

Anmerkungen zum Befund im Bereich des Wärmeschutzrohres an der Volumenausgleichsleitung des Kernkraftwerkes Grafenrheinfeld

Vorbemerkung

Aufgrund der vorliegenden Unterlagen^{1, 2)} sowie der Informationen im Rahmen der Besprechung beim BMU in Bonn am 09. 12. 2010 ergibt sich für die MPA Universität Stuttgart zum vorliegenden Befund im Bereich des Wärmeschutzrohres (WSR) in der Volumenausgleichsleitung (VAL) des Kernkraftwerkes Grafenrheinfeld (KKG) nachfolgend zusammenfassend dargestellter Sachverhalt. Darauf basierend wurden von MPA Universität Stuttgart weitere Anmerkungen zur Bewertung der Anzeige abgeleitet.

Sachverhalt

Im Kernkraftwerk Grafenrheinfeld wurde bei der Revision 2010 im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen in der VAL im Verrundungsbereich des Wärmeschutzrohres eine umlaufende Anzeige festgestellt. Die Ausdehnung der Anzeige mit Überschreitung der Registrierschwelle (RS) erstreckt sich von ca. 330° bis 60° über die 12:00 Position (Umfangserstreckung ca. 330 mm), wobei die maximale Echohöhe der Anzeige lokal bei RS + 5dB lag. Da die Anzeige die Registrierschwelle als auch die gemäß KTA 3201.4 zulässige Längenausdehnung überschritt, ist die Anzeige als bewertungspflichtig einzustufen (Bewertungsgrenze erreicht) und wird als Befund bezeichnet.

Bei den in der Revision 2001 durchgeführten wiederkehrenden Prüfungen war eine vergleichbare umlaufende Anzeigenstruktur, allerdings unterhalb der Registrierschwelle, festgestellt worden. Ein Vergleich der Prüfungen der Revisionen 2001 und 2010 ergab keine signifikanten Änderungen.

Zur Verifikation der Tiefenerstreckung des Befundes wurden Messungen mit einem Gruppenstrahler zur Laufzeitanalyse durchgeführt. Die Befundtiefen wurden zu 2,2 bis 2,7 mm (abhängig von der Einschallrichtung) ermittelt.

Vergleichsmessungen an einem fehlerfreien baugleichen Vergleichskörper zeigen auch bei abgesenkter Registrierschwelle keine vergleichbare Anzeigenstruktur. Erkenntnisse von Prüfungen aus der Herstellung über vorhandene Anzeigen im Verrundungsbereich des Wärmeschutzrohres liegen nicht vor.

Angaben zur Schadensursache und zu dem möglichen Schädigungsmechanismus sind in den Unterlagen nicht enthalten. Im Rahmen der Besprechung beim BMU in Bonn am 09. 12. 2010 wurde von Seiten des TÜV als möglicher Schädigungsmechanismus Ermüdung infolge mechanischer und thermischer Belastungen genannt. Diese Vermutung wurde mit der Analogie zum Befund im Kernkraftwerk Gösgen sowie der vom Betreiber durchgeführten Ermüdungsanalysen unter Berücksichtigung einer lokalen umlaufenden Kerbe mit Radius $r=0,25$ mm begründet.

Zur rechnerischen Bewertung des Befundes wurde einerseits die kritische Tiefe für einen umlaufenden Riss und andererseits das mögliche zyklische Wachstum des umlaufenden Risses ermit-

¹ Schreiben TÜV-SÜD Industrie Service GmbH, IS-ATW1-MUC/bn vom 15. Juni 2010, A.-Nr. 3191

² Vortrag TÜV-SÜD Industrie Service GmbH bei der 104. Sitzung RSK-Ausschuss DKW am 15.09.2010

telt. Die kritische Risstiefe wurde für den Belastungszustand „Volllast+FLAB“ mit Hilfe von Grenzlastberechnungen und der R6-Methode ermittelt.

Zur Berechnung des zyklischen Risswachstums wurden zyklisch wirkende mechanische und thermische Belastungen zugrunde gelegt. Die dabei berücksichtigten Belastungszustände zur Ermittlung der Spannungsverläufe in Wanddickenrichtung im Verrundungsbereich wurden aufgrund der Erkenntnisse aus der betrieblichen Überwachung wie folgt festgelegt:

- Zyklus 1
An- und Abfahrgänge, d.h. Nulllast kalt – Volllast – Nulllast kalt (maximales Biegemoment bei Volllast und Betriebsdruck), dies soll auch auftretende Temperaturschichtungen im Verrundungsbereich abdecken. Gesamtzyklenzahl $N=75$ im Zeitbereich von 2001 bis 2010.
- Zyklus 2
Abkühltransiente ($\Delta T=120$ K mit $-2,5$ K/s) an der Rohrrinnenoberfläche (Thermoschockbelastung). Gesamtzyklenzahl $N=60$ im Zeitbereich von 2001 bis 2010.

Die Risswachstumsberechnungen erfolgten unter Berücksichtigung der Mediumsbedingungen.

Wird für eine angenommene Risstiefe von 2,9 mm mit Zyklus 1 bzw. Zyklus 2 eine Risswachstumsberechnung für den Zeitraum 2001 bis 2010 durchgeführt, so ergibt sich ein Zuwachs von ca. 0,1 mm. Unter der Annahme einer Ausgangsrisstiefe von 0,5 mm sind bis zu einer Risstiefe von 3 mm für den Zeitraum 2001 bis 2010 ca. 3400 Zyklen (Zyklus 2) erforderlich.

Das mögliche Entstehen eines Ermüdungsanrisses (rechnerischer Erschöpfungsgrad 1) für den Zeitraum von Inbetriebsetzung bis zum Jahr 2001 lässt sich nach Angaben des TÜV mit den angenommenen Belastungszyklen nur nachvollziehen, wenn im Verrundungsbereich des Wärmeschutzrohres eine zusätzliche Kerbe (Spannungsüberhöhung) mit $r=0,25$ mm unterstellt wird. Ohne diese Kerbe würde ein Erschöpfungsgrad D von nur ca. 0,15 vorliegen.

Anmerkungen zur Bewertung der Anzeige

Aufgrund der oben geschilderten Sachverhalte sind nachfolgend Anmerkungen zur Bewertung des Befundes, wie sie sich aus Sicht der MPA Universität Stuttgart ergeben, dargestellt.

- Der Vergleich der Prüfergebnisse aus den Revisionen 2001 und 2010 ergab eine über den gesamten Umfang nahezu identische Anzeigenstruktur. Eine Veränderung seit 2001 lässt sich anhand des Vergleiches der Prüfungen von 2001 und 2010 nicht klar belegen. Mechanisierte Ultraschallprüfungen sind sehr reproduzierbar, Schwankungen in der Prüfempfindlichkeit von mehreren dB sind aber durchaus üblich. Da die Amplitude im gesamten Prüfbereich bei der Prüfung 2010 gegenüber 2001 etwa gleichmäßig erhöht ist, könnte man vermuten, dass das höhere Anzeigenniveau durch eine erhöhte Prüfempfindlichkeit bedingt ist. Dies legt nahe, dass zwischen 2001 und 2010 keine wesentliche Veränderung des Befundes erfolgt ist.
- Da aus der Herstellung keine Erkenntnisse über Anzeigen im Verrundungsbereich des Wärmeschutzrohres vorliegen ist davon auszugehen, dass bei Inbetriebsetzung ein technisch fehlerfreier Zustand der VAL vorlag. **Deshalb ist eine im Zeitraum von Inbetriebsetzung (1982) bis 2001 betrieblich entstandene Schädigung (Rissbildung) zu unterstellen.**
- Untersuchungen zur Klärung des den Befund verursachenden Schädigungsmechanismus und dessen Ursache wurden nicht durchgeführt. Für die weiteren Betrachtungen wurde der Schädigungsmechanismus Ermüdung vorausgesetzt. (weiter Anmerkungen hierzu finden sich auch in den nachfolgenden Antworten der MPA Universität Stuttgart zu den generischen Fragestellungen des BMU).

- Die Bewertung des Befundes erfolgte anhand einer bruchmechanischen Analyse unter Berücksichtigung von zyklischem Risswachstum infolge mechanischer und thermischer Belastungen. Die gewählte Vorgehensweise und Methodik zur Ermittlung kritischer Risstiefen sowie zur Berechnung von zyklischem Risswachstum ist, soweit es die vorliegenden Unterlagen^{1,2)}, die nur eine zusammenfassende Darstellung der durchgeführten Untersuchungen und deren Ergebnisse darstellen, erlauben, nachvollziehbar und plausibel.
- Bei der Festlegung der Belastungsannahmen für Temperaturschichtung bzw. Thermochock wurde $\Delta T=120$ K und die im Zeitraum 2001 bis 2010 ermittelte Häufigkeit angesetzt. In diesem Zusammenhang wäre zu klären ob auch andere Temperaturdifferenzen ΔT größer oder kleiner als 120 K aufgetreten sind, die mit ihren Häufigkeiten einen Beitrag zur Ermüdung (Erschöpfungsgrad) leisten.
- Das mögliche Entstehen eines Ermüdungsanrisses lässt sich nach Angaben des TÜV mit den angenommenen Belastungszyklen nur nachvollziehen, wenn im Verrundungsbereich des Wärmeschutzrohres zur Erhöhung der Spannungsamplitude eine zusätzliche Kerbe mit einem Radius $r=0,25$ mm unterstellt wird. Dabei ist die Kerbgeometrie so festgelegt, dass bis zum Jahr 2001 ein Erschöpfungsgrad $D=1$ erreicht ist. Das Erreichen von $D=1$ wird hier gleichgesetzt mit einem Ermüdungsanriss.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass das Vorhandensein einer Kerbe sowie deren Auswirkungen auf das Ermüdungsverhalten nicht verifiziert sind. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass austenitische Werkstoffe im low cycle fatigue (LCF) Bereich eine relativ geringe Kerbempfindlichkeit aufweisen.

Ob bei der Ermüdungsberechnung der Mediumseinfluss besonders berücksichtigt wurde, ist nicht bekannt. Ebenfalls nicht bekannt sind die genauen Randbedingungen und Belastungen sowie die zur Durchführung der Ermüdungsanalyse verwendete Berechnungsmethode und Werkstoffmodellierung. Somit ist eine Bewertung bezüglich der Plausibilität des unterstellten Schädigungsmechanismus „Ermüdung“ als den im vorliegenden Fall relevanten Schädigungsmechanismus nicht möglich.

- Da die Ursache des vorliegenden Befundes nach dem derzeitigen Kenntnissstand nicht eindeutig zugeordnet werden kann, sind Maßnahmen (z.B. detaillierte Schadensanalyse, Inspektion von Komponenten mit vergleichbarer Konstruktion, Werkstoff und Belastung) erforderlich, um den Befund als „generischen Befund“ ausschließen zu können.

Generische Fragestellungen des BMU

Zur Bewertung der Anzeigen im WSR der VAL des KKG wurden vom BMU generische Fragenstellungen definiert, die von der MPA Universität Stuttgart wie nachfolgend aufgeführt beantwortet werden.

1. *Welche Informationen sind erforderlich, um eine Schadensanalyse an einer Komponente (WSR VAL) der DfU innerhalb des Primärkreises nach dem Stand von W&T durchführen zu können?*

Die generelle Vorgehensweise bei der Schadensanalyse ist z.B. in der VDI Richtlinie 3822 „Schadensanalyse“ beschrieben. Die Durchführung der Schadensanalyse ist in Bild 1 zusammenfassend dargestellt.

Durch die Schadensanalyse ist die Ursache für den aufgetretenen Schaden zu ermitteln. Ursache kann sein z.B. die anliegenden Belastungen (statisch, zyklisch, thermisch, mechanisch,

...), vorhandene Werkstoffgänzen, unerkannte Fertigungsfehler oder Mediumsbedingungen oder auch deren Kombinationen.

Dabei ist insbesondere zu klären welcher Schädigungsmechanismus (oder auch Schädigungsmechanismen) die Schädigung bewirkt hat, um daraus Rückschlüsse auf deren Ursache/n zu ermöglichen. Hierfür ist es in der Regel erforderlich den schadhaften Bereich einer faktorgrafischen Untersuchung zu unterziehen, **wofür ein Heraustrennen dieses Bereichs erforderlich ist.**

Deshalb ist zunächst zu klären, ob der Schädigungsmechanismus mit ausreichender Sicherheit identifiziert werden kann, ohne den schadhaften Bereich heraus zu trennen.

Darüber hinaus sind zur Ursachenklärung unabdingbar:

- a. Herstellungsunterlagen, wie Werkstoffzeugnisse, Fertigungs-/Schweißpläne, Prüfprotokolle der Fertigung und Zeichnungen.
- b. Unterlagen aus der Inbetriebsetzung, insbesondere solche, die Rückschlüsse auf Belastungen zulassen.
- c. Unterlagen über die betrieblichen Messungen/Überwachung, insbesondere solche, die Rückschlüsse auf Belastungen und Mediumsbedingungen zulassen.

2. *Wie exakt ist dazu die Ermittlung der Schadensursache erforderlich (welche Informationen müssen vorhanden sein)?*

Für eine gesicherte Befundbewertung und die daraus abzuleitenden Aussagen über die Integrität der Komponente im weiteren Betrieb sind die genaue Kenntnis des wirksamen Schädigungsmechanismus und dessen Ursache/n zwingend erforderlich.

Dabei ist die Schadensursache so exakt zu ermitteln, dass eine gesicherte Integritätsbewertung vorgenommen und darauf basierend wirksame Maßnahmen für die Absicherung des weiteren Betriebs festgelegt werden können (z.B. konstruktive Änderungen, Werkstoffwechsel, Änderung der Fahrweise, betriebliche Überwachung der Ursachen, WkP, ZfP, ...).

Die für die Ermittlung der Schadensursache erforderlichen Informationen sind unter Frage 1 beschrieben.

3. *Welche Aussagen sind aufgrund der vorhandenen Informationen nach dem Stand von W&T zum Risswachstum zu treffen?*

Zur Bewertung der Komponentenintegrität mittels einer bruchmechanischen Analyse ist das Risswachstum in einem zu betrachtenden Zeitintervall (z.B. bis zur nächsten Inspektion) zu quantifizieren. Hierfür sind genaue Informationen über den Schädigungsmechanismus, die aufgetretene Belastung (Höhe und Zyklenzahl) und das daraus zu erwartende Risswachstum erforderlich.

Im vorliegenden Fall sind der wirksame Schädigungsmechanismus und dessen Ursache nicht eindeutig geklärt. Deshalb ist eine Risswachstumsberechnung unter der Annahme von zyklischem Risswachstum infolge mechanischer und thermischer Belastungen nicht abgesichert.

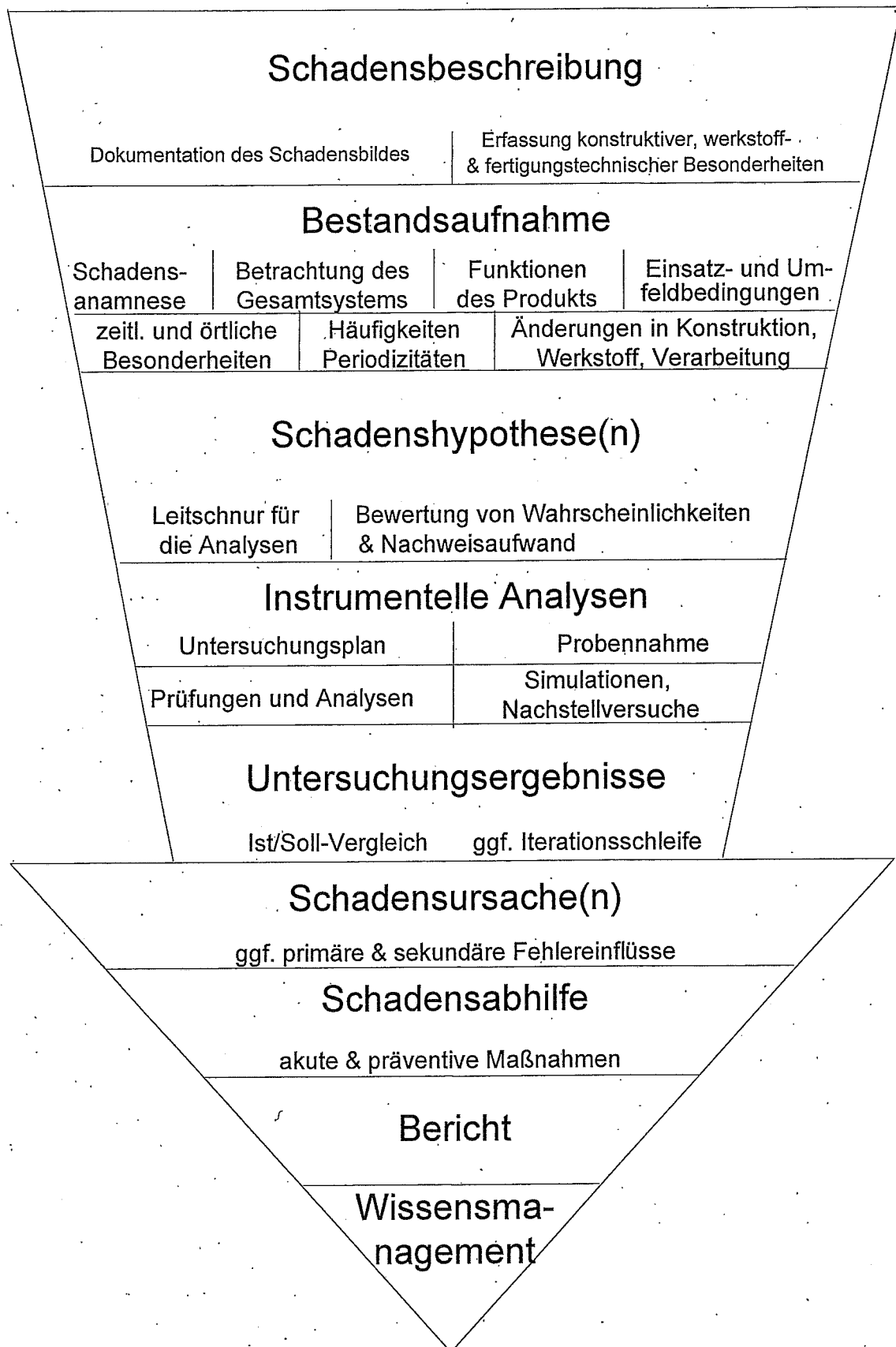


Bild 1: Durchführung einer Schadensanalyse (aus VDI Richtlinie 3822 „Schadensanalyse“)