

# Zerstörungsfreie Charakterisierung der neutroneninduzierten Versprödung in Reaktordruckbehältern mittels elektromagnetischer Prüftechniken

Iris ALTPETER\*, Gerd DOBMANN\*, Melanie KOPP\*, Ralf TSCHUNCKY\*

\* Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Campus E3 1, 66123 Saarbrücken

**Kurzfassung.** 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.

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.

Im Folgenden wird aufgezeigt, dass elektromagnetische Prüfverfahren eine Charakterisierung der durch die Neutronenbestrahlung bedingten Mikrogefügeveränderungen zulassen und nach entsprechender Kalibrierung eine quantitative Charakterisierung der Versprödung ermöglichen. Diese Kalibrierung erfolgte sowohl für RDB-Stähle die sich in westlichen Anlagen im Einsatz befinden, als auch für RDB-Stähle aus Kernkraftwerken östlichen Designs. Als Prüfverfahren wurde ein Kombinationsverfahren, bestehend aus 3MA (Mikromagnetische, Multiparameter, Mikrostruktur- und Spannungsanalyse) und der dynamischen Magnetostriktion auf Basis von EMUS (Elektromagnetischer Ultraschall) eingesetzt. Dieses Kombinationsverfahren besitzt auch Potential für die wiederkehrende Revision des RDB, um durch eine austenitische Plattierung hindurch die Strahlenversprödung zu charakterisieren.

## Einführung

Bei der Nutzung der Kernenergie zur Energiegewinnung sind reaktorkernnahe Elemente der Reaktor-Druckbehälter (RDB) – je nach spezifischer Bauart (sowohl westlicher als auch östlicher Bauart) – unterschiedlich hohen Neutronenfluenzen ausgesetzt. Aus diesem Grund erfahren die verbauten Werkstoffe infolge der Auslagerungszeit unter Betriebsbedingungen eine durch die Neutronenbestrahlung bedingte Veränderung des Mikrogefüges. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Aufhärtung und damit ein Anstieg der Streckgrenze und Festigkeit auftritt. Die Verformungswerte im Zugversuch und die Kerbschlagarbeit in der Hochlage nehmen ab und die Verschiebung der

Spödrbruchübergangstemperatur im Kerbschlagbiegeversuch steigt an - der Werkstoff versprödet.

Üblicherweise wird die Anlagensicherheit bezüglich dieser Mikrogefügeveränderungen in sogenannten Überwachungsprogrammen über Einhängeproben abgesichert. Es handelt sich um Standardzug- und ISO-V-Proben exakt des gleichen 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 entnommen, werden diese Proben zerstörend im Zugversuch bei 150 °C und 275 °C geprüft, bzw. wird die Kerbschlagarbeit als Funktion der Temperatur im Kerbschlagbiegeversuch ermittelt.

Grundsätzlich besteht kein Anlass, diese bewährte Vorgehensweise zu ändern. Es muss jedoch betont werden, dass bei der Beladung mit Einhängeproben zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme von Kernkraftwerksanlagen von einer Vollastlebensdauer von 32 Jahren ausgegangen wurde. Entsprechend begrenzt ist das vorhandene Reservematerial und die Zahl an Einhängeproben, die sich zunehmend verbrauchen.

Nachfolgend wird aufgezeigt, dass die zerstörungsfreien Prüfverfahren (zfP) 3MA (Mikromagnetische, Multiparameter, Mikrostruktur- und Spannungsanalyse) und dynamische Magnetostriktion auf Basis von EMUS (Elektromagnetischer Ultraschall) zur Bestimmung der Verschiebung der Spödrbruchübergangstemperatur an ISO-V-Proben erfolgreich getestet wurden. Im Sinne der Sicherheitsvorsorge erscheint es daher sinnvoll, zu erproben, ob die zfP-Verfahren (3MA und dynamische Magnetostriktion auf Basis von EMUS) darüberhinaus auch geeignet sind, bei einer wiederkehrenden Innenrevision des RDB eingesetzt zu werden, um durch die austenitische Plattierung hindurch die Werkstoffveränderung unter Neutronenbestrahlung zu charakterisieren.

## **1. Ziel**

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens der Reaktorsicherheitsforschung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) Förderkennzeichen-Nr. 1501352 – soll nachgewiesen werden, dass die zerstörungsfreie Charakterisierung der durch Neutronenbestrahlung an RDB-Stählen induzierten Veränderungen des Mikrogefüges unter Nutzung elektromagnetischer zerstörungsfreier Prüfverfahren möglich ist. Mit der gleichen Art von zfP-Verfahren sollen bei der wiederkehrenden Prüfung (WKP) Behälter von innen untersucht und bezüglich ihres durch die Neutronenbestrahlung veränderten Mikrogefügezustandes beurteilt werden.

## **2. Lösungsweg**

Neutroneninduzierte Mikrogefügeveränderungen äußern sich in der Nachausscheidung von kohärenten, kleinen (Radius: 1-1,5 nm), kupferreichen Teilchen sowie in der Bildung von Leerstellen [1, 2]. Da diese Versprödungsvorgänge nicht nur die mechanischen, sondern auch die magnetischen Eigenschaften beeinflussen, haben elektromagnetische Prüfverfahren (3MA und dynamische Magnetostriktion auf Basis von EMUS) ein hohes Potenzial zur Charakterisierung der durch Neutronenbestrahlung induzierten Veränderungen des Mikrogefüges [3, 4]. Es besteht eine Analogie zwischen der Wechselwirkung der Versetzungen mit der Mikrostruktur unter mechanischer Last und der Wechselwirkung der Blochwände mit der Mikrostruktur, wenn der Werkstoff magnetisiert wird [4].

## 2.1 3MA-Prüfverfahren

Beim 3MA-Prüfverfahren wird durch Anlegen eines magnetischen Wechselfeldes die magnetische Domänenstruktur verändert. D.h. die Bloch-Wände, welche die einzelnen magnetischen Domänen voneinander trennen und die eigentlichen Sensoren im Material sind, bewegen sich und treten dabei in Wechselwirkung mit der Mikrostruktur, wie beispielsweise Versetzungen, Leerstellen und Cu-Ausscheidungen [4]. Dadurch wird die Bloch-Wandbewegung behindert, was sich wiederum auf das Ummagnetisierungsverhalten auswirkt.

Zur Erfassung des Ummagnetisierungsverhaltens werden in dem vom Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) entwickelten 3MA-Prüfverfahren [4] folgende 4 Prüfmethoden zur Analyse verwendet:

- magnetisches Barkhausenrauschen
- Oberwellenanalyse im Zeitsignal der tangentialen Magnetfeldstärke
- Wirbelstromimpedanzmessung
- Überlagerungspermeabilitätsmessung

Alle Prüfmethoden können mit einem Sensor in Aufsatztechnik im zeitlichen Multiplex angewendet werden. Aus den gemessenen Signalen der 4 Prüfmethoden werden Prüfgrößen abgeleitet, die mit den Werkstoffeigenschaften korrelieren. Zur quantitativen Bestimmung von Werkstoffeigenschaften kann eine Kalibrierung entweder mittels Regressionsanalyse oder Mustererkennung durchgeführt werden. Voraussetzung hierfür ist ein Kalibrierprobensatz mit abgestuften und bekannten Werkstoffeigenschaften. Bei der Kalibrierung mittels Regressionsanalyse wird der Zusammenhang zwischen den gemessenen Prüfgrößen und den anwendungsspezifischen Zielgrößen ermittelt. Bei der Kalibrierung mittels der Mustererkennung wird eine Ähnlichkeitsbetrachtung von gemessenen Prüfgrößen mit den Prüfgrößenmustern der Kalibrierproben mit bekannten Eigenschaften durchgeführt. Nach einer abgeschlossenen Kalibrierung ist es dem Anwender möglich, eine quantitative Bestimmung der entsprechenden Werkstoffeigenschaft durchzuführen. Durch den Einsatz mehrerer Prüfgrößen gelingt es, Störgrößen von Zielgrößen zu separieren [4].

## 2.2 Dynamische Magnetostriktion auf der Basis von EMUS

Im Fall des dynamischen Magnetostriktions-Verfahrens auf Basis von EMUS werden durch eine Hochfrequenz (HF)-Spule bei geeigneter Frequenzwahl im Bereich einer Wechselwirkungszone, die teilweise die obere Schicht des ferritischen Grundwerkstoffs überdeckt, Wirbelströme angeregt und damit auch dynamische Magnetfelder eingepreßt, die ähnlich wie beim 3MA-Verfahren durch die magnetische Bloch-Wandstruktur beeinflusst werden. Diese dynamischen Magnetfelder modulieren das von außen angelegte statische Magnetfeld und erzeugen durch den Magnetostriktionsprozess Ultraschallwellen, die sich senkrecht in die Behälterwand ausbreiten. Bei niedrigen Arbeitsfrequenzen wird eine stehende Welle in der Behälterwand erzeugt. Es ist zu erwarten, dass die Effektivität der magnetostriktiven Ultraschallanregung mit zunehmender Versprödung, bedingt durch die Behinderung der Bloch-Wandbewegung, abnimmt.

Ähnlich wie bei dem 3MA-Prüfverfahren werden Prüfgrößen abgeleitet, die mit Werkstoffeigenschaften korrelieren und mittels Kalibrierung zur quantitativen Bestimmung von Werkstoffeigenschaften verwendet werden können. Durch den Einsatz mehrerer voneinander unabhängiger elektromagnetischer Prüfgrößen gelingt es, Störgrößen (z.B. Mikrogefügeänderungen innerhalb einer Schweißnaht sowie Eigenspannungen und plastische Verformung) von Zielgrößen (z.B. Verschiebung der

Spröbruchübergangstemperatur) zu separieren.

Um mit beiden elektromagnetischen Prüfverfahren (3MA und dynamische Magnetostriktion auf Basis von EMUS) durch die Plattierung hindurch die Behälterinnenwand bzgl. der Neutronenversprödung zu charakterisieren, müssen entsprechend dimensionierte Sende-Empfangs-Systeme sowie niedrige Magnetisierungsfrequenzen genutzt werden.

### 3. Stand der Wissenschaft und Technik

Der Einsatz der zerstörenden Prüfung zur Charakterisierung von neutroneninduzierten Werkstoffzuständen an Einhängen hat sich bewährt. Der Forschungsbedarf ergibt sich daher nicht aus vorhandenen Defiziten dieser zerstörenden Prüftechnik, sondern aus dem Vorteil, zukünftig direkt an der RDB-Innenwand durch die austenitische Plattierung hindurch die Mikrogefügeveränderungen zerstörungsfrei detektieren zu können.

Darüber hinaus gibt es heute weltweit keine ZFP-Technik, die bei der wiederkehrenden Prüfung des RDB Aussagen über den Grad der Mikrogefügeveränderung der plattierungsnahen Bereiche liefern könnte.

Strahlenschäden in den RDB-Stählen werden nach internationalem Kenntnisstand zusätzlich unter dem Gesichtspunkt des Kupfergehaltes im Werkstoff und seiner Auswirkung auf die Bestrahlungsempfindlichkeit diskutiert. Es wird davon ausgegangen, dass eine Versprödung einerseits durch Leerstellenbildung, andererseits durch fein disperse, kohärente kupferreiche Ausscheidungen, die einen Radius von 1-1,5 nm haben, hervorgerufen wird [1, 2]. Ausheilglühungen bei 475 °C zeigen – bezogen auf die Diskussion der Härte – schon nach 100 h einen Härteabfall. Dasselbe Verhalten gilt auch für die Hochlage der Kerbschlagarbeit, nicht jedoch für die Verschiebung der Spröbruchübergangstemperatur. Sie kann nicht vollständig zurückgewonnen werden.

### 4. Durchgeführte Arbeiten

Es wurden unterschiedlich neutronenbestrahlte ISO-V-Proben (RDB-Grundwerkstoffe (Tabelle 1) einschließlich der relevanten Schweißgüter (Tabelle 2)) sowohl mit 3MA als auch mit dynamischer Magnetostriktion auf Basis von EMUS in der heißen Zelle bei AREVA NP GmbH [5] untersucht.

**Tabelle 1.** Probensatz der neutronenbestrahlten Grundwerkstoffe

Werkstoff	Kurzbezeichnung	Neutronen-Fluenz [n/cm <sup>2</sup> ]	Verschiebung der Spröbruchübergangstemperatur $\Delta T_{41}$ [K]
22NiMoCr 3 7	P7* <sup>1</sup>	0 - 40.3 x 10 <sup>18</sup>	0 - 32
20 MnMoNi 5 5	P141* <sup>1</sup>	0 - 10.7 x 10 <sup>18</sup>	0 - 9
22 NiMoCr 3 7	P147* <sup>1</sup>	0 - 43.8 x 10 <sup>18</sup>	0 - 23
ASTM A508 C1.3 (22 NiMoCr 3 7)	JFL* <sup>2</sup>	0 - 86.0 x 10 <sup>18</sup>	0 - 78
ASTM A533B C1.1 (20 MnMoNi 5 5)	JRQ* <sup>2</sup>	0 - 98.0 x 10 <sup>18</sup>	0 - 221

\*<sup>1</sup> = westliches Design

\*<sup>2</sup> = östliches Design

**Tabelle 2.** Probensatz der neutronenbestrahlten Schweißgüter

Werkstoff	Kurzbezeichnung	Neutronen-Fluenz [n/cm <sup>2</sup> ]	Verschiebung der Sprödbruchübergangstemperatur $\Delta T_{41}$ [K]
S3NiMo3-UP	P16* <sup>1</sup>	0 - 11.7 x 10 <sup>18</sup>	0 - 67
S3NiMo1-UP	P141* <sup>1</sup>	0 - 49.7 x 10 <sup>18</sup>	0 - 38
S3NiMo1	P140* <sup>1</sup>	0 - 10.4 x 10 <sup>18</sup>	0 - 21

\*<sup>1</sup> = westliches Design

Um für die Kalibrierung ein möglichst großes Spektrum an neutronenverspröderten ISO-V-Proben abzudecken, wurden neben ISO-V-Proben aus RDB-Werkstoffen von Kernkraftwerken westlichen Designs auch ISO-V-Proben aus RDB-Werkstoffen von Kernkraftwerken östlichen Designs verwendet. Darüber hinaus wurden an diesen ISO-V-Proben in der heißen Zelle Kerbschlagbiegeversuche durchgeführt und die Verschiebung der Sprödbruchübergangstemperaturwerte (Referenzwerte) ermittelt.

Zusätzlich erfolgten Messungen an Testkörpern mit austenitischer Plattierung aus unterschiedlichen Forschungsprogrammen, um EMUS-Wandler für niedrige Frequenzen auszulegen, sodass unterhalb der Plattierung im ferritischen Grundwerkstoff und Schweißgut magnetostraktiv Ultraschall angeregt und empfangen werden kann. Der Einfluss des Mikrogefüges entlang einer Schweißnaht auf die magnetostriktive Anregung wurde an einem Behälterkörper (Kalibriertestkörper für die WKP an WWER (Wasser-Wasser-Energie-Reaktor)-440-Reaktoren) untersucht. Weiterhin wurden erste Untersuchungen an plattierten Testkörpern mit dem 3MA-Prüfverfahren durchgeführt.

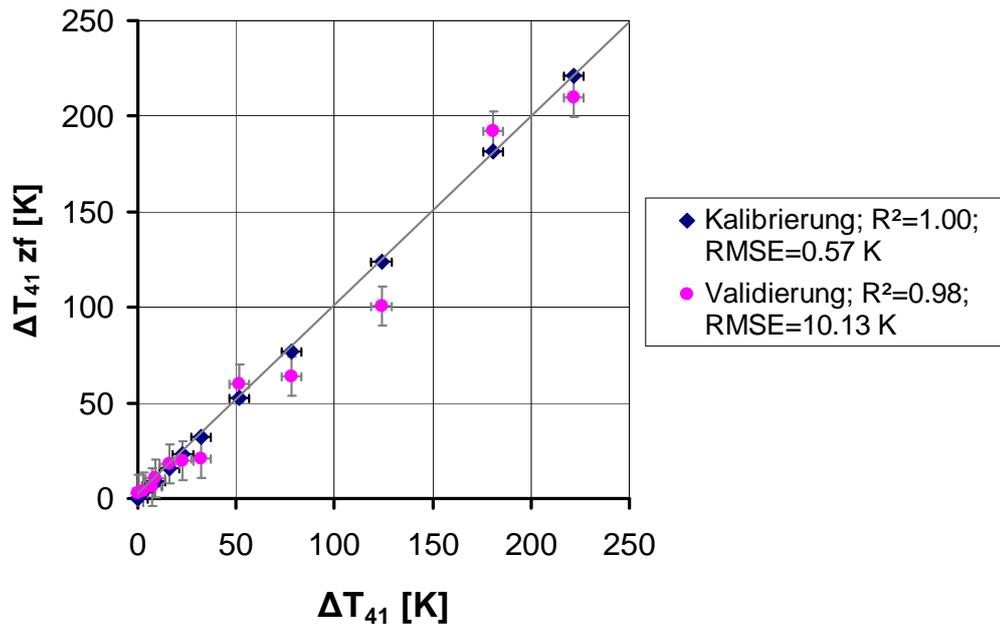
## 5. Erzielte Ergebnisse

### 5.1 Neutronenbestrahlte ISO-V-Proben

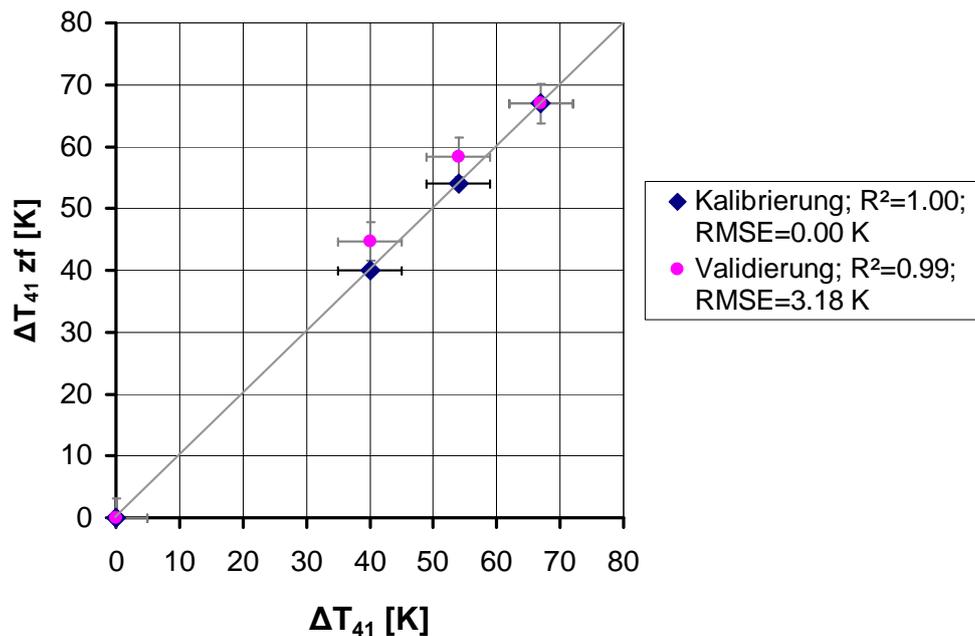
Basierend auf der Datenbasis, bestehend aus den elektromagnetisch ermittelten Prüfgrößen (3MA und dynamische Magnetostriktion auf Basis von EMUS) und den zugehörigen Referenzwerten, welche im Kerbschlagbiegeversuch in der heißen Zelle ermittelt wurden, sind Regressionsansätze bzw. Mustererkennungsansätze zur Kalibrierung entwickelt worden.

Unter Zugrundelegung von Mustererkennungsansätzen, welche sowohl 3MA- als auch dynamische Magnetostriktions-Prüfgrößen miteinander verknüpfen, wurde an Validierproben von RDB-Grundwerkstoffen (Tabelle 1) eine sehr gute Korrelation ( $R^2 = 0.98$ ) zwischen der zerstörungsfrei ermittelten und der in Kerbschlagbiegeversuchen ermittelten Verschiebung der Sprödbruchübergangstemperatur erhalten (Abb. 1). Der RMSE-Wert (Wurzel des mittleren Fehlerquadrates, engl.: Root Mean Square Error) liegt bei 10.13 K.

Ebenso wurde an Validierproben von RDB-Schweißgütern (Tabelle 2) eine sehr gute Korrelation ( $R^2 = 0.99$ ) zwischen der zerstörungsfrei ermittelten und der in Kerbschlagbiegeversuchen ermittelten Verschiebung der Sprödbruchübergangstemperatur erhalten (Abb. 2). Der RMSE-Wert liegt bei 3.18 K.



**Abb. 1.** Korrelation zwischen zerstörungsfrei ermittelter Verschiebung der Spröbruchübergangstemperatur und konventionell ermittelter Verschiebung der Spröbruchübergangstemperatur für RDB-Grundwerkstoffe



**Abb. 2.** Korrelation zwischen zerstörungsfrei ermittelter Verschiebung der Spröbruchübergangstemperatur und konventionell ermittelter Verschiebung der Spröbruchübergangstemperatur für RDB-Schweißgüter

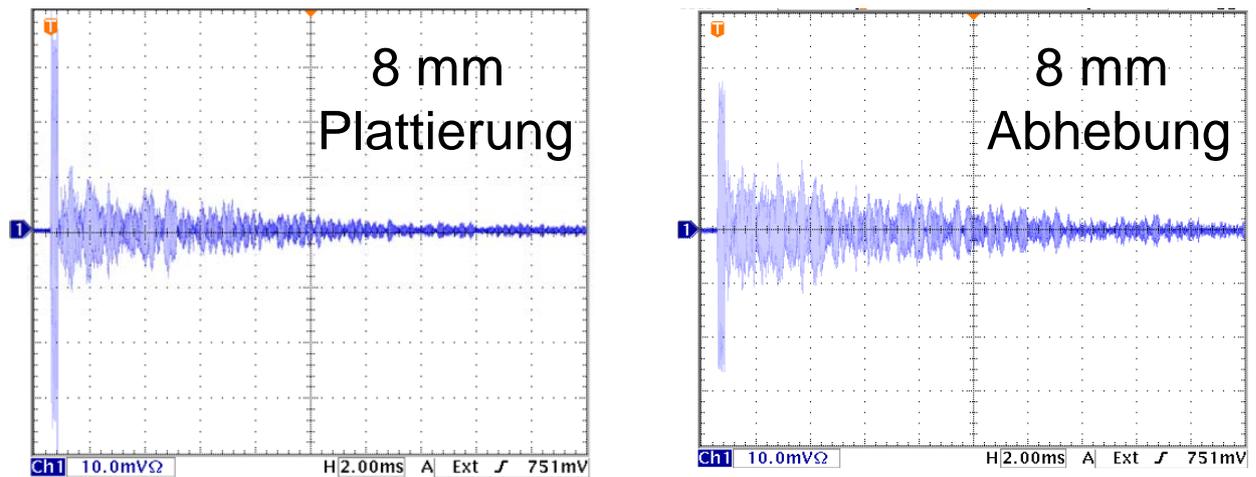
## 5.2 Ferritische Testkörper mit austenitischer Plattierung

Im Hinblick auf eine zerstörungsfreie In-situ-Messung an der RDB-Innenwand durch die austenitische Plattierung hindurch wurden dynamische Magnetostruktions- und 3MA-Messungen an einem plattierten ferritischen Testkörper der Wanddicke 30 mm durchgeführt.

Um eine große Eindringtiefe der Wirbelströme zu erzielen, wurden niederfrequente EMUS-Wandler für den Frequenzbereich von  $\leq 40$  kHz ausgelegt, um von der plattierten Seite der Behälterwand den Werkstoffzustand im ferritischen Grundwerkstoff und Schweißgut unmittelbar unterhalb der austenitischen Plattierung untersuchen zu können [6].

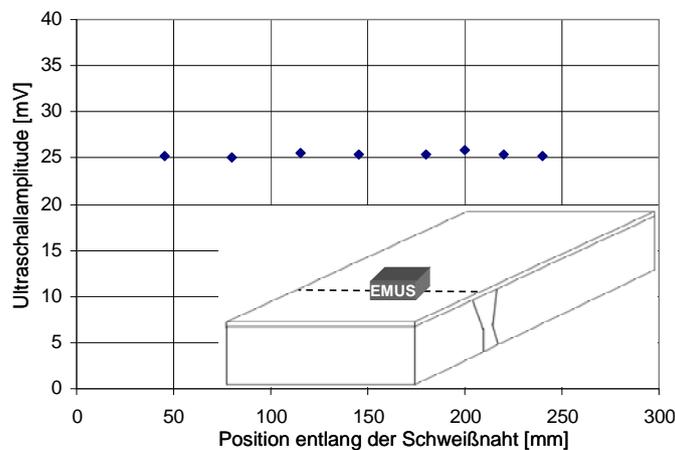
Um zu überprüfen, ob die empfangenen Messsignale tatsächlich aus dem Mikrogefüge unterhalb der Plattierung stammen, wurden auch Messungen an der unplattierten Seite des ferritischen Testkörpers bei einer Abhebung von 8 mm durchgeführt. In beiden Fällen wurden vergleichbare Messsignale erhalten, woraus geschlossen werden kann, dass die Wirbelstromdämpfung durch die austenitische Plattierung vernachlässigbar ist (Abb. 3).

An diesem plattierten Testkörper mit einer Wanddicke von 30 mm und mit Plattierungsdicken von 8 mm wurden bei Anregung an der plattierten Seite bei einer Magnetfeldstärke von 250 A/cm und einer Prüffrequenz von 40 kHz Signal-Rauschabstände von 23 dB erreicht (Abb. 3) [6]. Ähnlich gute Messergebnisse wurden auch mit dem 3MA-Prüfverfahren erzielt.



**Abb. 3.** EMUS-Signale gemessen an einem ferritischen Testkörper auf der plattierten Seite (linkes Bild) und auf der nicht plattierten Seite bei 8 mm Abhebung (rechtes Bild)

Um den Einfluss der Gefügestände des Schweißgutes einer RDB-Rundnaht auf die Messwerte der dynamischen Magnetostriktion bei Anregung von der plattierten Seite zu untersuchen, wurden Messungen an diesem Behälterwandtestkörper (Kalibriertestkörper für die WKP an WWER-440-Reaktoren) durchgeführt. Entlang der Schweißnaht sind nur geringe Messwertschwankungen in der EMUS-Amplitude von ca. 1,5 % zu erkennen (Abb. 4). Diese Schwankungen liegen innerhalb der Messgenauigkeit. Dies zeigt, dass eventuelle Neutronenversprödungen im Schweißgut zukünftig gut detektiert werden können.



**Abb. 4.** Variation der Messwerte entlang der Schweißnaht

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe des Kombinationsverfahrens (3MA und dynamische Magnetostriktion auf Basis von EMUS) lässt sich die Zielgröße Verschiebung der Sprödbruchübergangstemperatur zerstörungsfrei an bestrahlten ISO-V-Proben aus Werkstoffen (Grundwerkstoffe und Schweißgüter), die in Reaktordruckbehältern westlichen und östlichen Designs eingesetzt werden, bestimmen.

Es lassen sich sowohl 3MA- als auch dynamische Magnetostriktions-Signale durch eine 8 mm dicke austenitische Plattierung hindurch anregen. Dies lässt darauf schließen, dass auch die Zielgröße Verschiebung der Sprödbruchübergangstemperatur zerstörungsfrei mithilfe des Kombinationsverfahrens (3MA und dynamische Magnetostriktion auf Basis von EMUS) direkt an der RDB-Innenwand ermittelt werden kann.

## 7. Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung danken wir dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), GRS-Förderkennzeichen 1501352.

Der Firma AREVA NP GmbH und dem Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e.V. danken wir für die Bereitstellung der Proben und Unterstützung bei den Untersuchungen in der heißen Zelle.

## Referenzen

- [1] Föhl, J., Weißenberg, T.: Einfluss der Neutronenbestrahlung auf die Werkstoffeigenschaften sowjetischer RDB-Stähle, Abschlussbericht zum Vorhaben 1500892 vom März 1999, MPA Berichts-Nr. 87 27 01 005
- [2] Willer, D., Zies, G., Kuppler, D., Föhl, J., Katerbau, K.H.: Betriebsbedingte Eigenschaftsänderungen kupferhaltiger ferritischer Behälter- und Rohrleitungsstähle, Abschlussbericht zum Vorhaben 150 1087 vom Oktober 2001, MPA Berichts-Nr. 8820 01 001
- [3] Stegemann, D.-H., Debarberis, L., Acosta, B., Beers, M., Keinhorst, G., Coste, J.-F., Massoud, J.-P., Horsten, M.-G., Kauppinen, P., Pitkänen, J., Kröning, M., Dobmann, G., Bros, J., Weimann, H., Hutchings, M. Rogerson, A., Gomes-Briceno, D., Perosanz, F.-J., Kalkhof, R.-D., Spanner, J.-C.: Progress of the ageing material evaluation and studies by non-destructive techniques AMES-NDT concerted action, Nondestructive Characterization of Materials IX, Sydney, NSW, Australia, AIP Conference Proceedings, USA\*(1999) no 497, p.263-8, 14 refs.
- [4] 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, p. 1907-1921
- [5] Hein, H., Keim, E., Schnabel, H., Seibert, T., Gundermann, A.: Final Results from the Crack Initiation and Arrest of Irradiated Steel Materials Project on Fracture Mechanical Assessments of Pre-Irradiated RPV Steels Used in German PWR, J. ASTM Int. 6, Paper ID JAI101962, 2009
- [6] Altpeter I., Dobmann, G., Hübschen, G., Kröning, M., Verfahren zur Messung der Neutronenversprödung unterhalb der Plattierung von Druckbehältern, Patent Nr. WO 2008/135054