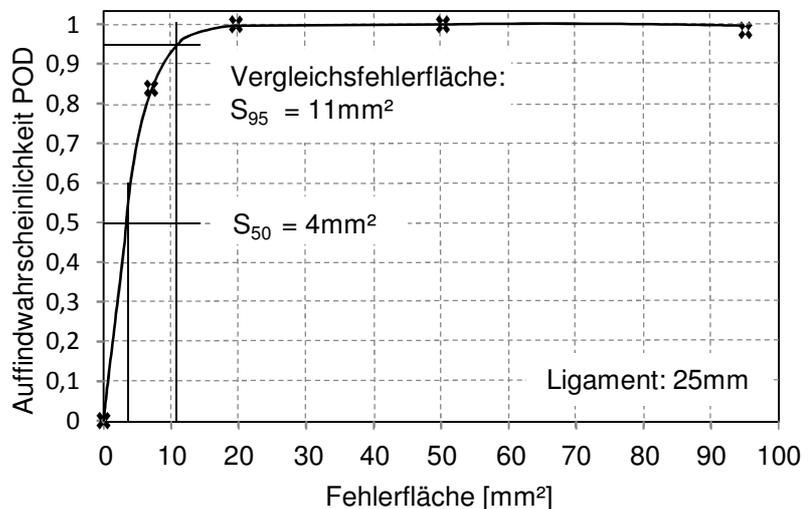


Abb. 7: Auffindwahrscheinlichkeit für Fehlerflächen mit einem Ligament von 25mm
© ThyssenKrupp Steel Europe AG, 2013

so dass Fehler mit einer Vergleichsfehlerfläche ab 12mm^2 mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% sicher nachgewiesen werden.

3. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Grobblechwalzwerk der ThyssenKrupp Steel Europe AG wurde im Januar 2012 eine neue Ganztafel-Ultraschallprüfanlage in Betrieb genommen. Um den stets einwandfreien Anlagenzustand zu belegen, wird in festgelegten Intervallen ein präpariertes Testblech eingesetzt.

Auf der Datenbasis dieser Wiederholungsmessungen erfolgten statistische Untersuchungen auf der Grundlage eines vereinfachten POD-Verfahrens hinsichtlich der Auffindwahrscheinlichkeit für die verschiedenen Fehlstellen. Die ermittelten Zusammenhänge bildeten die Grundlage für wesentliche Weiterentwicklungen in der Signalverarbeitung unter Beachtung der Schallfelleigenschaften der verwendeten Prüfköpfe während der Inbetriebnahme der Anlage. Die erreichten Nachweiseigenschaften bestätigen sich in dem betrieblichen Einsatz der Anlage und werden weiterhin zur kontinuierlichen Überwachung der Anlageeigenschaften im Betriebseinsatz angewendet.

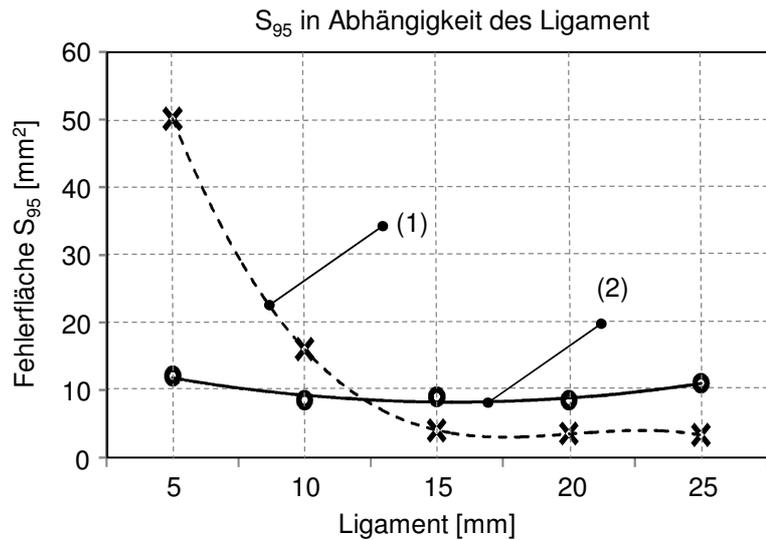


Abb. 8: Fehlerfläche S_{95} in Abhängigkeit des Ligaments vor (1) und nach (2) der Anlagenverbesserung © ThyssenKrupp Steel Europe AG, 2013

Referenzen

- [1] Smit, H., Schulz, L., Paaßen, H., Küpper, D., Mahn, J.: Erfahrungen bei der Entwicklung einer Ultraschall-Prüfanlage für Grobbleche bis zur Einsatzreife. Thyssen Technische Berichte, Heft 2/80
- [2] Bähmann, H.-J., Grumbach, K.-D., Schröder, J., Siegel, H.: Neue Ultraschall-Prüfanlage für Grobbleche – 100% Flächenabdeckung mit 400Prüfkanälen bei separater 100%-Prüfung von Randzonen, DACH-Jahrestagung, Innsbruck, 29.-31. Mai 2000
- [3] Internetpräsenz ThyssenKrupp Steel Europe, Grobblech, Produktion, <http://grobblech.thyssenkrupp-steel-europe.com/grobblech/de/produktion/>
- [4] DIN EN 10029, Warmgewalztes Stahlblech von 3mm Dicke an, Grenzabmaße, Formtoleranzen, zulässige Gewichtsabweichungen, Deutsche Fassung EN 10029:1991
- [5] DIN EN 10160, Ultraschallprüfung von Flacherzeugnissen aus Stahl mit einer Dicke größer oder gleich 6mm (Reflexionsverfahren), Deutsche Fassung EN 10160:1999
- [6] MIL-HDBK-1823, Department of Defense Handbook, Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, 30. April 1999
- [7] Müller, C., Ewert, U., Pavlovic, M., Scharmach, M., Ronneteg, U., Ryden, H.: Zuverlässigkeit von ZfP-Verfahren zur Gewährleistung der Integrität von Cu-Schweißnähten zur sicheren Endlagerung radioaktiver Abfälle, DGZfP-Jahrestagung; Fürth, 14.-16. Mai 2007