

Schäden an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren durch Spannungsrissskorrosion – Ursache und Nachweis

STELLUNGNAHME

Inhaltsverzeichnis

1	Anlass und sicherheitstechnische Bedeutung.....	2
2	Bewertungsmaßstab	2
3	Beratungsgang.....	2
4	Beratungsergebnisse	6
5	Empfehlungen	6

1 Anlass und sicherheitstechnische Bedeutung

Die Berichte des Betreibers des Kernkraftwerkes Biblis, Block A und B (KWB-A, -B) und des Sachverständigen zu Befunden im Rohrbodenbereich an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren, die in der 69. Sitzung des RSK-Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE am 13.12.2006 vorgetragen worden waren, sowie die Weiterleitungsnachricht WLN 2005/07 („Wirbelstromanzeigen an Heizrohren im Rohrbodenbereich von Dampferzeugern“ im Kernkraftwerk Biblis, Block A am 10.04.2005) und die Ereignismeldungen über Spannungskorrosionsrisse bzw. Wirbelstromanzeigen in den Kernkraftwerken KWB-B und Unterweser (KKU) waren Anlass für den RSK-Ausschuss DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE, die Beratung zu Befunden in DE-Heizrohren in Kernkraftwerken aufzunehmen und eine Stellungnahme auszuarbeiten.

Die Schädigung durch interkristalline Spannungsrisskorrosion (IkSpRK) von DE-Heizrohren aus dem Werkstoff Alloy 800, wie er in allen deutschen Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor(DWR)-Anlagen eingesetzt ist, im Bereich der Einwalzungen und der Abstandsgitter, stellt einen neuen bisher nicht angenommenen Schädigungsmechanismus dar. Die erforderliche rechtzeitige Erkennung (vor der Leckage des DE-Heizrohres) dieses Schadens ist mit den bisher eingesetzten Methoden der zerstörungsfreien Prüfung (zFP) nicht in ausreichendem Maße gewährleistet.

Die DE-Heizrohre sind Bestandteile der Druckführenden Umschließung (DFU). Die Heizrohre stellen die Schnittstelle zwischen dem Primärkreislauf und dem sekundärseitigen Wasser-Dampfkreislauf in einem Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor (DWR) dar. Der Wärmeaustausch zwischen den beiden Kreisläufen erfolgt durch die Heizrohre. Wanddurchdringende Schäden an einzelnen Heizrohren im Leistungsbetrieb führen aufgrund der unterschiedlichen Druckverhältnisse zum Übertritt von Primärkühlmittel in den Wasser-Dampf-Kreislauf und sind somit sicherheitstechnisch relevant. Bei Dampferzeuger-Heizrohrschaden können Systeme der Sicherheitsebene 2 oder diejenigen Systeme, die zur Störfallbeherrschung (Sicherheitsebene 3) erforderlich sind, angefordert werden.

2 Bewertungsmaßstab

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an DE-Heizrohre sind im kerntechnischen Regelwerk, in den RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren und in den Störfall-Leitlinien festgelegt. Die Bewertung gründet sich ferner auf den in der Fachliteratur veröffentlichten Stand von Wissenschaft und Technik sowie auf zugezogenes Expertenwissen. Die übergeordnete Anforderung ist im vorliegenden speziellen Fall, dass kein Versagen von DE-Heizrohren bis zum Zeitpunkt der nächsten Prüfung auftritt. Dabei wurde insbesondere die Bedeutung der zFP für die Prognose zur Integrität der DE-Heizrohre berücksichtigt.

3 Beratungsgang

In der **62. Sitzung am 05.04.2006** war der RSK-Ausschuss DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE zusammenfassend über die Ergebnisse früherer Beratungen der RSK und der RSK-Ausschüsse DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN (DK) und SICHERHEITSFORSCHUNG UND GRUNDSATZFRAGEN (SIFO) (Beratungsunterlagen [1] bis [5]) sowie über die zum Thema ergangenen Weiterleitungsnachrichten WLN 08/98, WLN 04/99 und WLN 2005/07 (Beratungsunterlagen [6] bis [8]) in

Kenntnis gesetzt worden. Darüber hinaus lag der Abschlussbericht über den DE-Heizrohrschaden im US-amerikanischen Kernkraftwerk Indian Point 2 als Beratungsunterlage [9] vor. Die Beratungen des Ausschusses zur Spannungsrissskorrosion von DE-Heizrohren waren in der **63. Sitzung am 02.05.2006**, **64. Sitzung am 21.06.2006** und **68. Sitzung am 08.11.2006** fortgesetzt worden.

In der **69. Sitzung am 13.12.2006** hatte der Ausschuss mit der Beratung zu den Untersuchungen an den DE-Heizrohrbefunden in der Anlage KWB-A begonnen. Auf Grund der Ergebnisse der Schadensuntersuchungen und der eingeleiteten Maßnahmen zur weiteren und vollständigen Abklärung des Schadensbildes sowie des vorgestellten künftigen Prüfkonzepts für den DE-Rohrbodenbereich, das Maßnahmen zum Prüfumfang und Prüfintervall, zur Prüftechnik und zu den Verschlusskriterien umfasst, hatte der Ausschuss keine Bedenken gegen den Weiterbetrieb der DE in der Anlage KWB-A für einen Betriebszyklus. Der Ausschuss hatte befürwortet, dass der Betreiber das vorgestellte Untersuchungsprogramm zum Undichtheitspfad zielgerichtet und zügig abarbeitet.

In der **70. Sitzung am 08.02.2007** war der Ausschuss darüber informiert worden, dass in der Revision 2007 bei zerstörungsfreien Prüfungen im Kernkraftwerk KWB-B an den DE10 und DE20, die zu 100 % mit der Standardsonde und ergänzend in den Randbereichen mit der sog. X-Probe (Array-Sonde mit zwei oder drei Reihen auf den Umfang verteilten sog. Pancake-Spulen) vorgenommen worden waren, an einem Heizrohr im Rohrbodenbereich des DE10 eine axiale Anzeige mit der Standardsonde gefunden worden sei; diese setze sich aus zwei Anzeigen nahe den Einwölbungen zusammen und passe in das bereits bekannte Bild derartiger Schädigungen aus dem Jahr 2006 in KWB-A.

In der **76. Sitzung am 19.09.2007** war über die in den DE-Heizrohren der Anlage KKW mit Wirbelstrom neu festgestellten Befunde berichtet worden. Insgesamt waren bei 34 DE-Heizrohren Befunde festgestellt worden. Teilweise waren die Wanddickenschwächungen (WDS) erheblich. Es waren Wanddickenschwächungen von bis zu 75 % innerhalb von zwei Jahren gemessen worden. Nach den Ergebnissen der Array-Sonde handelte es sich um flächige Werkstofftrennungen, axial und in Umfangsrichtung (circular) orientiert. Nach Information des Ausschusses waren die folgenden Befundtypen festgestellt worden:

- Anzeigen zwischen den Einwölbungen im Rohrboden an fünf DE-Heizrohren mit Axialfehlern; maximale WDS von 48 %, mit Wanddickenschwächungen bis zu 8 % in zwei Jahren mit einer maximalen Anzeigenlänge von 16 mm,
- Anzeigen im Bereich der oberen Einwölbung (mit der Standardsonde (Bobbin Coil) nicht nachweisbar, daher WDS und Abtragsrate nicht zu ermitteln) an sieben DE-Heizrohren mit Umfangsfehlern und einer maximalen Anzeigenlänge von 13 mm; ein DE-Heizrohr mit einem 4 mm langen Axialfehler sowie runde Fehler mit geringer Anzeigenlänge an drei DE-Heizrohren,
- Anzeigen im Bereich von 10 bis 80 mm oberhalb des Rohrbodens an fünf DE-Heizrohren mit Axialfehlern und einer maximalen Wanddickenschwächung von 75 % in zwei Jahren bei einer maximalen Anzeigenlänge von 10 mm sowie runde Fehler mit einer maximalen WDS von 48 % und einer geringen Anzeigenlänge und
- Anzeigen im Bereich von Abstandshaltern an sieben DE-Heizrohren mit Axialfehlern und einer Wanddickenschwächung bis zu 69 % in zwei Jahren bei einer maximalen Anzeigenlänge von 15 mm.

Insgesamt sind an den vier DE der Anlage KKK 31 befundbehaftete DE-Heizrohre mit Walzstopfen verschlossen worden. 12 dieser Befunde waren mit der Standardprüftechnik nicht nachweisbar gewesen und nur mit der Array-Sonde aufgefunden worden. Zusätzlich hatte es noch 20 weitere kleinere Anzeigen gegeben, die aufgrund der gemessenen Wanddickenschwächungen bzw. Anzeigenlängen belassen worden waren.

Im Gegensatz zur Standardprüftechnik (Innendurchlaufsonde – Bobbin Coil), die die Wirbelstromanzeigen integral über den Rohrumfang erfasst, können mit der Array-Sonde lokal am Rohrumfang vorhandene Fehler wesentlich besser nachgewiesen werden, insbesondere auch im Bereich der Einwalzung und unmittelbar oberhalb der Rohrbodenplatte. Umfangsfehler im Verformungsbereich der Einwalzung, die mit der Standardprüftechnik nicht nachweisbar sind, sind mit der Array-Sonde gut nachweisbar. Die Standardtechnik ist für die Bestimmung der Fehlertiefe erforderlich. Beide Techniken können in einer Kombinationssonde betrieben werden.

In der Diskussion zur Schädigung im Bereich der Abstandshalter hat der Ausschuss festgestellt, dass es dort offensichtlich Bereiche gibt, bei denen keine Durchströmung stattfindet und demnach eine Aufkonzentration von Chloriden und anderen korrosionsfördernden Verunreinigungen möglich ist. Prinzipiell kann hier ein Schädigungsmechanismus ähnlich dem im Rohrbodenbereich angenommen werden.

Ferner wurde diskutiert, dass vom Anlagenhersteller Berst- und Kollapsversuche an DE-Heizrohren mit geschwächter Wanddicke aus dem Werkstoff Incoloy 800 vorgenommen worden waren, deren Ergebnisse in den GRS-Bericht A-1142 zur Grenztragfähigkeit geschädigter DE-Heizrohre [10, 11] eingeflossen sind. Beispielsweise war für einen elliptischen wastageartigen Fehler (Länge 40 mm, Breite 16,5 mm) bei Betriebsüberdruck (103 bar) und Betriebstemperatur (315° C) ein Versagen bei einer Wanddickenschwächung von 90 % ermittelt worden. Für den abdeckenden Lastfall des bestimmungsgemäßen Betriebs war eine zulässige Wanddickenschwächung WDS_{zul} von 68 % ermittelt worden. Diesem Ergebnis liegt eine Sicherheitsreserve von 2,7 gegenüber dem experimentell ermittelten Berstdruck des vorgeschädigten Rohres zu Grunde.

Nach [10] wird für künstliche Fehler (Nuten) mit Längen < 15 mm eine zulässige Wanddickenschwächung von 65 % und für eine Länge des künstlichen Fehlers von 25 mm eine zulässige Wanddickenschwächung von 55 % ermittelt, wobei, wie oben beschrieben, ein Sicherheitsfaktor von 2,7 (bei 105 bar Differenzdruck im bestimmungsgemäßen Betrieb) zu Grunde gelegt wurde. Wenn die in der Anlage KKK ermittelten maximalen Risswachstumsraten (zirka 35 %/a) zu Grunde gelegt werden, erübrigt sich derzeit jede weitere Diskussion zum möglichen Verschließen der Leitung, d. h. bei Verdacht auf IkSpRK müssen die Rohre verschlossen werden.

Die in der **76. Sitzung am 19.09.2007** vorgetragenen Ergebnisse der Wirbelstromprüfung im Bereich des Rohrbodens der DE in der Anlage KKK stimmen mit den in der Anlage KWB-A festgestellten Ergebnissen überein. Da diese Befunde nach dem Ziehen zweier Rohre in der Anlage KWB-A eindeutig dem Mechanismus der IkSpRK zugeordnet werden konnten, sind auch die in der Anlage KKK vorliegenden Befunde aufgrund von Plausibilitätsbetrachtungen diesem Mechanismus zuzuordnen. Der Betreiber der Anlage KKK bestätigte in der **84. Sitzung am 23.07.2008** diese Annahme. Nach Darlegung des Betreibers ist Flusswassereintrag infolge Kondensatorleckage die Ursache der Schädigungen an den DE-Heizrohren.

In der **84. Sitzung am 23.07.2008** ließ sich der Ausschuss vom Betreiber der Anlage KKK zur statistischen

Auswertung von Fehlern an DE-Heizrohren unter Korrosionseinfluss für die Festlegung des Prüfkonzepts zum Vorgehen, zu den Anwendungsmöglichkeiten sowie zu bestimmenden Parametern des Prüfkonzepts und zum resultierenden Prüfkonzept für die Revision 2008 in KKK berichten. Die probabilistischen Grundlagen, das Prinzip der Fehlerakkumulation, die mechanistischen Überlegungen (kumulative Fehlergrößenfunktion und kumulative Fehlerwachstumsfunktion) und die für die rechnerische Analyse getroffenen Annahmen wurden vorgestellt. Die im Rahmen von zerstörungsfreien Prüfungen gemessenen Werte werden nach diesem Bericht analytisch ausgewertet, um Fehlerwachstum und durchschnittliche Fehlerwachstumsraten zu prognostizieren, wobei – ohne zunächst das Verschließen von Heizrohren zu berücksichtigen – zunächst die Prognoseergebnisse für die Revision 2008 vorgestellt wurden.

In der **85., 87., 88. und 91. Sitzung am 10.09.2008, am 13./14.11.2008, am 11.12.2008 und am 30./31.03.2009** setzte der Ausschuss die Beratung für die Abgabe der vorliegenden Stellungnahme fort. In der 88. Sitzung wurde zum Thema „Abschätzung kritischer Risstiefen bei DE-Heizrohren unter Innendruckbelastung“ vorgetragen und diskutiert [12]. In der 91. Sitzung wurde zum Thema „Abschätzung von Lecköffnungen für unterkritische, wanddurchdringende Risse in DE-Heizrohren“ vorgetragen und diskutiert [13]. Auch lag die im Zuge der Beratungen erschienene Weiterleitungsnachricht WLN 2008/04 zu Befunden an Dampferzeuger-Heizrohren im Kernkraftwerk Unterweser (KKU) als Beratungsunterlage [14] vor.

Angesichts der in der Anlage KWB-A an zwei gezogenen DE-Heizrohren festgestellten Befundlage und der bei den zFP an DE-Heizrohren in der Anlage KKK gefundenen WDS hatte sich die seinerzeit nicht zu beantwortende Frage gestellt, ob es sich um zwei Einzelfälle oder den Beginn einer Systematik handelt. Deshalb hatte der Ausschuss empfohlen, gezielt Erkenntnisse zum Einsatz neuer zerstörungsfreier Prüfverfahren für den Rohrbodenbereich der DE zu nutzen und somit festgestellte Lücken im Prüfkonzept im Bereich der Einwalzungen zu schließen. Bei den nächsten anstehenden wiederkehrenden Prüfungen (WKP) sollte die nunmehr verfügbare, erweiterte zerstörungsfreie Prüftechnik zur Überwachung der DE-Heizrohre eingesetzt werden. Der Ausschuss hatte es für notwendig gehalten, Fehler im Einwalzbereich zu erfassen und zu bewerten, und empfohlen, die im Zuge der Revisionen des Jahres 2007 gewonnenen Ergebnisse zusammenzustellen.

Die Ergebnisse der Hide-Out-Return Analysen aus den Kernkraftwerken KKK und Neckarwestheim, Block 1, (GKN-1) wurden dem Ausschuss vorgestellt. Bei der Diskussion zur Vorgehensweise bei den Analysen wurde das Prinzip dieser Methode nochmals in der 91. Sitzung erläutert. Im Dauerbetrieb werden in der DE-Abschlammung geringere Salzgehalte gemessen als in den Spalten tatsächlich vorhanden sind. Der Vorgang der Anreicherung von salzartigen Verunreinigungen in Korrosionsprodukten und in Spalten wird als Hide-Out bezeichnet. Da diese Salze in DE-Wasser Hydrolyseprozessen unterliegen, können je nach Art der eingeschleppten Salze, Säuren oder Laugen gebildet werden. Umgekehrt lösen sich diese Salze beim Abfahren und Erkalten der Anlage und erhöhen somit den Salzgehalt im DE-Wasser. Diesen Vorgang nennt man Hide-Out-Return.

Anhand der gewonnenen Chemiedaten (Kationen: Na, K, Mg, Ca; und Anionen: Cl, PO₄, SO₄ in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur) werden die pH-Werte in den Spalten berechnet und die Korrosionsanfälligkeit bewertet.

4 Beratungsergebnisse

Aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse kommt die RSK zu folgenden Ergebnissen:

Die Anwendung der konventionellen Wirbelstromtechnik (Innendurchlaufspule - Bobbin Coil) für die Gesamtrohre und die zusätzliche Verwendung der Array-Sonde für den Bereich bis zu den ersten Abstandhaltern bringen eine wesentliche Verbesserung in der Prüfaussage. Während mit der Standardtechnik Fehler wie z. B. Reibabtrag (Fretting) oder flächiger korrosiver Abtrag deutlich zur Anzeige gebracht werden, können mit der Array-Sonde Fehler wie z. B. Risskorrosion, sowohl axial als auch radial orientiert, deutlich detektiert und als solche charakterisiert werden. Ein weiterer Vorteil der Array-Sonde besteht in der Trennung/Auflösung von Anzeigen im Bereich von Geometrieübergängen (Einwalmung, Abstandshalter Oberkante Rohrbodenplatte) (Beratungsunterlagen [15] und [16]) im Außenbereich der DE-Heizrohre.

Bei einem festgestellten Risswachstum von bis zu 35 % der Wanddicke pro Jahr und mit derzeitigen Prüfintervallen von vier (fünf) Jahren dürfen die derzeitigen Kriterien zum Verschließen der Rohre nicht mehr angewendet werden. Bei einer Anzeigencharakteristik, die auf IksPRK hinweist, müssen diese DE-Heizrohre nach dem derzeitigen Kenntnisstand verschlossen werden. Die Prüfumfänge und Prüfintervalle sind diesem neuen Sachstand anzupassen. Zur Gewährleistung der nach den RSK-Leitlinien (Abschnitt 4.1.2) geforderten Maßgabe nach einer ausreichenden Prüfbarkeit sollte zum Nachweis der Integrität der DE-Heizrohre die Array-Sonde im Einwalmungsbereich standardmäßig eingesetzt werden.

Aus Sicht der RSK ist auch zu beachten, dass das am Beispiel der Anlage KKKU vorgestellte Verfahren der statistischen Auswertung der zFP-Messdaten derzeit keine belastbaren Ergebnisse hinsichtlich Prüfumfang und Prüfintervall liefert, auch bezogen auf andere Anlagen.

5 Empfehlungen

Die Schädigung von DE-Heizrohren aus dem Werkstoff Alloy 800 durch Korrosion (IksPRK) stellt einen neuen, bisher nicht angenommenen Schädigungsmechanismus dar. Zur Erfüllung der sicherheitstechnischen Anforderungen, insbesondere der frühzeitigen Erkennung derartiger Schädigungen, ist eine Überprüfung des WKP-Konzeptes und der betrieblichen Überwachungsmaßnahmen erforderlich. Die RSK gibt zur Erfüllung der Anforderung, dass zumindest für einen Prüfzyklus die Integrität der DE-Heizrohre prognostiziert werden kann, die folgenden Empfehlungen:

- 1 Es wird empfohlen, zusätzlich zu der routinemäßig eingesetzten Innendurchlaufspule (Bobbin Coil) im Bereich zwischen unterer Einwalmung bis zum ersten Abstandshalter bei einem Prüfumfang von 20 % der Heizrohre Array-Pancake-Sonden einzusetzen. Bei der Auswahl des genannten Prüfumfanges sollen die aus Konstruktion und Erfahrungen des Betriebs (auch aus anderen Anlagen) bekannten Rohrbereiche eines möglichen höheren korrosiven Angriffs berücksichtigt werden.
- 2 Zu einer Trendbewertung einer IksPRK-Gefährdung wird empfohlen, Hide-Out-Return-Analysen durchzuführen. Diese ermöglichen einen allgemeinen Überblick über die Belastung von Dampferzeugern durch gelöste Verunreinigungen. Werden anlagenspezifische Auffälligkeiten der wasserchemischen Verhältnisse festgestellt, sind die Verunreinigungen zu erfassen und zu beurteilen. Es wird angeregt, das Hide-Out-Return-Verfahren zu standardisieren und entsprechend anlagen-

spezifischen Gegebenheiten anzuwenden.

3 Wenn in einem Kernkraftwerk bei den wiederkehrenden Prüfungen an DE- Heizrohren Befundanzeigen auftreten, die Hinweise auf den betrieblichen Schädigungsmechanismus IkSpRK geben, wird empfohlen, wie folgt vorzugehen:

- Zur Klärung der Schadensursache und zur Festlegung von Abhilfemaßnahmen sind alle Informationen über Besonderheiten der Betriebsweise der DE, über Ergebnisse von mechanischen und chemischen DE-Reinigungen und über Ausmaß und Häufigkeit von Kondensatorleckagen zusammenzustellen. Zum Zwecke der Absicherung der Schadenshypothese und zur Festlegung von wirksamen Abhilfemaßnahmen wird empfohlen, Heizrohrabschnitte mit Befundanzeigen zwecks Schadensuntersuchung herauszutrennen.
- An den betroffenen DE-Heizrohren sind die Fehlerabmessungen (Länge, Tiefe) und deren Orientierung (axial, in Umfangsrichtung verlaufend) zu bestimmen.
- An allen DE sind die Heizrohre - in den entsprechend der Befundlage kritischen Bereichen - zu 100 % zu prüfen.
- Betroffene Heizrohre müssen nach dem derzeitigen Kenntnisstand verschlossen werden [12].
- Nach dem erstmaligen Auftreten eines solchen Befundes muss beim nächsten Brennelement(BE)-Wechsel die Prüfung wiederholt werden.
- Wenn bei der erneuten Prüfung weiterhin gleichartige Befunde auftreten, ist wieder im einjährigen Intervall zu prüfen.

Beratungsunterlagen

- [1] Auszug TOP 4 des Ergebnisprotokolls der 123. Sitzung des RSK-Ausschusses
DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN am 07.03.1984

- [2] Auszug TOP 5 des Ergebnisprotokolls der 124. Sitzung des RSK-Ausschusses
DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN am 11.05.1984

- [3] Auszug TOP 4 des Ergebnisprotokolls der 133. Sitzung des RSK-Ausschusses
DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN am 02.07.1985

- [4] Auszug TOP 4.3 des Ergebnisprotokolls der 251. Sitzung des RSK-Ausschusses
DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN am 03.06.1997

- [5] Auszug TOP 4 und Anlage 2 des Ergebnisprotokolls der 240. Sitzung des RSK-
Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN am 18.01.1989

- [6] Weiterleitungsnachricht zu Ereignissen in Kernkraftwerken der Bundesrepublik
Deutschland (WLN 2005/07) „Wirbelstromanzeigen an Heizrohren im
Rohrbodenbereich von Dampferzeugern“ im Kernkraftwerk Biblis, Block A,
am 10.04.2005, GRS, 25.05.2005

- [7] Weiterleitungsnachricht zu meldepflichtigen Ereignissen in Kernkraftwerken der
Bundesrepublik Deutschland (WLN 04/99), Kleinstleckage eines Dampferzeuger-
Heizrohres im Kernkraftwerk Biblis-B, GRS, 09.03.1999

- [8] Weiterleitungsnachricht zu meldepflichtigen Ereignissen in Kernkraftwerken der
Bundesrepublik Deutschland (WL 08/98), Leck in einem Dampferzeuger-Heizrohr in
der Anlage Grafenrheinfeld und Anzeigen an Dampferzeuger-Heizrohren in der Anlage
Unterweser, GRS, 27.04.1999

- [9] Indian Point 2 Steam Generator Tube Failure, Lessons-Learned Report
(TAC No. MA9163), US NRC, Final Report, October 23, 2000

- [10] D. Azodi, H. Reck, H. Schulz, R. Arenz
Grenztragfähigkeit geschädigter Dampferzeuger-Heizrohre - Abschlussbericht –
GRS-A_1142 (September 1985)

- [11] H. Reck/GRS
Grenztragfähigkeit geschädigter Dampferzeugerheizrohre
Kopien von Folien; 18.10.2005
- [12] Abschätzung kritischer Rissgrößen bei DE-Heizrohren unter Innendruckbelastung,
X. Schuler, 08.12.2008, Vortrag in der 88. Sitzung des RSK-Ausschusses
DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE am 11.12.2008
- [13] Abschätzung von Lecköffnungsflächen für unterkritische, wanddurchdringende Risse in
DE-Heizrohren, X. Schuler, 31.03.2009, Vortrag in der 91. Sitzung des RSK-
Ausschusses DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE
am 30./31.03.2009
- [14] Weiterleitungsnachricht zu Ereignissen in Kernkraftwerken der Bundesrepublik
Deutschland (WLN 2008/04), Befunde an DE-Heizrohren im Kernkraftwerk
Unterweser, 28.05.2008
- [15] Statistical Evaluation of Flaws on SG Tubes under Influence of Corrosion fort he
Definition of the Inspection Concept Exemplified on KKK, Kopien von Folien des
Berichts von Herrn Wallin, 23.07.2008
- [16] Assessment of 2008 Inspection Results for KKK Steam Generation Tubes, Kopien von
Folien zum Bericht von Herrn Wallin, 30.03.2009