

Ultraschallprüfung von Kernumfassungsschrauben der Kernbehälter von Druckwasserreaktoren

Christian M. BIES*, Louis ALAERTS*, Frank W. BONITZ*,
Russell S. DEVLIN**, Patrick MINOGUE**
* Westinghouse Electric Germany GmbH, Mannheim
** WesDyne International, Madison (PA), USA

Kurzfassung. Zu den sicherheitsrelevanten Bauteilen gehören die Kernumfassungsschrauben der Kernbehälter in Druckwasserreaktoren. Bedingt durch aufgetretene Defekte an diesen Schrauben bei einigen Anlagen besteht seitens Betreiber und Behörden ein Interesse an Prüfungen dieser eingebauten Schrauben, da fehlerhafte Schrauben zu erheblichen Folgeschäden führen können (z.B. Brennelementschäden).

Zur Prüfung der Kernumfassungsschrauben wird die Ultraschallprüfung verwendet. Während des Prüfzyklus befindet sich der Kernbehälter unter Wasser, um die hohe Strahlung abzuschirmen.

Aufgrund der Vielfalt der in verschiedenen Kernkraftwerken eingesetzten Schraubentypen wurde eine entsprechend große Auswahl an Ultraschall-Prüfsonden qualifiziert.

Neben den verschiedenen Ultraschall-Prüfsonden wurden aufgabenspezifische Prüfroboter entwickelt, welche die Ultraschallsonden entsprechend der prüftechnischen Vorgaben an der untersuchten Schraube positionieren.

In diesem Beitrag wird der von Westinghouse /WesDyne verwendete Prüfroboter MIDAS VI vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug, welches die Ultraschallsonde kameraüberwacht positioniert. Mit Hilfe dieses Fahrzeuges wird die Dauer, insbesondere der Zeitaufwand beim Aufbau und Einrichten einer Ultraschallprüfung, von Kernumfassungsschrauben erheblich reduziert. Ebenso konnte ein schnellerer Prüfablauf realisiert werden.

Bei kürzlich durchgeführten Qualifikationen für belgische und US-amerikanische Kraftwerke, wird das MIDAS VI als Prüfroboter eingesetzt.

Für Schraubentypen, welche als bisher unprüfbar galten, wurden Prüftechniken entwickelt, unter anderem auch eine Phased-Array-Sonde.

Ferner wird über die mehrjährigen Erfahrungen bei Prüfungen von Kernumfassungsschrauben in europäischen Kernkraftwerken mit dem Prüfroboter SUPREEM berichtet.

Einführung

In Druckwasserreaktoren (DWR) sind die Brennelemente im Leistungsbetrieb innerhalb des Kernbehälters angeordnet. Die Innenwandung (Leitbleche) dieser Kernbehälter sind an die Rippen/Formbleche des Kernbehälters (Abb.1) angeschraubt (Kernumfassungsschrauben/KU-Schrauben(englische Kurzbezeichnung „Baffle Bolts“).

Die Rippen/Formbleche wiederum sind durch Kernbehälterschrauben (KB-Schrauben, englische Bezeichnung „Barrel Bolts“) am Kernbehälter fixiert (Abb.2).

Die betriebliche (weltweite) Erfahrung zeigt, dass insbesondere die KU-Schrauben (Kernumfassungsschrauben) Schädigungsmechanismen (abhängig von Werkstoff, Formgestaltung der Schraube, Herstellungsverfahren der Schraube, Wasserchemie, mechanische Beanspruchung, Strahlung) unterliegen können, welche zu einem Bruch der Schraube führen können.

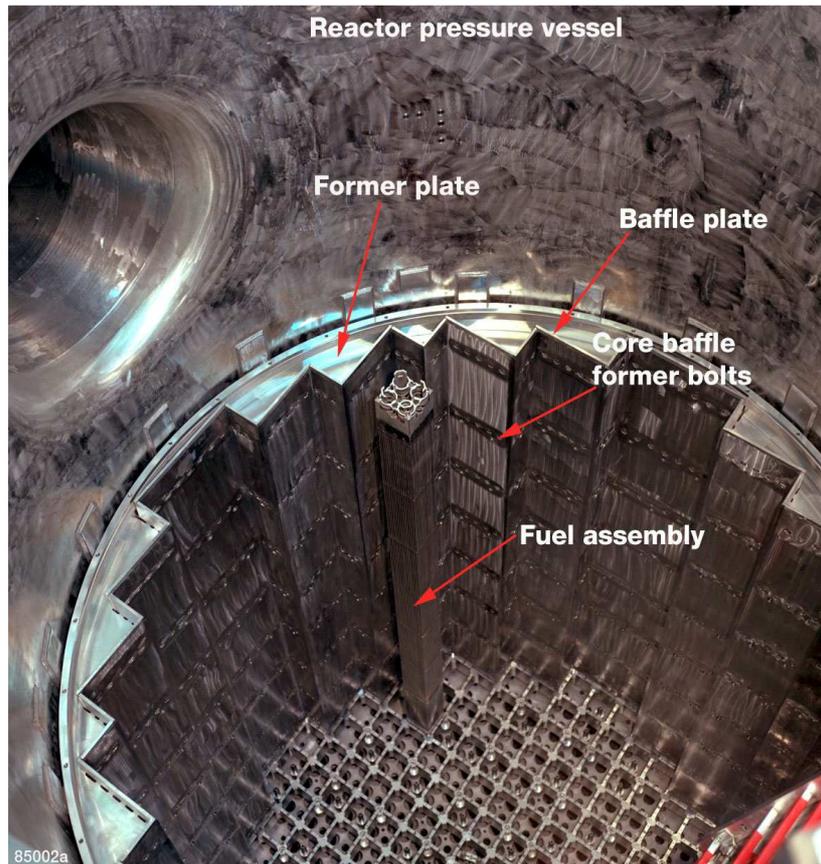


Abb. 1: Kernbehälter, eingesetzt in Reaktordruckbehälter

Erläuterungen zu Abbildung 1:

Reactor pressure vessel – Reaktordruckbehälter

Fuel Assembly – Brennelement

Baffle Plate – Kernumfassung(KU)-Blech (Leitblech)

Former Plate – Rippen/Formbleche

Core Baffle Former Bolts – KU-Schrauben (Baffle Bolts)



99090
 Abb.2: Diverse Ausführungen von Kernumfassungs- und Kernbehälterschrauben, wie sie in deutschen Kernkraftwerken Verwendung finden

Das Versagen einzelner Schrauben (verteilte Positionen auf Leitblech) beeinträchtigt nicht die Funktionalität der Befestigung der Leitbleche im Kernbehälter. Jedoch sind Szenarien zu betrachten, wie Versagen einer Vielzahl benachbarter Schrauben, hierdurch mögliches Verschieben des Leitbleches und Entstehen von Spalten zwischen den Leitblechen mit dann möglicherweise auftretenden Wasserströmungen aus diesen Spalten, welche zu Abrasion an den Brennelementen führen können.

Daneben wird bei einem Abriss des Schraubenkopfs zwar durch eine Schraubenkopfsicherung (z.B. Sicherungsstift, Schweißpunkte etc.) ein Ablösen des Schraubenkopfs vermieden, dies stellt aber ein nicht akzeptables potentiell Risiko für die Integrität der Leitbleche dar.

Um Risse in den Schrauben zu detektieren werden Ultraschallprüfungen durchgeführt. Hierzu müssen die Brennelemente aus dem Kernbehälter entnommen sein. Wegen der dann immer noch hohen Strahlendosis des Kernbehälters ist eine Prüfung nur unter Wasser möglich mittels Einsatz von mechanisierten Prüfeinrichtungen. Für die mechanisierte Prüfung der Schrauben wurden unterschiedliche Werkzeuge wie „Mastmanipulatoren“ etc. weltweit von verschiedenen Prüffirmen entwickelt, qualifiziert und eingesetzt. Teilweise sind dies komplexe Robotersysteme (z.B. SUPREEM), welche einen größeren logistischen Aufwand bei der Installation im Kraftwerk benötigen.

Eine größere Flexibilität lässt sich mit Unterwasserfahrzeugen erzielen. Wirtschaftlich sinnvoll ist zurzeit der Einsatz solcher Unterwasserfahrzeuge für Prüfungen in KKW's, wenn generell eine neue Qualifikation der Prüftechnik ansteht, bzw. der Aufwand für eine neue Qualifikation niedrig gehalten werden kann.

Auf der Jahrestagung 2010 der DGzFP wurde über die Tätigkeiten der WEG (Westinghouse Electric Germany) auf dem Gebiet der Schraubenprüfung in KKW's berichtet [1]. Das damals erstmalig vorgestellte neuentwickelte Unterwasserfahrzeug MIDAS VI für die Schraubenprüfung [2] wird von Westinghouse bzw. WesDyne als Prüfroboter für z. Zt. aktuell anstehende Schraubenprüfungen qualifiziert und eingesetzt.

Im Folgenden wird über Qualifikationen und Einsatz des Unterwasserfahrzeugs (MIDAS VI) und aktuelle Prüfeinsätze berichtet.

1. Beschreibung des Unterwasserfahrzeugs MIDAS VI

Das MIDAS VI ist ein von Westinghouse konzipierter ferngesteuerter Prüfroboter (Abb.3) und besteht aus folgenden Komponenten:

- Dem fernbedienbaren Unterwasserfahrzeug
- Der Prüfeinrichtung: UT-Endeffektor zur Positionierung und Ankopplung der Ultraschallsonden am Schraubenkopf.
- Kamerasystem mit strahlentoleranter Röhrenkamera und Beleuchtung zur Überwachung des Anfahrens der Schraubenposition und der Positionierung der Ultraschallsonden, Videomonitor, Videoaufzeichnungsgerät
- Bedienkonsole mit Steuerungs-, Leistungseinheit (Abb.6)
- Kabelstrecken und Versorgungsleitungen vom Kontrollsystem zum Unterwasserfahrzeug

Zusätzlich kommt eine Übersichtskamera, positioniert oberhalb des Kernbehälters, zum Einsatz.

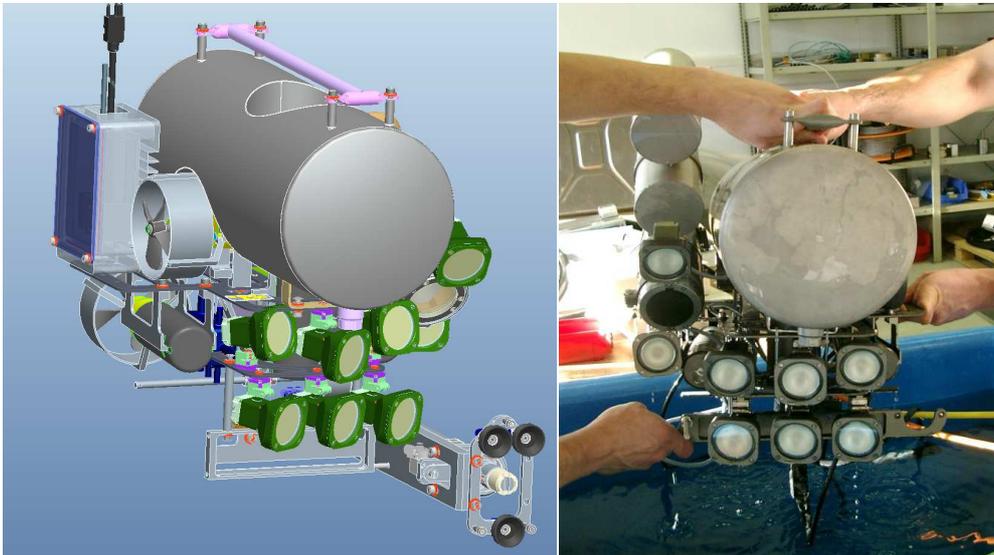


Abb.3: Schematische Darstellung: MIDAS VI mit UT-Endeffektor und Prüfkopf und Foto von der Frontseite

Das Unterwasserfahrzeug besteht im Wesentlichen aus einem Grundrahmen, der die vier Antriebe zum Manövrieren sowie einen Auftriebskörper aus Edelstahl trägt (Abb.3, linkes Bild). Zur Sicht auf die zu prüfende Position dient eine strahlentolerante Röhrenkamera, die ein Objektiv fester Brennweite (9 mm Weitwinkel-Objektiv) zur Nahbeobachtung trägt. Die Ausleuchtung wird durch acht 50W-Scheinwerfer sichergestellt (Abb.3, rechtes Bild). Unterhalb der Kamera befindet sich die Prüfvorrichtung „UT-Endeffektor“ (Abb.5). Das Unterwasserfahrzeug kann vorwärts, rückwärts und seitwärts fahren, um die Hochachse drehen und auf- und abtauchen. Zur Unterstützung des Bedieners hält eine Tiefenregelung das Unterwasserfahrzeug mit Hilfe eines Drucksensors in konstanter Tiefe.

Aufgrund der Geometrie der Kernumfassung ist eine linke und rechte Konfiguration des MIDAS VI vorhanden, das heißt Kamera und UT-Endeffektor, werden je nach Art des Kernumfassungsblechs, auf dem sich die zu prüfende, Schraube befindet, links oder rechts montiert.

Das Einsetzen des Unterwasserfahrzeugs ins Wasser erfolgt über einen auf der Oberseite speziell angebrachten Bügel, der als Anschlagpunkt für einen Greifer dient. Zum Abstellen des Unterwasserfahrzeugs auf dem Beckenflur dient ein Abstellrahmen.

Die Prüfvorrichtung „UT-Endeffektor“ besteht aus einem wasserdichten Gehäuse, in dem die Motor-Getriebe-Resolver-Einheit eingebaut ist (Abb.5).

Der UT-Endeffektor wird am Kernumfassungsblech mit Hilfe von Saugnäpfen fixiert (Abb.4). Der dazu erforderliche Unterdruck wird durch eine Vakuumpumpe erzeugt, welche am Unterwasserfahrzeug angebaut ist.

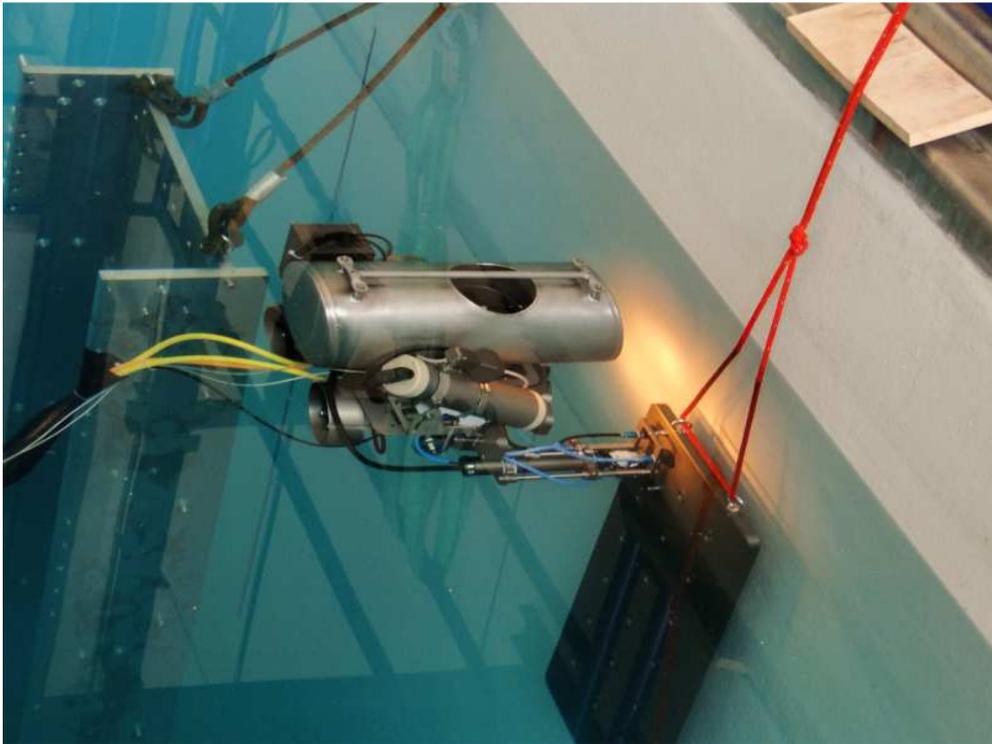


Abb.4: MIDAS VI, bei Erprobungsphase an einem Justierstand

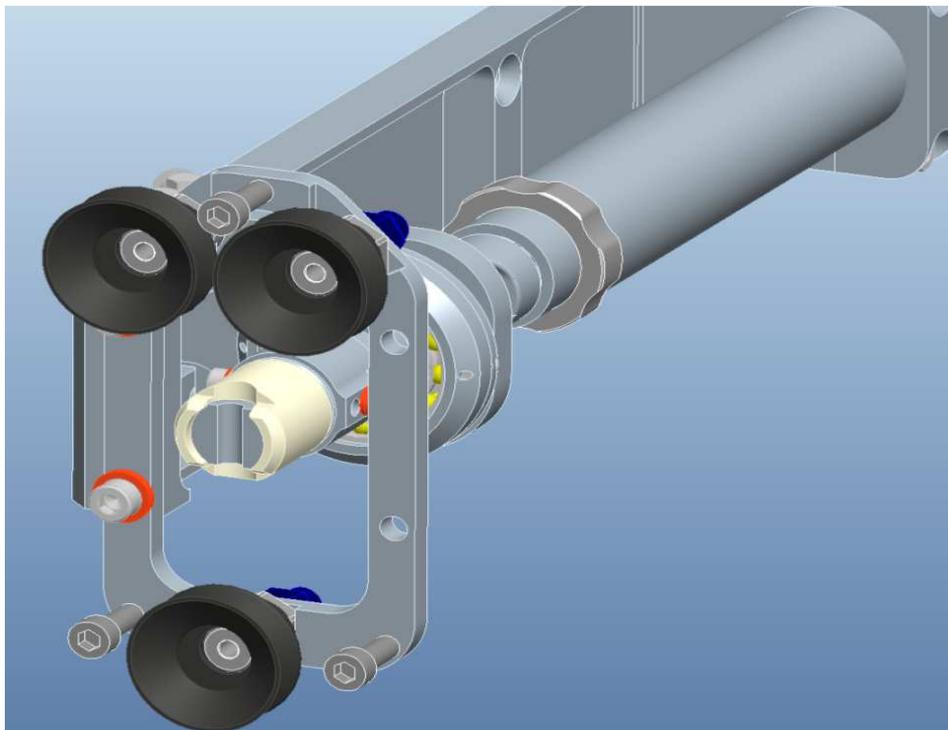


Abb.5: Schematische Darstellung: MIDAS VI mit UT-Endeffektor und Prüfkopf zur Prüfung von Außensechskantschrauben mit Sicherungsstift.

Der Motor zum Drehen der Ultraschallsonde ermöglicht eine gleichmäßige Drehung um 370° und je nach Schraubentyp die UT-Sonde auf der Ankoppelfläche auszurichten

(Schrauben mit Sicherungsstift), bzw. um beim Drehen eine Datenaufnahme zu ermöglichen (z.B. Innensechskantschrauben).

Der in dem UT-Endeffektor befindliche Luftzylinder dient zum Andrücken der Ultraschallsonden auf die jeweilige Ankoppelfläche am Schraubekopf.

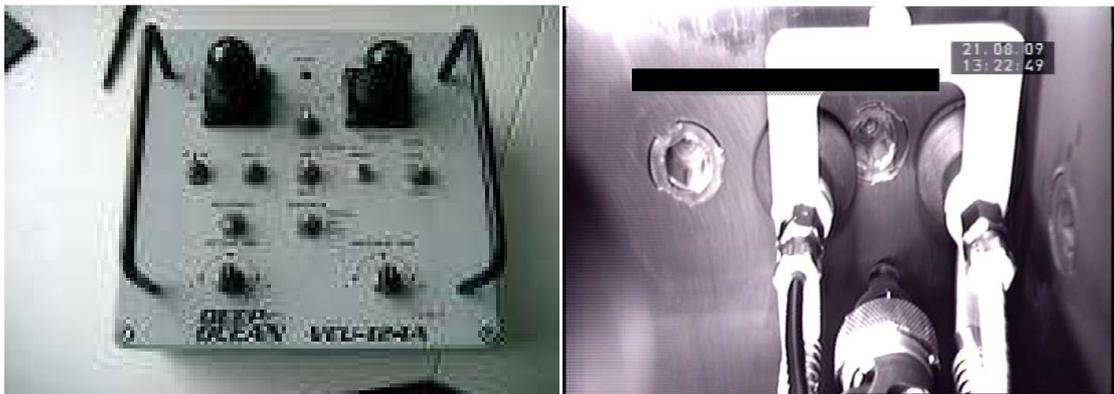


Abb. 6: Steuerstand mit Videoeinrichtung und Leistungseinheiten für die Antriebsmotoren, Steuerungskonsole mit Joysticks, Videobild der Kamera: Anfahren einer Schraube

2. Aktuelle Qualifizierungen

Bei der Vorbereitung zu einer anstehenden UT-Prüfung ist für die Qualifikation der Prüftechnik unter anderem zu klären:

- ob eine vorhandene UT-Sondentechnik (UT-Prüfkopf) eingesetzt werden kann (abhängig insbesondere von Gestalt des Schraubenkopfs, Materialeigenschaft, geforderte Nachweisgrenzen) oder ob eine Neuentwicklung notwendig ist.
- Ob Erreichbarkeit aller Schrauben gegeben ist (z.B. kann mit dem Unterwasserfahrzeug in die Nischen der Kernumfassung eingefahren werden? Gibt es Prüfbehinderungen, wie z.B. Zentrierstifte im Kernbehälterboden?).

2.1 Aktuelle Qualifizierungen in Europa

Für zukünftig, geplante weitere Prüfeinsätze in Belgien wurde eine vorhandene Prüftechnik neu qualifiziert, da wesentliche Bestandteilen der Prüftechnik ausgetauscht wurden:

- Ersatz des Ultraschall-Geräts PARAGON durch das Ultraschallgerät DYNARAY
- Ersatz des Prüfroboters SUPREEM durch das MIDAS VI

Zusätzlich musste die Prüftechnik für Schrauben mit Sicherungsstift (Abb.7) auch qualifiziert werden für die Prüfung von Austauschschrauben und für einen weiteren Typ von original eingebauten Schrauben.

Es wurde auf eine vorhandene UT-Sondentechnik (Abb.8, Abb.9) zurückgegriffen, welche bereits für vorangegangene Prüfeinsätze eingesetzt wurde. Diese UT-Sondentechnik hatte sich bewährt. Im Jahr 2005 wurden als fehlerbehaftet detektierte Schrauben zur Verifikation nach Ausbau zusätzlich mittels Farbeindringverfahren untersucht. Die mit Ultraschall detektierten Risse wurden alle bestätigt.



Abb. 7: Schraube mit Sicherungsstift

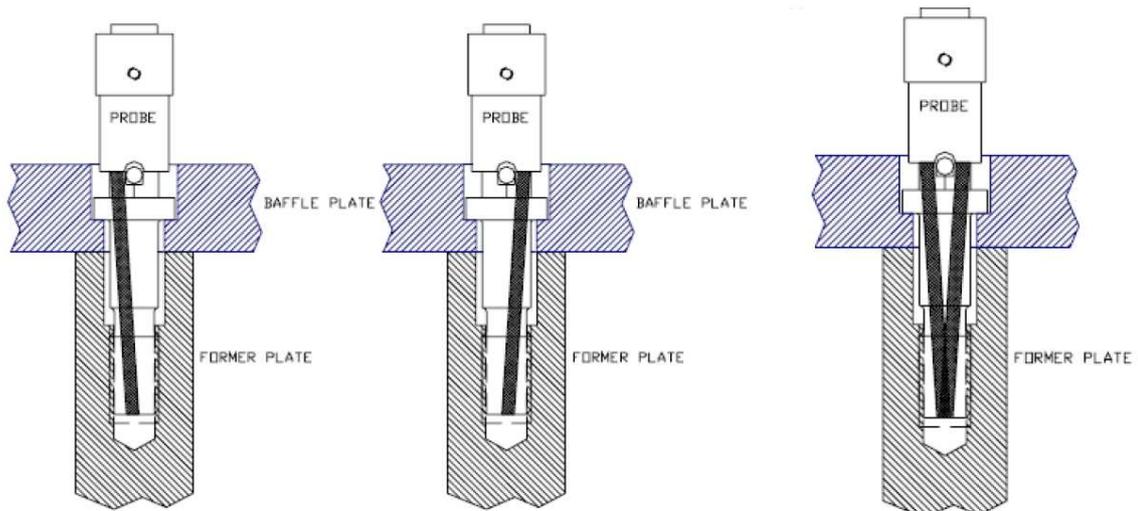


Abb. 8: UT-Sonde mit zwei Schallwandlern, I/E Impuls/Echo Betrieb (sequentiell: Kanal 1 und 2), links in der Abbildung; S/E Sende/Empfang Betrieb (sequentiell Kanal 3 und 4, jeweils Sender und Empfänger vertauscht), rechts in der Abbildung

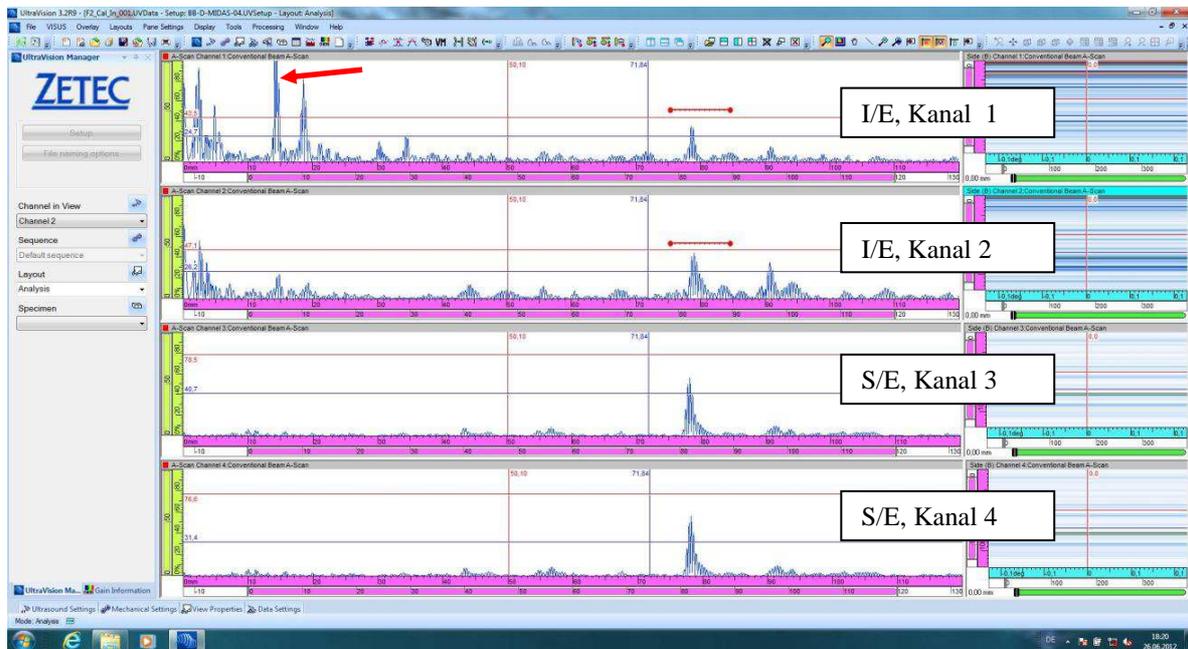


Abb.9: Beispiel: Echoanzeigen eines Reflektors unterhalb des Schraubenhopf, Nachweis mit I/E auf Kanal 1 (roter Pfeil)

2.2 Aktuelle Qualifikationen in USA

Zwei Techniken zur Prüfung von Schrauben, welche bis dato als nicht prüfbar galten, wurden entwickelt und qualifiziert.

- UT-Einschallung (Multi-Element-Prüfkopf) über den Rand des Schraubenkopfes (für Innensechskantschrauben mit Sicherungsstift, Abb.10 u. Abb.11). Hier stehen zur Ankopplung nur wenige Teilbereiche auf dem Rand des Schraubenkopfs zur Verfügung
- UT-Einschallung (Phased Array Prüfkopf) über den Boden des Innensechskants(Schrauben mit Sicherungscheibe, Abb.12 u. Abb.13). Der Boden des Innensechskants hat eine konusförmige Gestalt mit unterschiedlichem Öffnungswinkel.

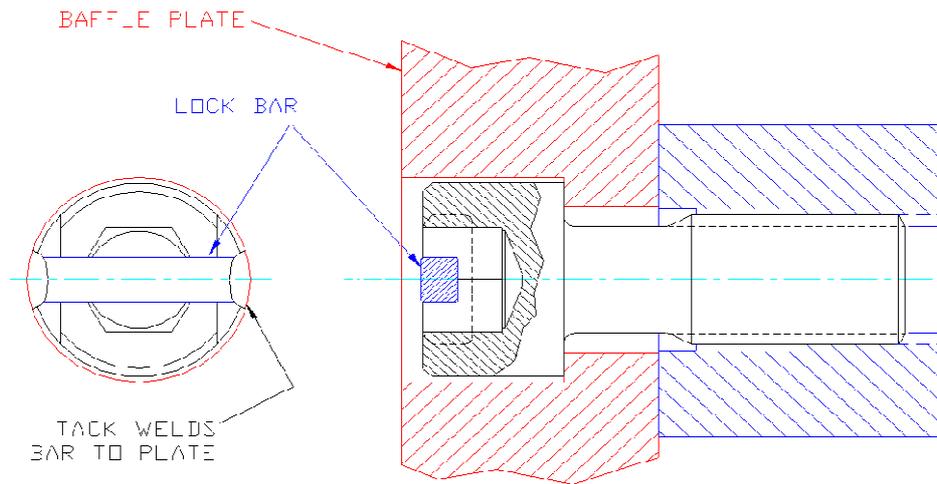


Abb.10: Zeichnung: Einbauzustand einer Innensechskantschraube mit Sicherungsstift



Abb. 11: Innensechskantschraube mit Sicherungsstift, eingebaut in 7 Westinghouse 4-loop Reaktoren (USA)

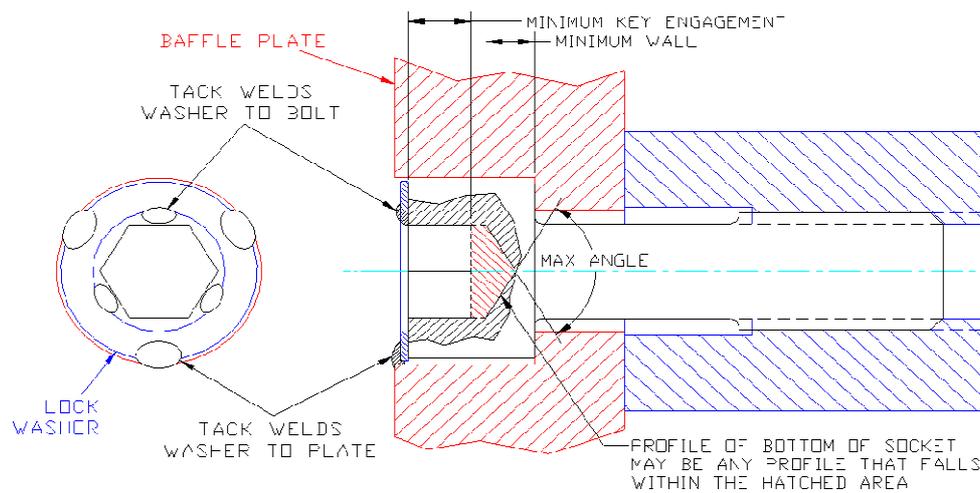


Abb.12: Zeichnung: Einbauzustand einer Innensechskantschraube mit Sicherungsscheibe und Schweißpunktsicherung



Abb. 13: Einbausituation Innensechskantschraube mit Sicherungsscheibe und Schweißpunktsicherung, Schraubentyp ist eingebaut in 6 2-loop Westinghouse Reaktoren (USA)

Als Prüfroboter wird das MIDAS VI eingesetzt. Durch den Einsatz der neuen Prüftechnik wird es den jeweiligen betroffenen Betreibern von Anlagen mit diesen Schrauben ermöglicht einen ansonsten von den Behörden verlangten Austausch von als „unprüfbar“ geltenden Schrauben zu vermeiden.

In Abb. 14 ist ein Sektorscan dargestellt mit der Anzeige eines Reflektors unterhalb des Schraubenkopfs und ein Sektorscan mit dem Rückwandecho aus dem Schraubenende.

Bei den Prüfungen der einzelnen Schrauben wird mit Hilfe eines Sektorscan die Gestalt des Konus am Boden des Innensechskants des Schraubenkopfs bestimmt.

Die Phased Array Prüftechnik für Innensechskantschrauben wurde Dezember 2011 qualifiziert und erfolgreich im Frühjahr 2013 im KKW Point Beach 1, USA eingesetzt.

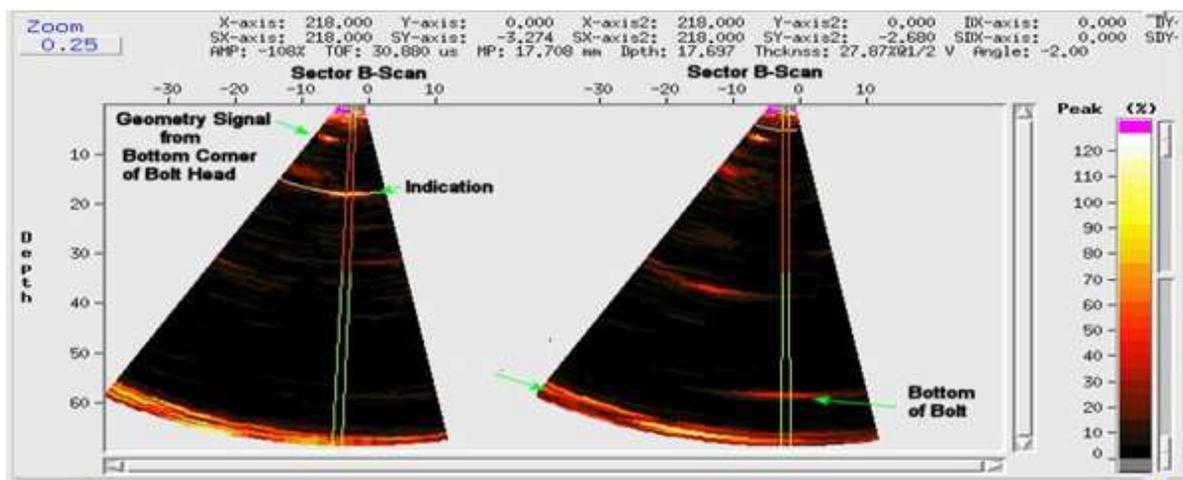


Abb.14: Sektor-Scan Darstellung bei der Schraubenprüfung

3. Erfahrungen bei Einsatz in französischen Anlagen

Für die Prüfung in französischen Kernkraftwerken (900/1300 MWe) wurde in 2009 Prüftechniken für die original eingebauten Schrauben und Austauschschrauben qualifiziert. Als Prüfroboter wird der SUPREEM eingesetzt, der ursprünglich von WesDyne für die Reaktordruckbehälterprüfung entwickelt wurde (Abb.15). Für die Prüfung der original eingebauten Schrauben (Außensechskantschrauben mit Sicherungsstift, akustisch

unterschiedliche Materialeigenschaft) wurde ein UT-Prüfkopf entwickelt mit 4 Schallwandlern. Für die Austauschschrauben (mit ebenen Vierkant des Schraubenkopfs) wurde ein UT-Prüfkopf mit zwei Schallwandlern entwickelt.

Die Prüftechnik wurde erfolgreich eingesetzt und hat sich in folgenden Anlagen bewährt:

- | | | |
|----------------|----------------|---------------|
| • Bugey 4 | September 2009 | 3-Loop-Anlage |
| • Bugey 5 | Dezember 2009 | 3-Loop-Anlage |
| • Belleville 1 | Mai 2010 | 4-Loop-Anlage |
| • Bugey 2 | August 2010 | 3-Loop-Anlage |
| • Bugey 4 | Februar 2011 | 3-Loop-Anlage |
| • Fessenheim 2 | Mai 2011 | 3-Loop-Anlage |
| • Bugey 5 | Juni 2011 | 3-Loop-Anlage |
| • Dampierre 2 | März 2012 | 3-Loop-Anlage |



Abb. 15: Prüfroboter SUPREEM

4. Generelles zur Bewertung von Anzeigen

Zu erwähnen ist, dass die Bewertung aller oben angesprochenen Prüftechniken vorwiegend durch Mustervergleich, Signal/Störabstand der Anzeigen und der Rückwandechos erfolgt.

5. Weitere aktuelle Aktivitäten

Hier soll noch kurz angesprochen werden, dass z. Zt. das Interesse besteht Kernbehälterschrauben zu prüfen, welche nur über einen Spalt (25 mm breit) schwer

zugänglich hinter dem Thermoschild (Druckwasserreaktoren mit Bauweise Westinghouse) liegen (Abb.16). Westinghouse Electric Germany (damaliger Name: ABB Reaktor) hatte hierzu im Jahr 1997 einen Prüfroboter für Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. entwickelt [3]. Aktuell wurde jetzt ein neuer UT-Prüfkopf für Kernbehälterschrauben mit Sicherungsstift und die zugehörige Prüfpezifikation qualifiziert. Die Entwicklung des UT-Prüfkopfs erfolgte mit Unterstützung durch eine Schallfeldmodellierung [4].

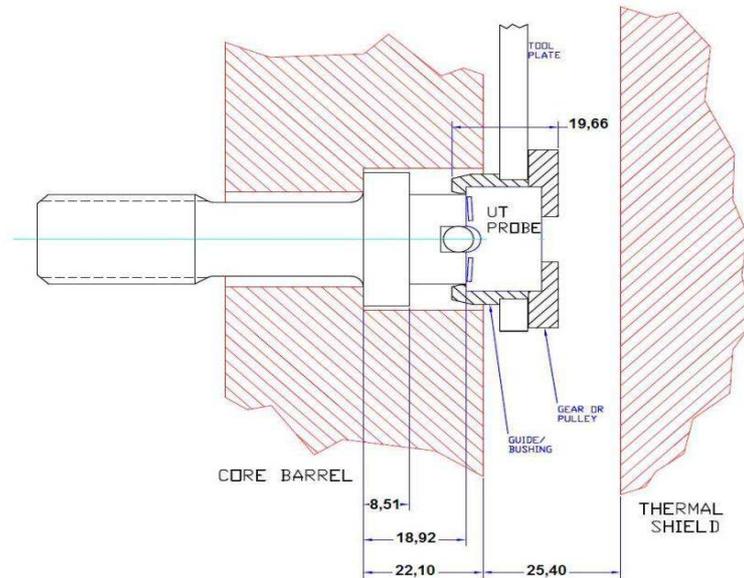


Abb. 16: Zeichnung: Prüfsituation für die Ultraschallprüfung von Kernbehälterschrauben hinter dem Thermoschild

Referenzen

- [1] A. Debnar; M. Spies, F.W. Bonitz: „Prüfung der Kernumfassungsschrauben in Druckwasserreaktoren“, DGZfP Jahrestagung 2010
- [2] A. Debnar, L. Alaerts, M. Spies, P. Minogue, C. Epineau: “Recent Experiences with Ultrasonic Inspection of Baffle Former Bolts”; Proceedings of the 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, 29 Sep. - 1 Oct. 2010, Berlin
- [3] F.Bonitz, F.D’Annucci, L. Knierrim, H.Franke, W.Kappes: “Auslegung, Herstellung und Qualifikation einer Prüfeinrichtung für Kernbehälter von Druckwasserreaktoren“, DGZfP Jahrestagung 1997, Berichtsband 59.1, Seite 471-479
- [4] M. Spies: “Semi-analytical elastic wave-field modeling applied to arbitrarily oriented orthotropic media”, J. Acoust. Soc. Am. 110 (1), July 2001