

Entwicklung und Qualifizierung einer Fernfeld-Wirbelstromtechnik zur Fehlerprüfung von Schweißnähten und dickwandigen Bauteilen

Wilfried REIMCHE, Martin BERNARD, Stefan ZWOCH, Friedrich-Wilhelm BACH
Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover

Kurzfassung. Steigende Anforderungen an die Qualität von Leichtmetall-Schweißverbindungen, insbesondere in der Halbzeugfertigung für die Automobil- und Luftfahrtindustrie, erfordern zunehmend die Entwicklung prozessorientierter, zerstörungsfreier Prüfmethode zur Fehlererkennung, um über eine Qualitätssicherung eine hohe Produktqualität und damit effektive Produktionsabläufe zu realisieren. Es werden Grundlagenuntersuchungen vorgestellt, um die Möglichkeiten der Fernfeld-Wirbelstromtechnik aufzuzeigen und verschiedene Einflussfaktoren, wie Wanddicke und physikalische Werkstoffeigenschaften sowie Sensorausführung und Wahl von Prüfparametern, im Hinblick auf eine Inline-Prozessüberwachung und -steuerung im Produktionsablauf zu bewerten.

1. Einführung

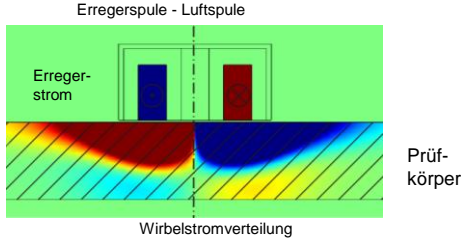
Hohe Anforderungen an die Qualität von Schweißverbindungen in der Herstellung von Halbzeugen und Profilen, wie auch in der Anlagen- Automobil- und Luftfahrtindustrie verlangen im Rahmen der Qualitätssicherung verstärkt prozessorientiert nach einer umfassenden online Fehlerprüfung der Schweißnahtverbindung um Schweißfehler im Nahtbereich in ihrer Entwicklung möglichst frühzeitig zu erkennen und über eine Prozesssteuerung zu vermeiden. Dies erfordert die Entwicklung von onlinefähigen zerstörungsfreien Prüftechniken die entsprechend den Randbedingungen im Schmelzbadnachlauf gleichgewichtig einen empfindlichen Nachweis von typischen Schweißnahtfehlern, wie Poren, Risse oder Bindefehler im Nahtvolumen und der WEZ ermöglichen. Dabei ist es erforderlich prozessnah vorhandene Schweißnahtfehler unter Anwendung geeigneter Analyse- und Klassifizierungsverfahren in ihrer Art, Lage und Ausbildung zu beschreiben [1, 6].

2. Grundlagen der Fernfeld-Wirbelstromprüfung

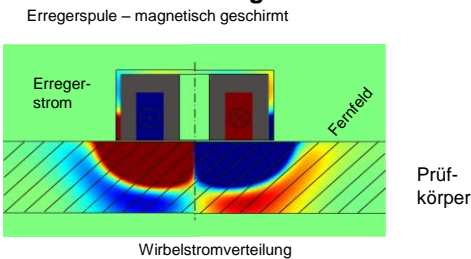
Im Bereich der Wirbelstromtechnik, besonders deren Weiterentwicklung und Anpassung an spezielle Prüfaufgaben, ist das Zusammenspiel zwischen der Messsonde, dem Prüfkörper und der Fehlstelle hinsichtlich der Ausbildung der magnetischen Felder und Flüsse sowie der Wirbelströme im Prüfkörper von grundsätzlichem Interesse. Hier bieten numerische 3 dimensionale Finite Element Methoden (FEM) über Modellbildungen und Simulationsberechnungen neue Möglichkeiten die Verteilungen und zeitlichen Abläufe im Prüfkörper anhand von magnetischen Feldern, Wirbelstromverteilungen und magnetischen Vektorpo-

tientialen zu beschreiben. Damit wird ein besserer Einblick in die Verhältnisse und Abläufe im Bauteil ermöglicht, der für eine Weiterentwicklung der Prüftechnik bezüglich der Prüfaufgabe im Hinblick auf einen empfindlichen Fehlernachweis und Bewertung der Anzeigen von Wichtigkeit ist.

konventionelle WS-Prüfung

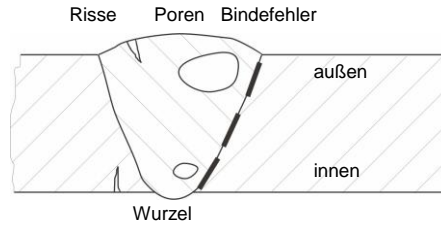


Fernfeld-WS-Prüfung



dickwandige Rohre

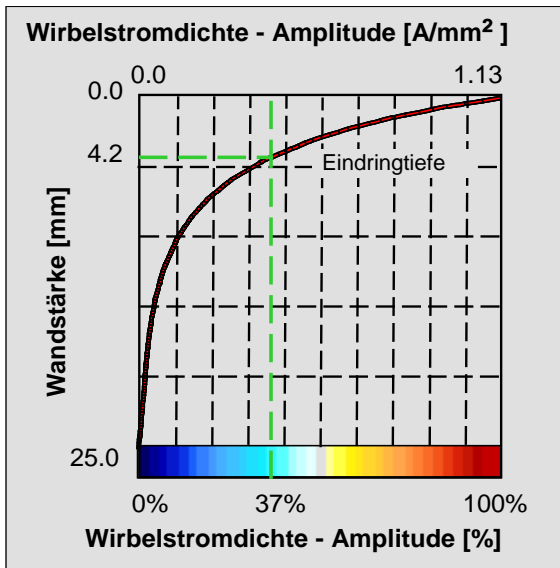
Schweißnaht-Fehlerprüfung



- Fehlerart: - Risse
 - Poren
 - Bindefehler
- Fehlerlage: - Außenfehler, Schweißraupenbereich
 - eingeschlossene Fehler
 - Innenfehler im Wurzelbereich

Bild 1: Wirbelstromtechnik und Prüfanwendungen

Definition der Standardeindringtiefe



Horizontale Position der Standardeindringtiefe [mm]

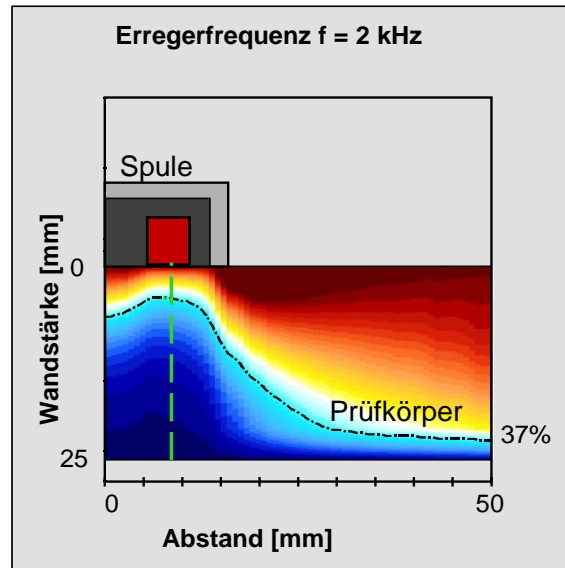


Bild 2: Standardeindringtiefe

Durchgeführte Simulationsberechnungen zum Vergleich verschiedenartiger Spulensysteme haben gezeigt, dass in der konventionellen Wirbelstromprüfung bei Verwendung von Luft- oder Kernspulen die Wirbelstromverteilung unter, aber auch neben der Erregerspule oberflächennah stark ausgebildet ist. Generiert aus dem Feld der primären Wirbelstromverteilung zeigt sich in größerer Bauteiltiefe in geringerer Intensität eine weitere sekundäre Wirbelstromverteilung mit einer Phasendrehung von ca. 180°. Diese sekundäre Wirbelstromausbildung in der Bauteiltiefe ist jedoch von der primären Wirbelstromverteilung weitge-

hend überdeckt, Bild 1 oben. Durch die Verwendung von magnetisch geschirmten Erregerspulen, wird über eine erhöhte Permeabilität eine Führung des magnetischen Flusses und damit eine Konzentration der Wirbelverteilung unter der Erregerspule erreicht. Aus der Konzentration der primären Wirbelstromverteilung folgt auch eine Intensivierung der sekundären Wirbelstromverteilung mit einer nahezu homogenen Wirbelstromdichte über der Bauteilhöhe, die sich bis zur Bauteiloberfläche erstreckt, Bild 1 unten.

Ein Maß für die Ausbildung und Homogenität der Wirbelstromverteilung im Prüfkörper ist die Standard-Eindringtiefe der Wirbelströme. Diese gibt an in welchem Abstand von der Oberfläche die Wirbelstromdichte auf $1/e$ entsprechend ca. 37% abgefallen ist.

In Bild 2 wird deutlich, dass die Eindringtiefe unter der Erregerspule sehr gering ist und mit zunehmendem Abstand sehr viel größere Werte annimmt. Dies ist dadurch bedingt, dass mit zunehmendem Sondenabstand die Wirbelstromdichte zwar geringer wird aber eine homogenere Verteilung annimmt.

Die Ausbildung der Wirbelstromverteilung im Prüfkörper ist dabei im wesentlichen von der Spulengeometrie, den Prüfparametern sowie der Bauteilgeometrie und den Werkstoffeigenschaften abhängig.

Aus der Vielzahl und Spannweite der Einflussgrößen wird deutlich, dass die bestehenden Zusammenhänge zwischen der Erregerseite und den Vorgängen im Prüfkörper sehr komplex und umfassend sind [2, 3, 4, 7, 8].

2.1 3D FEM – Simulationsmodell

Um die bestehenden Zusammenhänge zwischen der Erregerspule, den Prüfparametern, dem Bauteil und den Werkstoffeigenschaften sowie der Fehlerausbildung im Bauteil näher zu untersuchen und zu beschreiben, wurde ein 3D FEM-Simulationsmodell erstellt und umfangreiche Parametervariationen durchgerechnet.

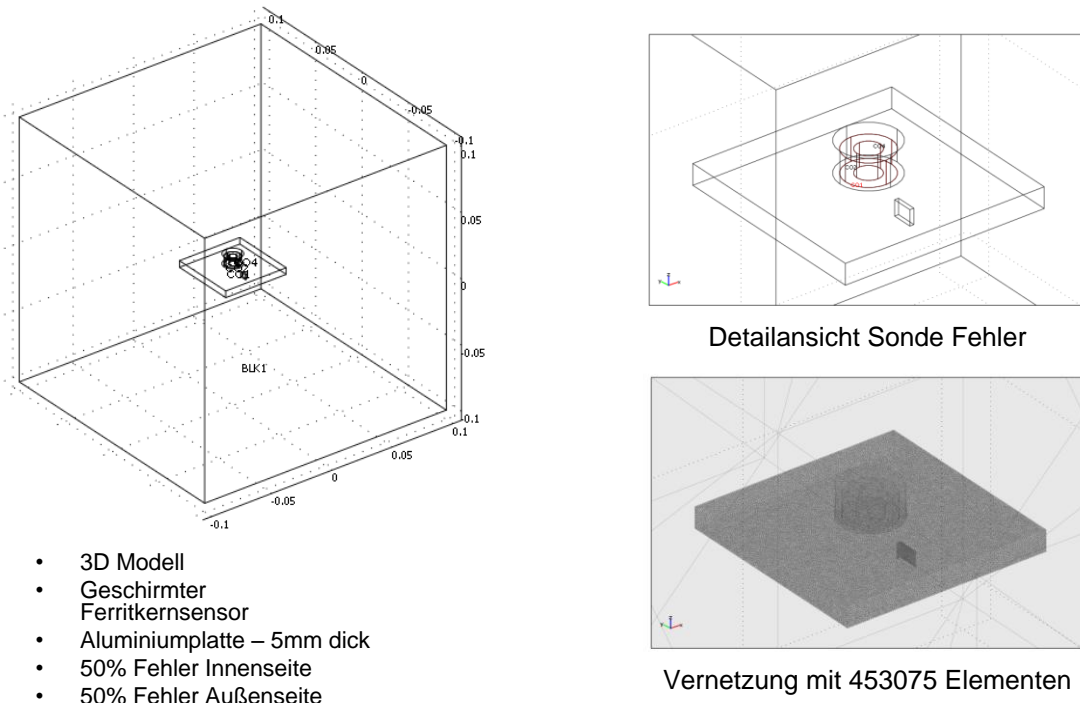


Bild 3: 3D Modell

Von wesentlichem Interesse hinsichtlich eines empfindlichen Fehlernachweises ist dabei die Ausbildung der Wirbelstromverteilung im Bauteil, die durch einen Testfehler gestört wird, und das daraus resultierende magnetische Vektorpotential an der Bauteiloberfläche,

welches mit einem geeigneten Sensor z. B. einer Messspule erfasst werden kann. Die Änderung des magnetischen Vektorpotentials im Fehlerbereich gegenüber dem ungestörten Bauteilbereich dient dabei zum Fehlernachweis.

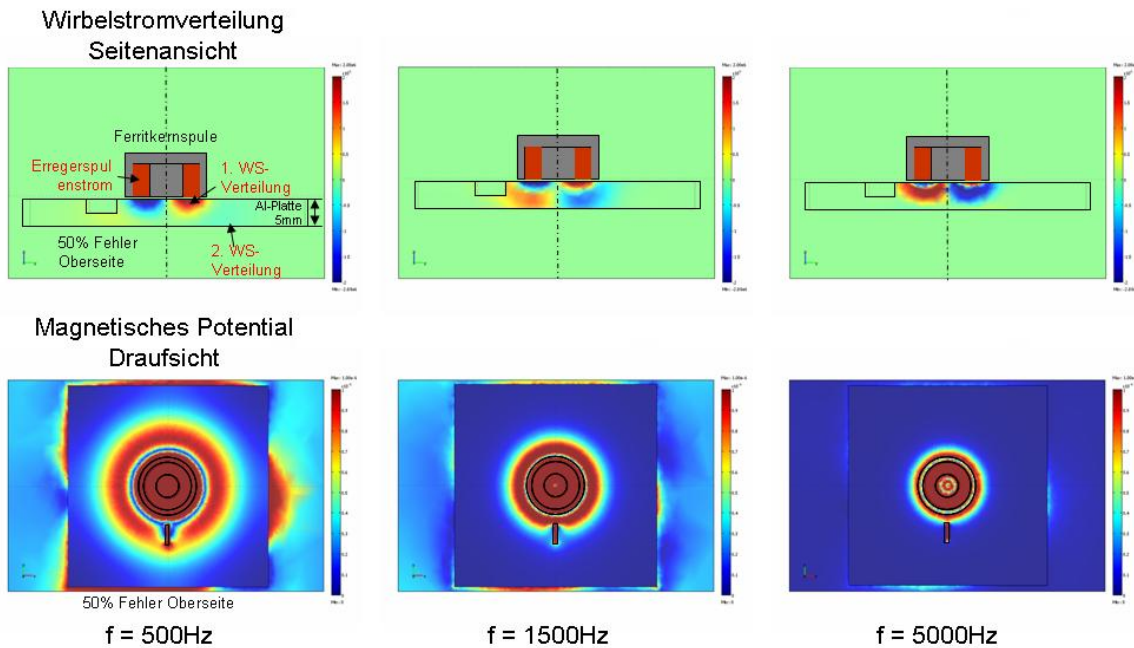


Bild 4: 3D FEM-Simulation – 50% Fehler von der Oberseite

In den Bildern 4 und 5 ist beispielhaft für einen Aluminium Prüfkörper mit 5mm Wandstärke und einer Erregerspule von 15mm Durchmesser die Wirbelstromverteilung im Prüfkörper und das magnetische Vektorpotential auf der Prüfkörperoberfläche bei Prüffrequenzen von 500Hz, 1500Hz und 5000Hz aufgezeigt. Die Verhältnisse bei einem 50% Testfehler von der Plattenoberseite sind in Bild 4 dargestellt.

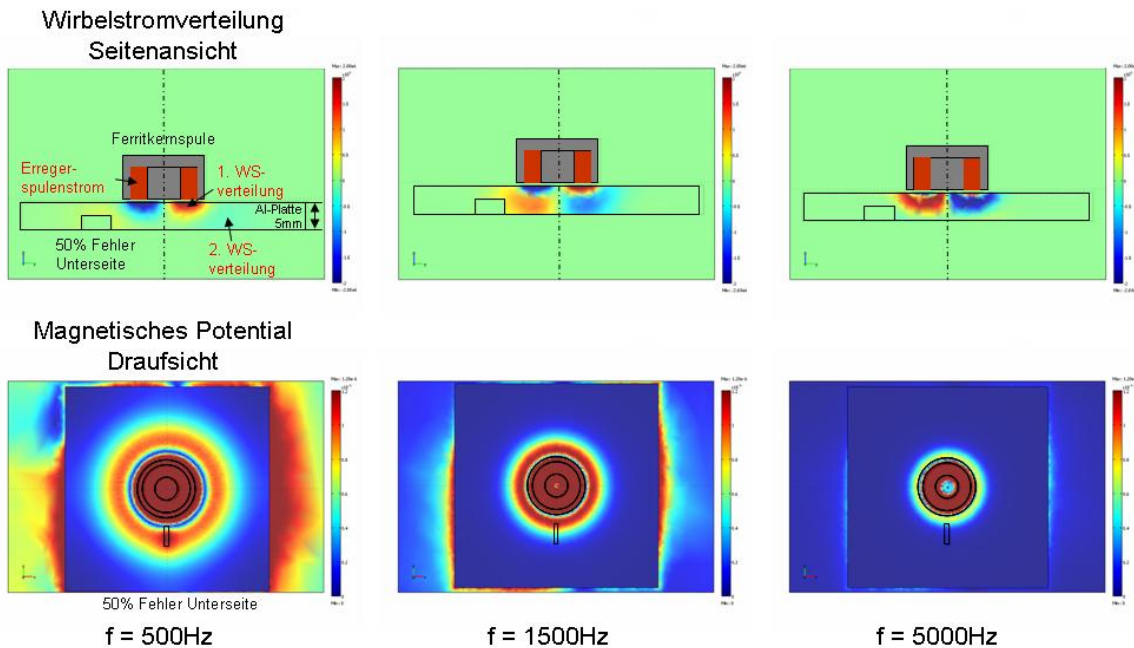


Bild 5: 3D FEM-Simulation – 50% Fehler von der Unterseite

Im Gegensatz dazu zeigt Bild 5 die Ausbildung der Wirbelstromverteilung und des magnetischen Vektorpotentials bei einem 50% Fehler von der Plattenunterseite.

Bei einer niedrigen Prüffrequenz von 500Hz kommt es zu einer relativ homogenen sekundären Wirbelstromverteilung im ungestörten Bauteilbereich. Ein verdeckter Fehler führt zu einer größeren Wirbelstromdichte oberhalb des Fehlers und damit zu einer Verstärkung des magnetischen Vektorpotentials auf der Plattenoberseite im Fehlerbereich. Ein zur Oberfläche offener Fehler hingegen bewirkt eine Verdrängung der Wirbelstromverteilung in den unteren Plattenbereich und damit eine Abschwächung des magnetischen Potentials auf der Plattenoberseite.

Die gegenläufige Änderung des magnetischen Vektorpotentials entspricht dabei in einem generierten Messsignal einer Phasendrehung von 180° und ist ein eindeutiges Indiz für die Unterscheidung von Innen- oder Außenfehlern.

Bei höheren Prüffrequenzen verdichten sich die primäre wie auch die sekundäre Wirbelstromverteilung unter der Prüfspule, die Eindringtiefe wird geringer und die Homogenität über der Prüfkörperhöhe ist nicht mehr gegeben. Bedingt dadurch ist das aus der Wirbelstromverteilung resultierende magnetische Vektorpotential bei höheren Prüffrequenzen nur nahe der Erregerspule existent und die Nachweisempfindlichkeit insbesondere für verdeckte Fehler nimmt ab.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1 Aluminium-Platte

Zur Verifizierung der FEM-Simulationsergebnisse wurden experimentelle Untersuchungen an einer Aluminiumplatte mit 5mm Wandstärke durchgeführt. In die Platte waren von der Ober- und Unterseite Testbohrungen mit einem Durchmesser von 1,5mm und einer Tiefe von 1, 2 und 3mm eingebracht. Variiert wurde die Prüffrequenz von 1 bis 3kHz und der Sondenabstand zwischen der Erreger- und der Messspule von 0 bis 10mm.

Hinsichtlich der Fehlerlage werden bei geringen Spulenabständen die Außenfehler sehr viel empfindlicher nachgewiesen. Wie auch die Simulationsberechnungen gezeigt haben, führt bei geringen Spulenabständen eine Erhöhung der Prüffrequenz vorerst zu einer Verbesserung der Nachweisempfindlichkeit, bei größeren Spulenabständen jedoch zu einer deutlichen Abnahme.

Einfluss der Testparameter
 Testobject – Al Platte
 Dicke = 5mm

- WS Frequenz 1, 2, 3 kHz
 - Spulenabstand 0...10mm
 - Fehlerposition Innenseite - Außenseite
 - Tiefe $t_d=1, 2, 3$ mm

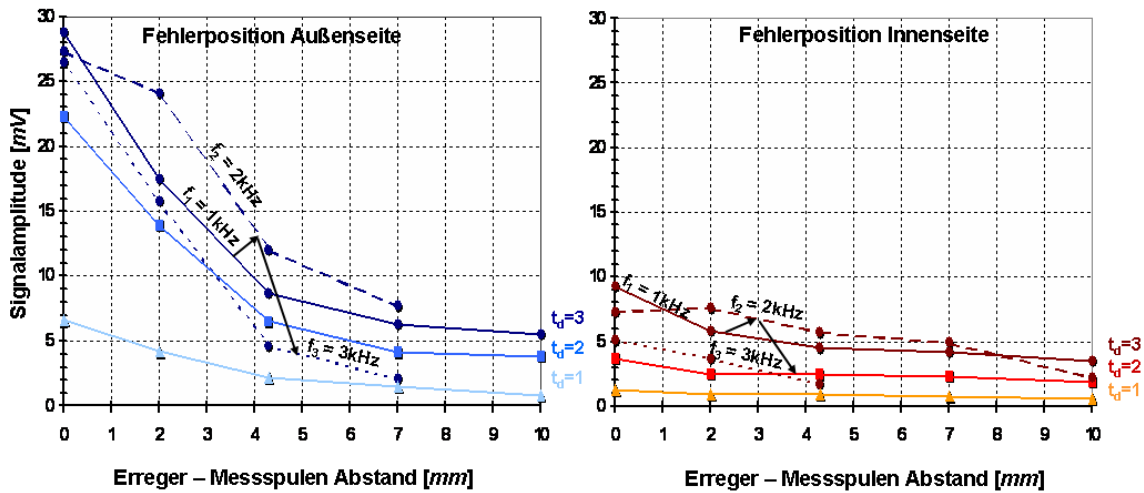


Bild 6: FF-WS-Prüfung – Amplitude für Innen- und Außenfehler

Bei einer Prüffrequenz von 1kHz und einem Spulenabstand von 7mm werden aufgrund der nahezu homogenen Wirbelstromverteilung über der Plattendicke Innen- und Außenfehler mit einer ähnlichen und einer zur Fehlertiefe annähernd proportionalen Signalamplitude nachgewiesen. Wie auch schon in den Simulationsberechnungen aufgezeigt steht dabei der Phasenwinkel des Messsignals in eindeutigen Zusammenhang zur Fehlerlage. Kleine Innenfehler werden bei dieser Prüffrequenz unter Phasenwinkeln von ca. 50° und kleine Außenfehler unter Phasenwinkeln von ca. 140° erfasst. Mit zunehmender Fehlertiefe nähern sich die Phasenwinkel einem mittleren Wert von 90° an wobei die eindeutige Zuordnung erhalten bleibt.

Einfluss der Testparameter - WS Frequenz 1,5 kHz
 Testobject – Al Platte - Spulenabstand 0...10mm
 Dicke = 5mm - Fehlerposition Innenseite - Außenseite
 - Tiefe $t_d=1, 2, 3$ mm

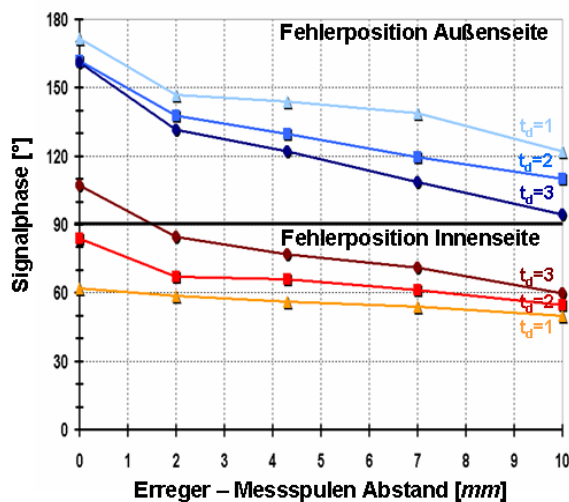


Bild 7: FF-WS-Prüfung – Phase für Innen- und Außenfehler

3.2 Dickwandige austenitische Stahlrohre

Weitere experimentelle Untersuchungen wurden an dickwandigen austenitischen Stahlrohren mit eingebrachten Testfehlern und Störstellen von der Innen- und Außenseite sowie eingeschlossenen Fehlern durchgeführt.

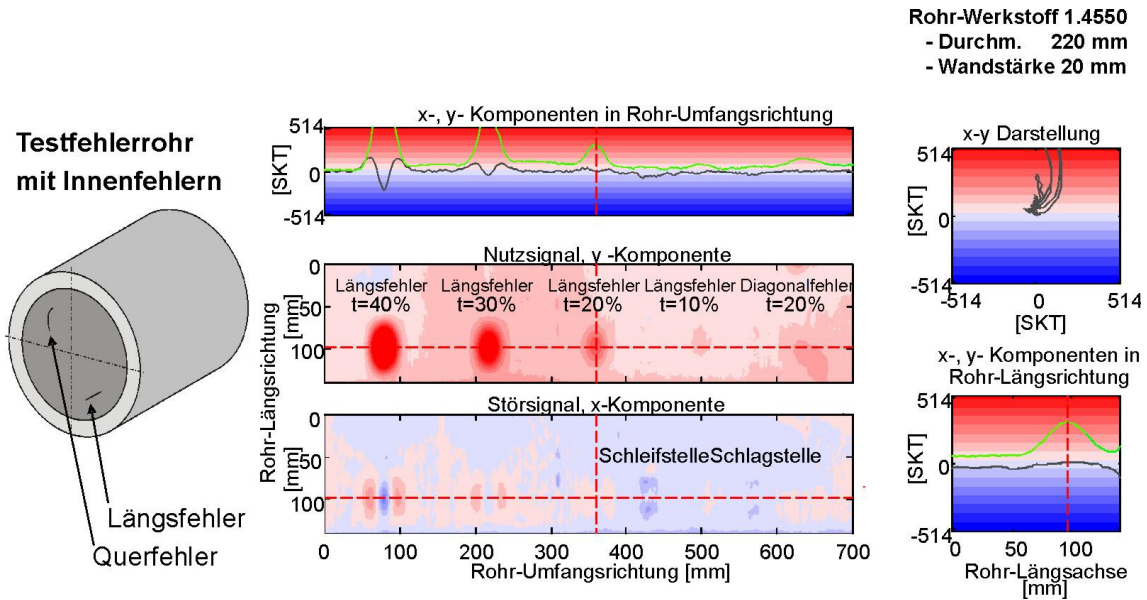


Bild 8: 2D Signalanalyse von Innenfehlern

Auch für diese, bei einer Wandstärke von 20mm extremen Prüfbedingungen für die Wirbelstromprüfung, wurde eine geeignete Fernfeld-Wirbelstrom Prüftechnik entwickelt, an die Prüfaufgabe angepasst und für den Einsatz in der nuklearen Kraftwerkstechnik qualifiziert [8, 9]. Dabei konnten Fehler- und Störsignalanteile eindeutig getrennt und verdeckte Innenfehler mit einer Fehlertiefe von 10 bis 40% von der Außenseite empfindlich nachgewiesen werden. Auch hier konnte die Fehlertiefe entsprechend der Signalamplitude und die Fehlerlage und das Ligament eindeutig über den Phasenwinkel bewertet werden [5, 9, 10].

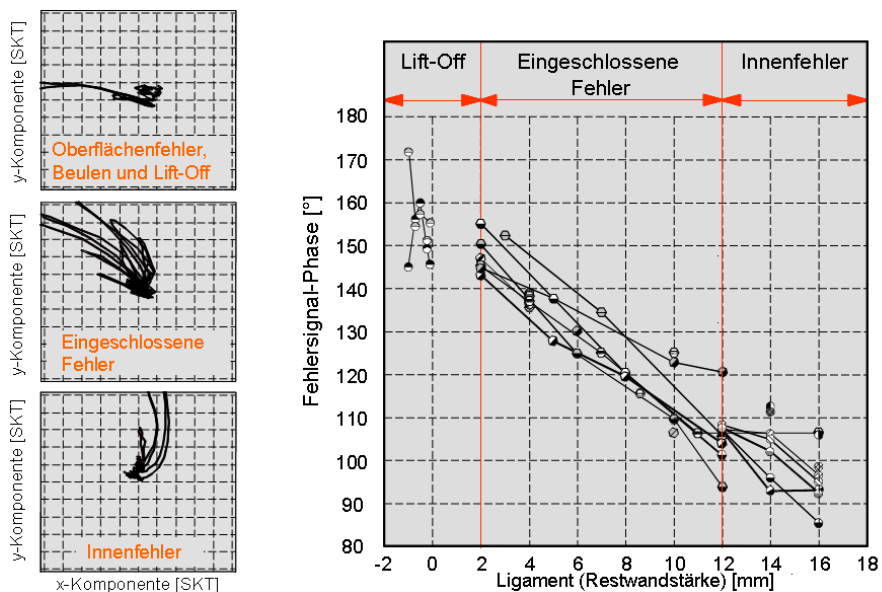


Bild 9: Fehlertiefenposition – Signalphase und Ligament

3.3 WIG - geschweißte dünnwandige Aluminiumrohre

Im Hinblick auf die Anwendung der Fernfeld-Wirbelstromtechnik zur Schweißnahtprüfung wurden erste Untersuchungen an WIG-geschweißten Aluminiumrohren mit Durchmessern von 16 bis 64mm und Wandstärken von 0,3 bis 1,2mm durchgeführt.

Zur Anpassung der Prüfparameter an die Prüfaufgabe wurden von der Ober- und Unterseite Testfehler in verschiedenen Tiefen in ein entsprechendes Aluminiumband eingebracht und die Prüftechnik auf eine Trennung von Fehler- und Störsignalen, einen empfindlichen gleichgewichteten Fehlernachweis sowie eine Zuordnung der Fehlerlage ausgerichtet (Bild 10)

Durchgeführte Untersuchungen an geschweißten Rohren haben gezeigt, dass mit dieser Technik Unregelmäßigkeiten in der Schweißnahtausbildung wie auch Fehler im Raupen- und Wurzelbereich empfindlich nachgewiesen werden und in ihrer Lage eindeutig zu bewerten sind (Bild 11).

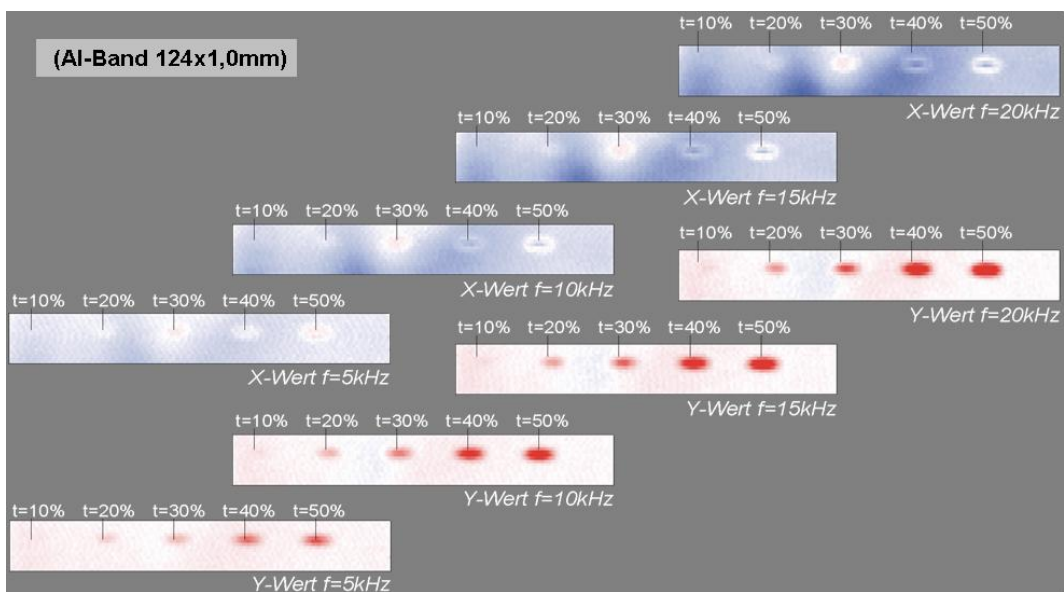


Bild 10: Flächige Signaldarstellung verdeckter Innen-Testfehler

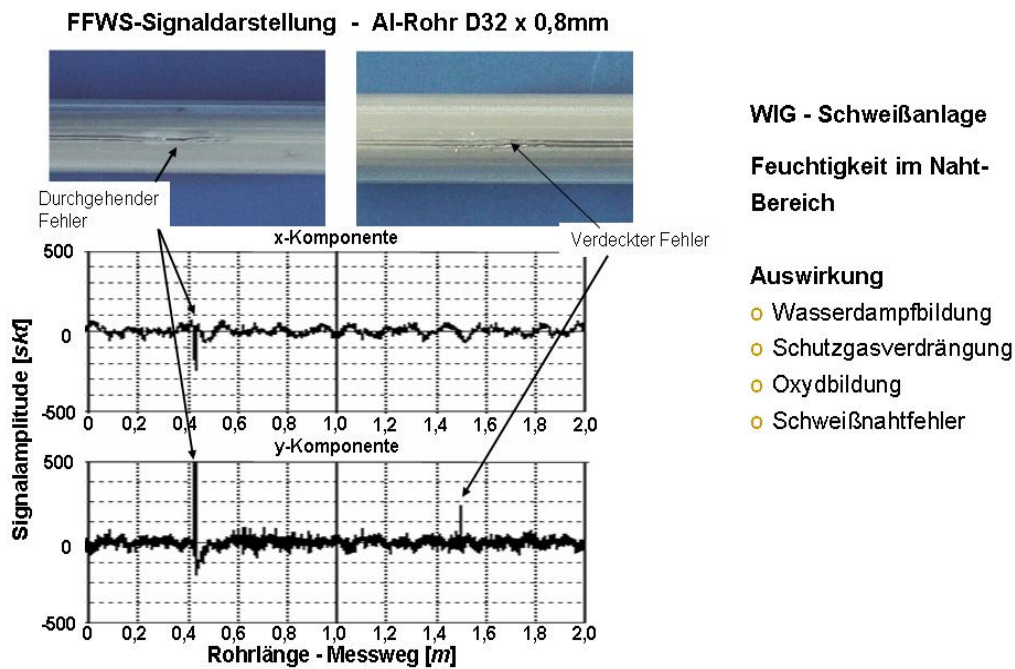


Bild 11: WIG-Schweißnaht mit Bindefehlern

4. Zusammenfassung

Steigende Anforderungen an die Qualität von Schweißverbindungen, insbesondere in der Halbzeugfertigung für die Anlagen-, Automobil- und Luftfahrtindustrie erfordern zunehmend die Entwicklung prozessorientierter, zerstörungsfreier Prüftechniken zur online Fehlerprüfung im Prozessnachlauf, um über eine Qualitätssicherung in der Fertigung eine hohe Produktqualität und effektive Produktfertigung zu realisieren. Dabei wird angestrebt typische Schweißnahtfehler wie Poren, Risse oder Bindefehler, zerstörungsfrei mit einer hohen Nachweisempfindlichkeit hinsichtlich ihrer Art, Ausdehnung und Lage prozessnah zu detektieren und zu charakterisieren.

Die durchgeführten Grundlagenuntersuchungen haben aufgezeigt, dass die Fernfeld-Wirbelstromtechnik aufgrund ihrer hohen Tiefenwirkung neue Möglichkeiten zum empfindlichen Fehlernachweis und zur Fehlerklassifizierung in dünn- und dickwandigen Bauteilen wie auch im Schweißnahtbereich bietet. Dabei wurde erstmalig anhand von 3D FEM-Simulationsmodellen der Einfluss der Erregerspule und Prüfparameter, der Bauteilgeometrie und Werkstoffeigenschaften wie auch der Fehlerausbildung auf die Wirbelstromverteilung und das magnetische Vektorpotential aufgezeigt. Die Simulationsergebnisse wurden anhand von umfangreichen experimentellen Untersuchungen verifiziert. Es wurde aufgezeigt dass die Fernfeld-Wirbelstromtechnik bisher ungenutztes Potential beinhaltet und in einem weiten Bauteil- und Werkstoffbereich bei entsprechender Anpassung an die Prüfaufgabe einen gleichgewichteten, empfindlichen Fehlernachweis über der gesamten Bauteildicke ermöglicht. Eine eindeutige Bewertung der Fehlerausbildung und Fehlerlage sowie eine Klassifizierung der Fehler im Bauteil oder der Schweißnaht ist über die Analyse der Signalamplitude und Signalphase zu erreichen.

5. Danksagung

Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieser Arbeit im Rahmen eines Grundlagenprojektes im Normalverfahren „Entwicklung und Qualifizierung

einer Fernfeld-Wirbelstromtechnik zur prozessnahen zerstörungsfreien Fehlerprüfung dünn- und dickwandiger Aluminiumschweißnähte“

6. Referenzen

- [1] Atherton, D.L.; Czura, W.M.; Mackintosh, D.D.: Remote field eddy current defect interaction. Effects on the external field. *Mat. Eval.*, vol. 52, no. 11, 1994, p. 1288-1291
- [2] Debnar, A.; Lucht, B.; Becker, R.; Kröning, M.: Fern-Feld-Wirbelstrom. Eine Technik mit neuen Möglichkeiten. *DGZfP-Berichtsband 52-1*, 1996, S. 687-692 [3]
- [3] Lunin, V.P.; Podobedov, D.V.; Alexeevsky, D.G.; Thomas, H.M.: Untersuchung zur Wirbelstrom-fernfeldmethode für die Prüfung von koaxial verschweißten Rohren mittels Finiter Elemente. *DGZfP-Berichtsband 64*, 1998, S. 91-98
- [4] Shin, Y.K.; Chung, T.E.; Lord, W.: Remote field eddy current technique applied to the inspection of non-magnetic steam generator tubes. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP Conference Proceedings 557*, vol. 20A, 2001, p. 392-399
- [5] Weber, W.; Feiste, K.L.; Reimche, W.; Bach, F.W.; Stegemann, D.: Fernfeld-Wirbelstromprüfsystem zur Fehlerprüfung von dickwandigen austenitischen Rohrleitungskomponenten. *DGZfP-Berichtsband 75*, 2001
- [6] Ostermeyer, H.; Stegemann, D.: New aspects for remote field eddy current probe development. *Proc. of the 7th European Conf. On NDT*, 1998, p. 2569-2576
- [7] Sun, Y.S.; Udpa, L.; Udpa, S.; Lord, W.; Nath, S.; Lua, S.K.; Ng, K.H.: A novel remote field eddy current technique for inspection of thick-walled aluminium plates. *Mat. Eval.*, vol. 56, no. 1, 1998, p. 94-97
- [8] Reimche, W.; Stegemann, D.; Weber, W.; Feiste, K.L.; Reichert, C.: Nachweis von Ermüdung und Materialfehlern in dickwandigen Rohrleitungskomponenten mit elektromagnetischen Prüftechniken. *Berichtsband zum 26. MPA-Seminar Sicherheit und Verfügbarkeit in der Energietechnik*, Stuttgart 2000, S. 11.1-11.31
- [9] Weber, W.: Zerstörungsfreie Prüfung dickwandiger austenitischer Rohre und Rohrbögen mit fortschrittlicher Wirbelstromtechnik. *Dissertation, Universität Hannover*, 2002
- [10] Weber, W.; Feiste, K.L.; Reimche, W.; Stegemann, D.: Characterization of material degradation and detection of imperfections inside of thick walled austenitic components with electromagnetic testing. *The 10th int. symposium of applied electromagnetics and mechanics*, Tokyo, Japan, 13-16 May 2001