

Materialcharakterisierung mittels elektromagnetisch angeregten Ultraschallwandlern

Ralf TSCHUNCKY *, Gerhard HÜBSCHEN *, Fabian WEBER *, Klaus SZIELASKO *
* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

Kurzfassung. Elektromagnetische Ultraschall-(EMUS-)Wandler, die ein koppelmittelfreies Senden und Empfangen von Ultraschall-(US-)Signalen ermöglichen, sind in den Bereichen der Fehlerprüfung und der US-basierten Spannungsmessung etabliert, in denen der Einsatz von piezoelektrischen US-Wandlern nur bedingt möglich ist. So finden sie z.B. Verwendung bei Hochtemperatur-Anwendungen, beim Einsatz von geführten US-Wellen und bei der Nutzung von Wellentypen, die piezoelektrisch nur schwer bzw. nicht anregbar sind.

In der jüngeren Vergangenheit wurden EMUS-Wandler vom Fraunhofer IZFP auch vermehrt zur Materialcharakterisierung ertüchtigt und verwendet.

So ist es im Rahmen eines Forschungsvorhabens gelungen, drei unterschiedliche Typen von EMUS-Wandlern zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von austenitischen Stählen zu konzipieren und aufzubauen. Bei den unterschiedlichen Typen handelt es sich um Wandler für horizontal und radial polarisierte Scherwellen sowie für Rayleigh-Wellen. Deren in-situ Anwendung zeigt eine gute Korrelation mit den ablaufenden Ermüdungsvorgängen im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis hin zu 300°C.

In einem weiteren Vorhaben wurde ein EMUS-Kombinations-Wandler zur zerstörungsfreien Charakterisierung der Neutronenversprödung durch die austenitische Plattierung in Reaktordruckbehältern entwickelt und aufgebaut. Dieser Wandler kombiniert die elektromagnetische US-Anregung und Methoden der elektromagnetischen Materialcharakterisierung in einem Prüfkopf.

Darüber hinaus wurden fokussierende EMUS-Sende-Wandler entwickelt und aufgebaut, die erfolgreich zur in situ Charakterisierung des Rissverhaltens in Dreipunktbiegeversuchen eingesetzt werden konnten.

Einführung

Elektromagnetische Ultraschall-(EMUS-) Wandler sind in den Bereichen der Fehlerprüfung und der US-basierten Spannungsmessung etabliert, in denen der Einsatz von piezoelektrischen US-Wandlern nur bedingt möglich ist. EMUS-Wandler erzeugen die Ultraschallwellen, im Gegensatz zu piezoelektrischen Wandlern, direkt in elektrisch leitfähigen oder magnetischen Materialien ohne ein Koppelmedium zu verwenden [1-3] (siehe Abb. 1). Der Empfang von US-Signalen erfolgt ebenfalls koppelmittelfrei anhand über die gleichen Mechanismen, die auch zur Anregung genutzt werden.

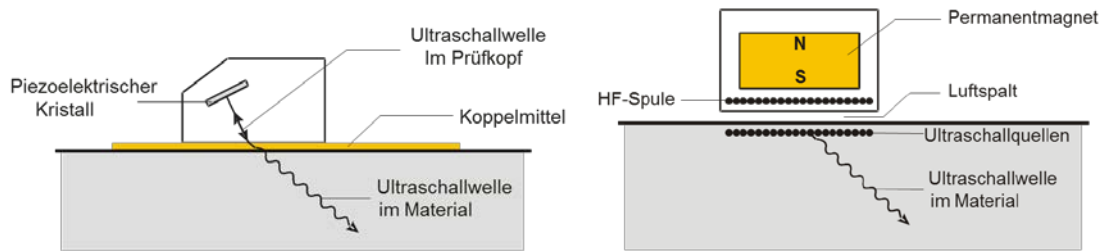


Abb. 1. Ultraschallanregungsprinzipien; Links: Piezoelektrische Ultraschallwandler; Anregung mittels Koppelmittel; Rechts: Elektromagnetische Ultraschallwandler; Koppelmittelfreie Anregung.

EMUS-Wandler finden z.B. Verwendung bei Hochtemperatur-Anwendungen [4-6], beim Einsatz von geführten US-Wellen [7-9] und bei der Nutzung von Wellentypen die piezoelektrisch nur schwer bzw. nicht anregbar sind [10].

In der jüngeren Vergangenheit wurden EMUS-Wandler vom Fraunhofer IZFP auch vermehrt zur Materialcharakterisierung ertüchtigt und verwendet. Im Folgenden werden exemplarisch drei Anwendungsfälle von EMUS-Wandlern zur Materialcharakterisierung vorgestellt.

1. Detektion und Interpretation von ermüdungsbedingten Mikrostrukturveränderungen im Vorfeld der Rissbildung

1.1 Ausgangssituation

In Kernkraftwerken unterliegen austenitische Rohrleitungssysteme betriebsbedingt thermo-mechanischen Beanspruchungen. Temperaturgradienten aufgrund des Wechsels von kalten und warmen Medien in den Leitungen führen zu Dehnungsgradienten. Davon sind insbesondere Volumenausgleichsleitungen (Surgelines), Leitungen des Volumenregel- und Nachkühlsystems sowie Sprühleitungen betroffen. Als Folge der thermo-mechanischen Beanspruchungen finden Mikrostrukturveränderungen und Ermüdung des Rohrleitungsmaterials statt.

1.2 Ergebnisse

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt des Fraunhofer IZFP und dem Lehrstuhl für Werkstoffkunde, TU Kaiserslautern wurden thermo-elastische/-plastische Beanspruchungszustände eines austenitischen Rohrleitungswerkstoffes in Ermüdungsversuchen systematisch untersucht. Ziel des Vorhabens war die Entwicklung neuer, zerstörungsfreier Sensorsysteme und -konzepte, mit deren Hilfe eine Detektion und Interpretation ermüdungsbedingter Mikrostrukturveränderungen im Vorfeld der Rissbildung ermöglicht werden kann. Durch eine konventionelle sowie zerstörungsfreie in situ Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens wurde ein Konzept zur Schadensfrüherkennung für eine zielgerichtete Bauteilüberwachung im Rahmen eines proaktiven Alterungsmanagements entwickelt [11].

Es ist im Rahmen eines Forschungsvorhabens gelungen, drei unterschiedliche Typen von EMUS-Wandlern zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von austenitischen Stählen zu konzipieren und aufzubauen. Bei den unterschiedlichen Typen handelt es sich um Wandler für horizontal und radial polarisierte Scherwellen sowie für Rayleigh-Wellen (siehe Abb. 2).

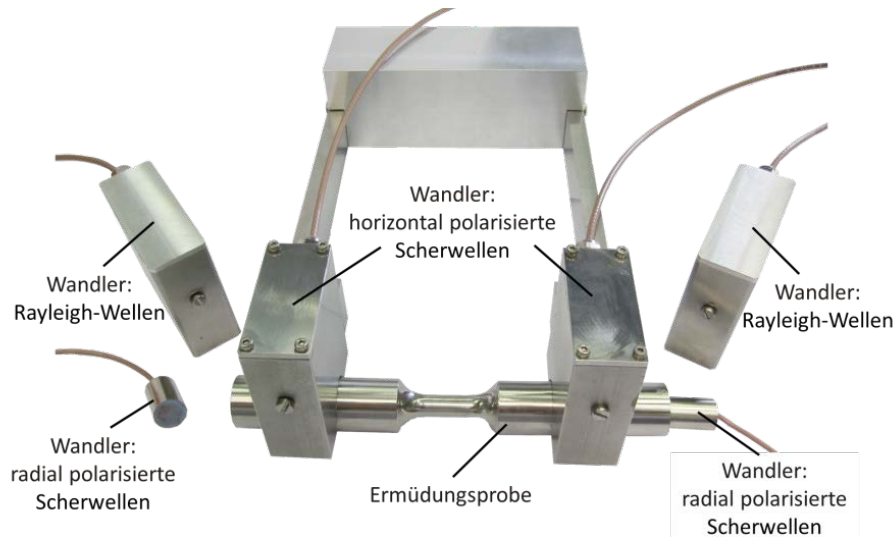


Abb. 2. Unterschiedliche Typen von EMUS-Wandler zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von austenitischen Stählen in Ermüdungsversuchen teils an eine Ermüdungsprobe appliziert.

Deren in situ Anwendung zeigt eine gute Korrelation mit den ablaufenden Ermüdungsvorgängen im Temperaturbereich von Raumtemperatur (RT) bis hin zu 300°C.

In totaldehnungskontrollierten Einstufenversuchen bei RT und 300°C wurde das zyklische Verformungsverhalten des austenitischen Stahles X6CrNiNb1810 durch neuartige Ultraschallmessungen mit EMUS-Wandlern untersucht. Das zyklische Verformungsverhalten bei RT wird grundlegend durch die α' -Martensitumwandlung bestimmt, die zu einer zyklischen Verfestigung führt (siehe Abb. 3 links, Bereich 1 und 2). Bei 300°C entsteht kein α' -Martensit und die Spannungsamplitude liegt deutlich niedriger als bei RT (siehe Abb. 3 rechts).

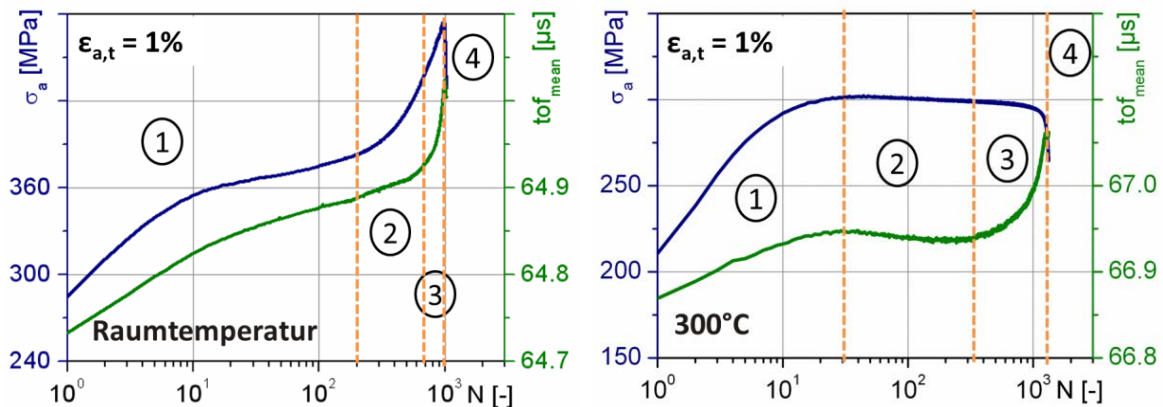


Abb. 3. Exemplarischer Verlauf der Spannungsamplitude (σ_a) und der Veränderung des Mittelwertes der Ultraschalllaufzeit (tof_{mean}) als Funktion der Lastspielzahl (N); Links: Raumtemperatur, 1: Anfangssteigung (Verfestigung), 2: lineare Steigung (α' -Martensitbildung & Mikrorisse), 3: zweite Steigung (Risswachstum), 4: Versagen; Rechts: T = 300°C, 1: Anfangssteigung (Verfestigung), 2: Abnahme (Entfestigung), 3: zweite Steigung (Mikrorisse & Risswachstum), 4: Versagen.

Für ausgewählte Ermüdungsstadien konnte durch Ferritscopemessungen, TEM- und REM-Aufnahmen gezeigt werden, dass die Ultraschalllaufzeitmessungen die ermüdungsbedingten mikrostrukturellen Veränderungen sehr zuverlässig und mit hoher Empfindlichkeit nachweisen können [12-14].

2. Zerstörungsfreie Charakterisierung von Werkstoffzustandsänderungen in Reaktordruckbehältern

2.1 Ausgangssituation

Bei der Nutzung der Kernenergie zur Energiegewinnung sind reaktorkernnahe Elemente der Druckbehälter unterschiedlich hohen Neutronenbestrahlungen ausgesetzt. Aus diesem Grund erfahren die verbauten Werkstoffe infolge der Auslagerungszeit unter Betriebsbedingungen eine durch die Neutronenbestrahlung bedingte Veränderung des Mikrogefüges in Form von Versprödung des Werkstoffes [15, 16].

Üblicherweise wird die Anlagensicherheit bezüglich dieser Mikrogefügeveränderungen über Einhängeproben abgesichert. Es handelt sich um Standardzug- und ISO-V-Proben exakt des gleichen Reaktor-Druckbehälter (RDB)-Materials und seines Schweißgutes, welche in spezielle Bestrahlungskanäle des RDB eingehängt werden. Diese eilen bzgl. ihrer Strahlenbelastung derjenigen der Behälterinnenwand zeitlich voraus. Bei Revisionen werden diese Proben entnommen und zerstörend im Zugversuch bei 150°C und 275°C geprüft, bzw. wird die Kerbschlagarbeit als Funktion der Temperatur im Kerbschlagbiegeversuch ermittelt.

2.2 Ergebnisse

In einem abgeschlossenen Forschungsvorhaben konnte das Fraunhofer IZFP ein zerstörungsfreies Prüfverfahren entwickeln, welches ein Monitoring der Behälterinnenwand bezüglich des durch die Neutronenbestrahlung veränderten Werkstoffzustandes durch die austenitische Plattierung ermöglicht [17].

Es konnte gezeigt werden, dass die Kombination von zwei elektromagnetischen zerstörungsfreien Prüfverfahren das größte Potential zur zerstörungsfreien Charakterisierung der durch Neutronenbestrahlung an Druckbehälterbaustählen induzierten Mikrogefügeveränderungen besitzt. Bei den beiden in einem Prüfkopf kombinierten Prüfverfahren handelt es sich um die mikromagnetische Materialcharakterisierung mit der 3MA-Prüftechnik (mikromagnetische, Multiparameter, Mikrostruktur- & Spannungsanalyse) und um die dynamische Magnetostriktion auf der Basis von EMUS-Wandlern (siehe Abb. 4).

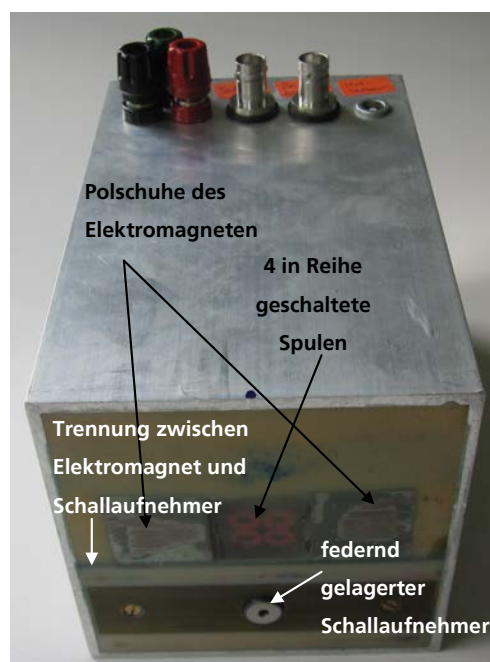


Abb. 4. 3MA-EMUS-Kombinationsprüfkopf.

Mit diesem Kombinationsprüfkopf konnte das Grundmaterial von dem Schweißgut durch die austenitische Plattierung des RDB hindurch unterschieden werden (siehe Abb. 5).

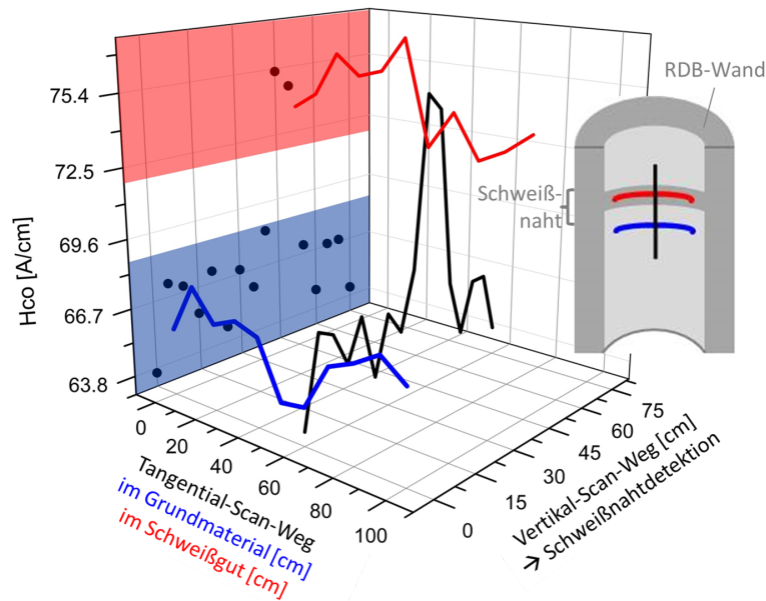


Abb. 5. Vorgehen mit dem 3MA-EMUS-Kombinationsprüfkopf am RDB wegen gefügespezifischen Kalibrierungen: 1. Vertikalscan zur Schweißnahtdetektion durch die Plattierung, 2. Tangentialscan im Bereich der Schweißnaht und des Grundgefüges durch die Plattierung.

Dies ist zwingend notwendig, da zur zerstörungsfreien Charakterisierung der Neutronenversprödung in der RDB-Wand separate Kalibrierungen für die Mikrogefügestände im Grundwerkstoff und im Schweißgut erforderlich sind. Die Messungen entlang der Schweißnaht des Großbehälters zeigten im Vergleich zu den Messungen an den unterschiedlich neutronenbestrahlten ISO-V-Proben der Schweißgüter ein deutlich geringeres Streuband in den zerstörungsfreien Prüfgrößen. Dies zeigt auf, dass die durch das inhomogene Schweißnahtgefüge verursachten Prüfgrößenschwankungen im Vergleich zu den durch die Neutronenbestrahlung verursachten Prüfgrößenänderungen klein sind. Somit konnte die prinzipielle Anwendbarkeit des 3MA-EMUS-Kombinationsverfahrens und damit der zerstörungsfreien Charakterisierung der Strahlenversprödung bei der Revision des RDB aufgezeigt werden [18-20].

3 Instrumentierung von Dreipunktbiegeversuchen

3.1 Ausgangssituation

Zur Absicherung der Werkstoffqualität bezüglich Zähigkeit und Sprödbriechanfälligkeit werden derzeit Kerbschlagbiegeversuche und Compact Tension-Versuche bzw. analog Dreipunktbiegeversuche an SE(B)-Proben (Single Edge Bending) mit Teillastungszyklen durchgeführt. Die Quantifizierung des Versagensverhaltens im Übergangsbereich der Zähigkeit ist derzeit nur bedingt möglich, was entsprechend hohe Sicherheitsabstände zur Bewertung des Versagensverhaltens erforderlich macht. Die zusätzliche Instrumentierung solcher Versuche sollte weitere Informationen über den Versagensablauf liefern und eine bessere bruchmechanische Beurteilung der Versagenswahrscheinlichkeit erlauben [21]. Das Risswachstum kann standardmäßig nur nach Versuchsende für die Zeitpunkte der Teillastungen zeitintensiv ermittelt werden. Außerdem machen die Teillastungszyklen einen Großteil der Versuchsdauer aus [22-25].

3.2 Ergebnisse

Zur Instrumentierung der Dreipunktbiegeversuche wurden unter anderem zusätzlich EMUS-Wandler zur Erfassung von Ultraschalllaufzeiten (time of flight: tof) von Rayleigh-Wellen appliziert. Bei diesen Rayleigh-Wellen handelt es sich um geführte Wellen, die sich oberflächennah von der Anordnung der Wandler ausgehend vom Sende- entlang der Kerb- und Rissflanken in Richtung des Empfangs-Wandlers ausbreiten (siehe Abb. 6).

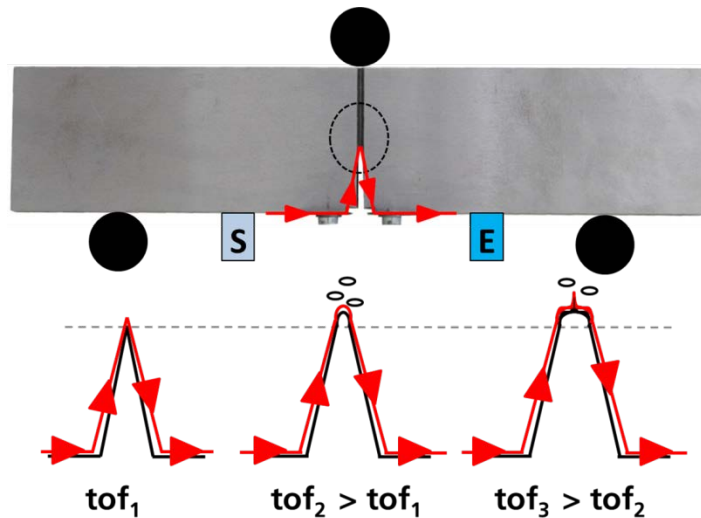


Abb. 6. Anordnung der EMUS-Wandler und der systematische Verlauf der angeregten Oberflächenwelle während der Dreipunktbiegeversuche (oben) und erwartetes Verhalten der Rissausbreitung sowie der in situ gemessenen Ultraschalllaufzeit während eines Dreipunktbiegeversuches (unten).

Mit zunehmender Rissöffnung ist, bedingt durch den zunehmenden Laufweg, auch eine zunehmende Laufzeit zu erwarten (siehe Abb. 6.).

Um eine Optimierung der Auflösung und eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses zu erreichen wurden Rayleigh-Wellen-Wandler entwickelt, die eine Fokussierung der angeregten Ultraschallwelle auf den Rissspitzenbereich der SE(B)-Proben gewährleisten (siehe Abb. 7.).

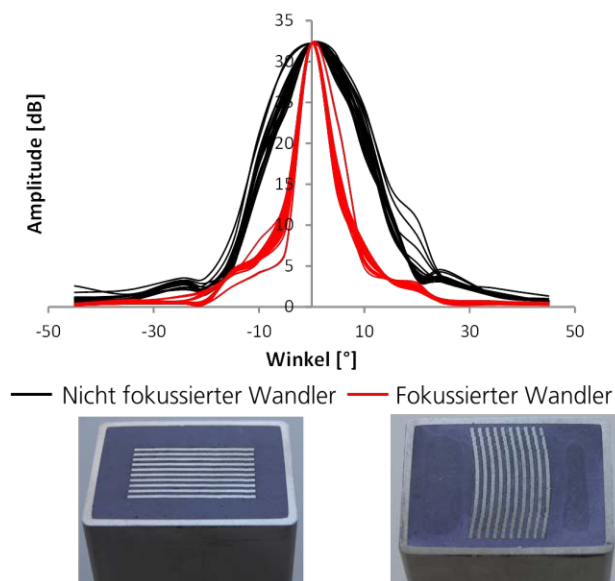


Abb. 7. Vergleich der auf ihr jeweiliges Amplitudenmaximum normierten Amplitudenwerte für einen 1 MHz-Rayleigh-Sende-Wandler mit Fokussierung (Rot, Foto unten rechts) und ohne Fokussierung (Schwarz, Foto unten links)

Durch die Fokussierung wird die Schallkeule der erzeugten Rayleigh-Welle im Fokusabstand schmaler, um so zu verhindern, dass Störungen bedingt durch die Probenränder und deren Veränderung während den Dreipunktbiegeversuchen die Rissverfolgung beeinflussen.

Es konnte gezeigt und statistisch abgesichert werden, dass die gemessene Ultraschalllaufzeit Informationen über das Rissgeschehen während des Dreipunktbiegeversuches liefert. Die Ultraschalllaufzeit kann das Risswachstum in situ kontinuierlich nachweisen, ohne Teilentlastungen messen zu müssen. Dies belegt ein linearer Zusammenhang zwischen der Ultraschalllaufzeit beziehungsweise dem daraus ermittelten Risswachstum und dem aus den Teilentlastungen ermittelten Risswachstum (siehe Abb. 8).

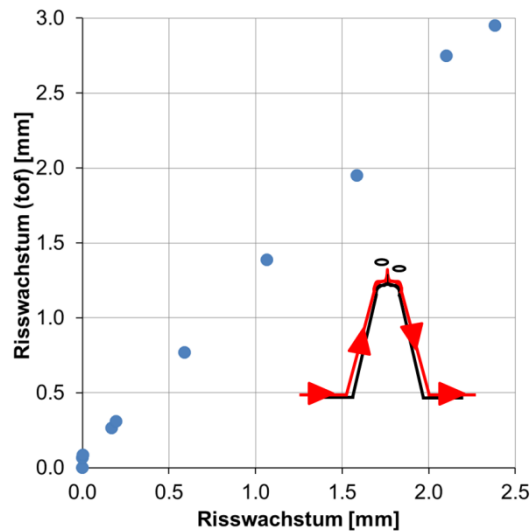


Abb. 8. Exemplarische Korrelation zwischen dem mittels Teilentlastungen bestimmten und dem mittels der relativen Laufzeit bestimmten Risswachstum

Aus Abb. 8. zeigt sich neben einem linearen Zusammenhang, dass das mittels der Laufzeit bestimmte Risswachstum bezüglich des über die Teilentlastungen bestimmten Risswachstums offsetbehaftet ist. Dieser Offset ergibt sich durch die fortschreitende Öffnung des angeschwungenen Risses. Eine Kompensation dieses Offsets ist möglich. Darüber hinaus konnte auch der Zeitpunkt der Rissinitiierung im Ultraschalllaufzeitsignal detektiert werden [26-28].

4. Zusammenfassung

Der zuvor erläuterte erfolgreiche Einsatz von EMUS-Wandlern in mehreren Forschungsvorhaben hat gezeigt, dass deren Verwendung in der Materialcharakterisierung ein weiteres, breites und stellenweise auch neues Anwendungsfeld für EMUS-Wandler darstellt. Es ist davon auszugehen, dass auch zukünftig immer mehr EMUS-Wandler im Bereich der Materialcharakterisierung Verwendung finden werden.

Danksagung

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Forschungsvorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem BMWi-Förderkennzeichen 1501379, 1501440 und 1501352 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken dem BMWi für die finanzielle Unterstützung des Projektes.

Gefördert durch:
 Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Referenzen

- [1] T. Ohtani, H. Ogi, M. Hirao: Creep-Induced Microstructural Change in 304-Type Austenitic Stainless Steel; *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME* 128 (2006), 234-242.
- [2] R. Murayama, K. Yamaguchi: Nonlinear Ultrasonic Wave Detection by Electromagnetic Acoustic Transducer [EMAT] for Guided wave; *Japanese Journal of Applied Physics Part 1* 44 (2005), 4385-4388.
- [3] H.J. Salzburger: EMAT's and its Potential for Modern NDE - State of the Art and Latest Applications; *IEEE International Ultrasonics Symposium 1* (2009), 621-628.
- [4] M. Kröning, H.-J. Salzburger, L. von Bernus, J. Smorodinsky, V.I. Mironenko: Measurement of Wall-Thickness at Extreme Temperatures Using EMAT's; In: Nair, K. (Ed.); Raj, B. (Ed.); Murthy, C.R.L. (Ed.); Jayakumar, T. (Ed.): *World Conference on Nondestructive Testing (14) Vol. 1: WCNDT*. New Delhi: Oxford & IBH Publishing, 1996, 577-580.
- [5] A. Wilbrand, H. Smit: Elektromagnetischer Ultraschallprüfkopf für die Oberflächenprüfung bei Temperaturen bis 1000 Grad Celsius; In: *Dänische Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung: Moderne ZfP - Analysen und Prognosen: DGZfP-Jahrestagung 1989*. Berlin, 1990, 460-467 (DGZfP-Berichtsbände 18).
- [6] E. Lühr, A. Walleiser, G. Hübschen: Monitoring the filling level of the RPV using stationary EMUS-probes; In: *Nuclear Engineering and Design* 119 (1990), ISSN 0029-5493, 1990, 456-466.
- [7] G. Hübschen, H.-J. Salzburger, T. Meier, W. Bisle: Trockene Ultraschallprüfung zum Rissnachweis an Lap Joints von Flugzeugkomponenten. Erste Erfahrungen zur Anwendung geführter SH-Wellen und EMUS-Prüfköpfen an GLARE-Komponenten; In: *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.: DGZfP-Jahrestagung 2004. ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung: Zerstörungsfreie Materialprüfung*. Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2004, V43 (DGZfP-Berichtsbände 89-CD).
- [8] H.-J. Salzburger, G. Hübschen: Fehlerprüfung und Schabungskontrolle von Stumpfschweißnähten an Feiblechen und dünnwandigen Rohren. Erprobte Ultraschalltechniken mittels SH-Plattenwellen und EMUS-Prüfköpfen; In: *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): DGZfP-Jahrestagung 2003. ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung: Zerstörungsfreie Materialprüfung*. Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, 2003 (DGZfP-Berichtsbände 83-CD).
- [9] H.-J. Salzburger, G. Hübschen: Koppelmittelfreie Ultraschallprüfung von Laserschweißnähten in dünnen Stahlblechen mit geführten Wellen und EMUS-Wandlern; In: *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): DACH-Jahrestagung 1997 Zerstörungsfreie Materialprüfung*. Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, 1997 (DGZfP-Berichtsbände 59.1).
- [10] G. Hübschen, H.-J. Salzburger, M. Kröning, K. Oellrich, L. von Bernus: Results and experiences of ISI austenitic and dissimilar welds using SH-waves and EMUS-probes; In: Kussmaul, K.F.; *International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology e.V.: Structural mechanics in reactor technology (SMIRT)*, (12, 1993). Vol. G: *Fracture Mechanics and Non-Destructive Evaluation*. Amsterdam: Elsevier, 1993, 249-254.
- [11] I. Altpeter, R. Tschuncky, G. Seiler, G. Dobmann, C. Boller, A. Sorich, M. Smaga, D. Eifler: Schadensfrüherkennung an thermozyklisch beanspruchten austenitischen Werkstoffen - Methodenentwicklung zum Monitoring im Rahmen des Alterungsmanagements; Abschlussbericht GRS-Vorhabensnummer: 1501379, 120116-TW, 2012, 113 Seiten.
- [12] R. Tschuncky, I. Altpeter, K. Hällen, G. Dobmann, C. Boller, A. Sorich, M. Smaga, D. Eifler: Schadensfrüherkennung an thermozyklisch beanspruchten austenitischen Werkstoffen; In: *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): DGZfP-Jahrestagung 2011. ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung: Zerstörungsfreie Materialprüfung*. Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2011, 9 Seiten (DGZfP-Berichtsbände 127-CD).
- [13] I. Altpeter, R. Tschuncky, K. Hällen, G. Dobmann, C. Boller, M. Smaga, A. Sorich, D. Eifler: Early Detection of Damage in Thermo-Cyclically Loaded Austenitic Materials-Development of Condition Monitoring Technology within the Context of the Aging Management; In: *US Society for Machinery Failure Prevention Technology (MFPT): International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies*. Northhampton, U.K.: British Institute of Non-Destructive Testing, 2011, 11 Seiten.
- [14] I. Altpeter, R. Tschuncky, K. Hällen, G. Dobmann, C. Boller, M. Smaga, A. Sorich, D. Eifler: Early detection of damage in thermo-cyclically loaded austenitic materials; In: Rao, B.P.C. (Ed.); Jayakumar, T. (Ed.); Balasubramanian, K. (Ed.); Raj, B. (Ed.): *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XV): ENDE 2011*. Amsterdam, Washington, Tokyo: IOS Press, 2012, 130-139 (*Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics* Vol. 36).
- [15] J. Föhl, T. Weißenberg: Einfluss der Neutronenbestrahlung auf die Werkstoffeigenschaften sowjetischer RDB-Stähle, Abschlussbericht zum Vorhaben 1500892 März 1999, MPA Berichts-Nr. 87 27 01 005

- [16] D. Willer, G. Zies, D. Kuppler, J. Föhl, H.H. Katerbau: Betriebsbedingte Eigenschaftsänderungen kupferhaltiger ferritischer Behälter- und Rohrleitungsstähle, Abschlussbericht zum Vorhaben 150 1087 Oktober 2001, MPA Berichts-Nr. 8820 01 001.
- [17] I. Altpeter, R. Tschuncky, G. Hübschen, K. Szielasko, G. Dobmann, S. Dugan, E. Altstadt, A. Ulbricht, H.-W. Viehrig, C. Zurbuchen, A. Gundermann, H. Hein, E. Keim, R. Hardt: Zerstörungsfreie Charakterisierung der durch Neutronenbestrahlung an Druckbehälterbaustählen induzierten Veränderungen des Mikrogefüges unter Nutzung elektromagnetischer zerstörungsfreier Prüfverfahren; Abschlussbericht GRS-Vorhabensnummer: 1501352, 110223-TW, 2011, 63 Seiten.
- [18] I. Altpeter, G. Dobmann, M. Kopp, R. Tschuncky: Zerstörungsfreie Charakterisierung der neutroneninduzierten Versprödung in Reaktordruckbehältern mittels elektromagnetischer zerstörungsfreier Prüftechniken; In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.: DGZfP-Jahrestagung 2010. ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung: Zerstörungsfreie Materialprüfung. Berlin: DGZfP, 2010, Di.1.C.2 (DGZfP-Berichtsbände 122-CD).
- [19] I. Altpeter, G. Dobmann, G. Hübschen, M. Kopp, R. Tschuncky: Nondestructive Characterization of Neutron Induced Embrittlement in Nuclear Pressure Vessel Steel Microstructure by using Electromagnetic Testing; In: Bièth, Michel (Ed.); Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.: NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components. Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, 2011, Fr.2.C.5, 7 Seiten (DGZfP-Berichtsbände 125-CD).
- [20] I. Altpeter, G. Dobmann, G. Hübschen, M. Kopp, R. Tschuncky: Nondestructive Characterization of Neutron Induced Embrittlement in Nuclear Pressure Vessel Steel Microstructure by using Electromagnetic; In: Chady, Tomasz (Ed.); Gratkowski, Stanislaw (Ed.); Takagi, Toshiyuki (Ed.); Udpa, Satish (Ed.): Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIV): ENDE 2010. Amsterdam, Washington, Tokyo: IOS Press, 2011, 322-329 (Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics Vol. 35).
- [21] E. Roos, U. Eisele, Determination of the Material Characteristic Values in the Elastic-Plastic Fracture Mechanics by Means of J-Integral Crack Resistance Curves, ASTM Journal of Testing and Evaluation JTEVA 16, No. 1, 1988.
- [22] ASTM E 1921-09a: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T₀, for Ferritic Steels in the Transition, Annual Book of ASTM Standards, Beuth Verlag, Berlin.
- [23] ASTM E 1820-08a: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness; Annual Book of ASTM Standards, Beuth Verlag, Berlin-
- [24] E. Roos, U. Eisele: Determination of the Material Characteristic Values in the Elastic-Plastic Fracture Mechanics by Means of J-Integral Crack Resistance Curves; ASTM Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 16, No. 1, 1988.
- [25] ISO 12135 2002 Metallic materials – unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness.
- [26] R. Tschuncky, K. Szielasko, I. Altpeter, H.-G. Herrmann, G. Dobmann, C. Boller: In-situ Überwachung des Rissfortschrittverhaltens mit zerstörungsfreien Messmethoden; In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): DGZfP-Jahrestagung 2012. ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung: DACH-Jahrestagung 2012. Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2012, Di.1.C.3 (DGZfP-Berichtsbände 136-CD).
- [27] K. Szielasko, R. Tschuncky, I. Altpeter, G. Dobmann, C. Boller: Real-Time Monitoring of Crack Growth Behaviour During Impact and Compact Tension Test with Non-Destructive Testing; In: Rebello, Joao M.A. (Ed.); Kojima, Fumio (Ed.); Chady, Tomasz (Ed.): Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XVI). Amsterdam, Washington, Tokyo: IOS Press, 2014, 238-246 (Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics Vol. 38).
- [28] K. Szielasko, R. Tschuncky, J. Kurz, H. Silcher: In-situ Überwachung des Rissfortschrittverhaltens während des Kerbschlagbiege- und Compact Tension-Versuches – Phase 2: Optimierung der zerstörungsfreien Prüfmethoden; Abschlussbericht GRS-Vorhabensnummer: 1501440, 140110-TW, 2014, 57 Seiten.