

---

RSK-Empfehlung

(512. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 22./23.10.2019)

**Schäden an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren durch Spannungsrissskorrosion –  
Maßnahmen zur Sicherstellung der Integrität der Heizrohre**

**EMPFEHLUNG**

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>2</b>
<b>2 Beratungsgang .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Sachverhalt .....</b>	<b>3</b>
<b>4 Sicherheitstechnische Bedeutung .....</b>	<b>7</b>
<b>5 Bewertungsmaßstab .....</b>	<b>7</b>
<b>6 Beratungsergebnisse.....</b>	<b>8</b>
<b>7 Empfehlungen.....</b>	<b>12</b>
<b>8 Quellen.....</b>	<b>15</b>

---

## 1 Einleitung

In der Revision 2018 wurden im Kernkraftwerk Neckarwestheim 2 (GKN-2) mit Wirbelstromprüfungen lineare, umfangsorientierte Anzeigen in DE-Heizrohren auf der heißen Seite der Dampferzeuger (DE) 20 und 40 festgestellt. Heiße Seite bezeichnet hier die Seite, in der das Primärkühlmittel in die DE-Heizrohre eintritt. Insgesamt wurden an 101 Heizrohren lineare, umfangsorientierte Anzeigen, davon 99 im DE 20 und zwei im DE 40, identifiziert. Die Wanddickenschwächungen waren unterschiedlich tief (maximale lokale Wanddickenschwächung an einem Rohr 91 %). Die Anzeigen befanden sich jeweils im Bereich des Rohrbodens, der die Primär- von der Sekundärseite trennt und in den die Heizrohre mechanisch eingewalzt sind.

Auf Bitte des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) hat sich der RSK-Ausschuss DRUCKFÜHRENDE KOMPONENTEN UND WERKSTOFFE (DKW) in seiner 172. Sitzung am 05.11.2018 mit den anlagenspezifischen Fragestellungen im Hinblick auf das Wiederanfahren der Anlage GKN-2 nach der Revision 2018 befasst.

Darüber hinaus besteht aus Sicht der RSK der Bedarf, die Befunde im GKN-2 im Hinblick auf Folgerungen für alle deutschen Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktor (DWR) zu bewerten, da umfangsorientierte Anzeigen in einem derartigen Ausmaß in deutschen Kernkraftwerken zuvor noch nicht festgestellt worden waren. Umfangsorientierte Anzeigen an Heizrohren waren der RSK bislang nur aus dem Kernkraftwerk Unterweser im Jahr 2007 bekannt, wo derartige Befunde an sieben Heizrohren festgestellt wurden [1].

Die RSK hat sich in früheren Jahren bereits mit der Frage der Integrität der DE-Heizrohre befasst, veranlasst durch lineare und überwiegend axial orientierte Anzeigen in DE-Heizrohren der Anlagen Biblis A und Unterweser. Sie hatte dazu in den Jahren 2010 und 2012 zwei Stellungnahmen vorgelegt:

- Schäden an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren durch Spannungsrisskorrosion – Ursache und Nachweis; verabschiedet in der 428. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission am 15.07.2010 [1]:  
In dieser Stellungnahme wurden Empfehlungen zu den wiederkehrenden Prüfungen an DE-Heizrohren, zur Überwachung der Wasserchemie mit sogenannten Hide-Out-Return-Analysen und zum Vorgehen bei Erkennen von rissartigen Anzeigen an DE-Heizrohren abgegeben.
- Zu unterstellende Leckagen an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren: Mehrfachrohrbruch/Lecköffnung wanddickengeschwächter DE-Heizrohre; verabschiedet in der 447. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission am 03.05.2012 [2]:  
Diese Stellungnahme befasste sich mit der zu unterstellenden Leckrate bei axialen Rissen in DE-Heizrohren und leitete auf dieser Basis eine Empfehlung zur Aufnahme einer betrieblichen Regelung zum Abfahren der Anlage bei Erkennen einer Leckage von > 40 kg/d ab.

Vor dem Hintergrund der Befunde im GKN-2 sieht es die RSK als erforderlich an, die beiden Stellungnahmen zu überprüfen und zu ergänzen. Das Ergebnis der Beratungen ist in der vorliegenden Empfehlung dokumentiert.

---

## 2 Beratungsgang

Auf der 166. Sitzung des RSK-Ausschusses DKW am 12.10.2017 berichtete ein Ausschussmitglied zu Wirbelstrombefunden an DE-Heizrohren in der Anlage GKN-2 [3]. Die Beratung wurde auf der 168. DKW-Sitzung am 22.02.2018 und der 171. DKW-Sitzung am 28.06.2018 [4] fortgesetzt. In der 172. DKW-Sitzung am 05.11.2018 [5] wurde von Betreiber, Hersteller, Sachverständigen und Behörde zu den Anzeigen bei der Wirbelstromprüfung von DE-Heizrohren in GKN-2 (ME 03/2017 und ME 04/2018) vorgetragen. Der Ausschuss betrachtete auf dieser Sitzung vor allem anlagenspezifische Aspekte. In der 173. DKW-Sitzung am 22.11.2018 [6] wurde über die generischen Aspekte der Anzeigen an DE-Heizrohren beraten. In der Sitzung wurden zudem die Ergebnisse einer Länderumfrage des BMU [7] zu Kondensatorleckagen und den wiederkehrenden Prüfungen an DE-Heizrohren in den deutschen Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren vorgestellt.

In der 174. DKW-Sitzung am 12.12.2018 [8] wurde die Weiterleitungsnachricht (WLN) 2018/06 „Anzeigen bei Wirbelstromprüfungen von Dampferzeugerheizrohren im Kernkraftwerk Neckarwestheim-2 (GKN-2), gemeldet am 25.09.2017 und 14.09.2018“ [9] beraten und ein Stellungnahmeentwurf bearbeitet. Von der GRS wurde zur Berechnung von Rissöffnungsflächen und Leckraten berichtet. Über die Nachweisbarkeit des Leckvor-Bruch-Verhaltens wurde beraten.

Der Stellungnahmeentwurf wurde auf der 175. DKW-Sitzung am 14.02.2019 [10] verabschiedet und zur weiteren Beratung an die RSK übergeben. In der 510. Sitzung der RSK am 05.06.2019 wurde die Unterlage beraten.

In der 511. Sitzung der RSK am 04.09.2019 wurde der DKW gebeten, weitere Befunde aus der Revision 2019 in GKN-2 zu berücksichtigen. Daraufhin wurde der Entwurf in der 177. Sitzung des RSK-Ausschusses DKW am 26.09.2019 [11] überarbeitet und erneut an die RSK übergeben. Die RSK beriet und verabschiedete die Empfehlung in ihrer 512. Sitzung am 22./23.10.2019.

## 3 Sachverhalt

In der 166. Sitzung des RSK-Ausschusses DKW am 12.10.2017 berichtete ein Ausschussmitglied zu Wirbelstrombefunden an DE-Heizrohren in der Anlage GKN-2 [3]. Bei der Revision im September 2017 wurden in GKN-2 u. a. entsprechend KTA 3201.4 [12] und dem vorhandenen WKP-Konzept Heizrohre aus zwei DE per Wirbelstrom geprüft. Dabei wurden in einem DE Anzeigen festgestellt, die auf volumetrische (punktförmig muldenartig) Schädigungen überwiegend nahe oberhalb des Rohrbodens hinwiesen. Bei der anschließenden 100 %-Prüfung der DE-Heizrohre auf der Austrittseite dieses DE (kalte Seite) zeigten sich insgesamt 31<sup>1</sup> betroffene Heizrohre. Die Tiefenausdehnung der Anzeigen reichte von ca. 15 % bis ca. 60 % Wanddicke, ausgehend von der Außenseite der Heizrohre, an denen sekundärseitige Wasserbedingungen herrschen. 13 der betroffenen Heizrohre wurden 2007 bzw. 2012 bereits geprüft und hatten zu der Zeit keinen Befund und waren nicht auffällig. Seit 2012 wurden mehrfach nicht lokalisierbare minimale Kondensatorleckagen detektiert, die einen Einfluss auf diese Schädigungen haben könnten. Der vom VGB in

---

<sup>1</sup> Bei Nachbetrachtungen wurde die Zahl der befundbehafteten Rohre auf 32 korrigiert.

---

der Richtlinie für das Wasser in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren (VGB R 401 J) vorgegebene Action Level 1 hinsichtlich der sekundärseitigen Wasserchemie wurde nicht erreicht und im anderen geprüften DE wurden keine Anzeigen an Heizrohren gefunden.

In der Revision 2017 wurden 13 Rohrpositionen mit bewertungspflichtigen Anzeigen sowie eine Rohrposition mit einer registrierpflichtigen Anzeige mittels Walzstopfen (Dichtstopfen) verschlossen. Zwei Rohre mit bewertungspflichtigen Anzeigen (mit jeweils mehr als 30 % Wanddickenschwächung) wurden nicht verschlossen, um Erkenntnisse über die Kinetik des zugrundeliegenden Schädigungsmechanismus zu erlangen. Zur Ursachenklärung wurde vom Betreiber der Hersteller mit eingebunden.

In der Revision 2018 wurden vor dem Hintergrund der Befunde im Jahr 2017 Wirbelstromprüfungen an allen vier DE der Anlage durchgeführt. Dabei wurden neue Anzeigen an Dampferzeugerheizrohren festgestellt. Entsprechend der Darstellung in der WLN 2018/06 der GRS [9] wurden zusätzlich zu den aus der Revision 2017 bekannten 32 DE-Heizrohren 23 weitere DE-Heizrohre mit volumetrischen Anzeigen gefunden, die sich auf alle vier DE verteilten. Die neuen volumetrischen Anzeigen fügen sich hinsichtlich ihrer Lage am Heizrohr sowie ihrer Tiefenerstreckung in das aus 2017 bekannte Bild ein. Mit Ausnahme eines DE-Heizrohrs, bei dem 2018 eine Zunahme der Wanddickenschwächung um ca. 20 % festgestellt wurde, war die Veränderung der bereits 2017 gefundenen volumetrischen Anzeigen gering. Bei beiden nicht verschlossenen Rohren mit Befunden oberhalb der Bewertungsgrenze wurden keine Veränderungen festgestellt.

Im Unterschied zu 2017 wurden jedoch volumetrische Anzeigen auch auf der primärseitigen Eintrittsseite bzw. heißen Seite des DE gefunden (zwei Rohre in DE 10, ein Rohr in DE 20). Darüber hinaus wurden erstmals lineare, in Umfangsrichtung der DE-Heizrohre orientierte Anzeigen festgestellt. Die betroffenen DE-Heizrohre weisen mehrheitlich einzelne Anzeigen und in Einzelfällen auch Mehrfachanzeigen auf. Die linearen Anzeigen werden als flächige bzw. rissartige Werkstofftrennungen interpretiert, die von der Sekundärseite ausgehen und in Umfangsrichtung verlaufen (im Folgenden kurz als „Umfangsanzeigen“ bezeichnet). Von Umfangsanzeigen sind DE 20 (99 Rohre) und DE 40 (zwei Rohre) betroffen. Die Umfangsanzeigen befinden sich ausschließlich auf der primärseitigen Eintrittsseite der beiden DE und im Unterschied zu den punktförmigen Anzeigen im Bereich von ca. -2 mm bis ca. +7 mm bezogen auf die obere Einwalzkante der DE-Heizrohre und damit nahe der Oberkante des Rohrbodens. Die Tiefenerstreckung ist über die Länge der Anzeigen sehr ungleichmäßig und erreicht an einem DE-Heizrohr lokal einen maximalen Wert von 91 % der Wanddicke.

Sämtliche betroffene DE-Heizrohre sind aus dem Werkstoff Alloy 800 mod. gefertigt, haben einen äußeren Durchmesser von 22 mm und eine Wanddicke von 1,2 mm. Die DE-Heizrohre wurden vor dem Einbau mit Glasperlen gestrahlt, wodurch im Oberflächenbereich Druckspannungen eingebracht werden, um dem Schädigungsmechanismus „Spannungsrisskorrosion“, für den Zugspannungen erforderlich sind, vorzubeugen.

Zur Ursachenklärung verweist die GRS in [9] auf Untersuchungen von Hersteller und Betreiber. Demnach sind nachfolgende primäre Schadensursachen für die Schädigungen verantwortlich:

- Ein großer Eintrag von Eisenoxid in die DE und dessen Ablagerung in den Strömungstotzonen. Seit 2010 wurde verstärkt Eisenoxid aus dem Wasserabscheider-Zwischenüberhitzer (WAZÜ) in die

---

DE eingetragen. Ursächlich für den Eisenoxideintrag war demnach die seit der Revision 2010 in Betrieb genommene Sauerstoffdosierung in den Heizdampf des WAZÜ. Die in die DE eingetragenen Eisenoxide konnten sich in Strömungstotzonen auf den Rohrböden ablagern und mit der Zeit harte Ablagerungen bilden. Auf diesen konnten sich wiederum weitere Korrosionsprodukte, Fremdstoffe und Verunreinigungen in lockerer Form ablagern (weiche Ablagerungen). Tatsächlich wurden bei der mechanischen Rohrbodenreinigung in der Revision 2018 deutlich größere Massen an Korrosionsprodukten ausgetragen als bei der letzten Rohrbodenreinigung 2010. Dabei wurden im DE 20 deutlich geringere Ablagerungsmassen als in den anderen DE festgestellt. Für diese asymmetrische Belastung der DE mit Korrosionsprodukten aus dem Wasser-Dampf-Kreislauf liegt bisher nur eine Hypothese vor.

- Die Verschlechterung der wasserchemischen Parameter. Seit 2013 sind immer wieder Kleinstleckagen an verschiedenen Kammern des Kondensators aufgetreten, die nicht alle identifiziert und beseitigt werden konnten. Die Werte für die Kontrollparameter „Natrium“ und „Leitfähigkeit im Dampferzeugerwasser“ lagen seit 2016 zeitweise über den Normalbetriebswerten, aber noch deutlich unter dem Action Level 1 nach der einschlägigen VGB-Richtlinie, ab dem Maßnahmen zur raschen Identifizierung und Beseitigung der Ursache für die Abweichung ohne Leistungsreduzierung ergriffen werden sollen.
- Bei den Hide-Out-Return-Analysen wurden über die Jahre steigende Werte für Kalzium und Sulfat sowie leicht erhöhte Werte für Chlorid gemessen. Zudem wurden vergleichsweise hohe Werte für Kupfer festgestellt. Die Verunreinigungen konnten sich in den Spalten zwischen den DE-Heizrohren und dem Rohrboden, im Übergangsbereich zwischen harten und weichen Ablagerungen über dem Rohrboden sowie in den Belägen auf den DE-Heizrohren aufkonzentrieren, wodurch sich lokal stark saure Bedingungen ausbilden konnten, unter denen auch der Werkstoff Alloy 800 mod. korrosionsanfällig ist. Außerdem führen diese Bedingungen zu einer verstärkten Korrosion des aus dem ferritischen Werkstoff 20 MnMoNi 5 5 gefertigten Rohrbodens.

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Anlage GKN-2 und aus zerstörenden Untersuchungen an gezogenen DE-Heizrohren anderer Anlagen werden die Befunde von der Fa. Framatome gemäß der Darstellung in der Weiterleitungsnachricht [9] auf folgende Schädigungsmechanismen zurückgeführt:

- Die in der Revision 2017 und 2018 festgestellten volumetrischen Anzeigen sind auf Lochkorrosion und/oder interkristallinen Angriff (intergranular attack, IGA) unter stark sauren Bedingungen, verursacht durch den Eintrag von Sulfat und Chlorid in den DE und deren Aufkonzentration im Übergangsbereich zwischen harten und weichen Ablagerungen bzw. in den Belägen auf den Heizrohren, zurückzuführen.
- Die in der Revision 2018 festgestellten umfangsorientierten Anzeigen sind auf interkristalline Spannungsrisskorrosion unter stark sauren Bedingungen in Bereichen mit axialen Zugspannungen an der Rohraußenoberfläche zurückzuführen. Axiale Zugspannungen liegen im Einflussbereich der Einwalzung vor, bei dem die Wirkung des Glasperlenstrahlens durch den Einwalzvorgang weitgehend aufgehoben ist. Demnach hat die gegenüber den übrigen DE geringere Höhe der Ablagerungen in DE20

---

dazu geführt, dass sich korrosiv wirkende Verunreinigungen (insbesondere Sulfat) im Spalt zwischen Rohr und Rohrboden anreichern konnten. Dies führte auch zu einer verstärkten Korrosion des Rohrbodens, wodurch die Spalttiefe zwischen Rohr und Rohrboden mit der Zeit zunahm – bei einem Teil der betroffenen DE-Heizrohre bis zur Freilegung des oberen Bereichs der oberen Einwalzung, an dem die axialen Zugspannungen besonders hoch sind. Die Bewertung der Wirbelstromdaten in GKN-2 liefert bei einigen DE-Heizrohren darüber hinaus auch Hinweise auf eine geringe Einbeulung der DE-Heizrohre durch Korrosionsprodukte des Rohrbodens („Denting“). Hierdurch könnten zusätzliche axiale Zugspannungen in das DE-Heizrohr induziert worden sein.

Entsprechend den Erkenntnissen aus dem RSK-Ausschuss DKW ist inzwischen davon auszugehen, dass bei allen von Spannungsrisskorrosion betroffenen DE-Heizrohren der obere Bereich der oberen Einwalzung freigelegt wurde.

In der 177. Sitzung des RSK-Ausschusses DKW berichteten der Betreiber und der Sachverständige über die Befunde an den Dampferzeugern in GKN-2 in der Revision 2019 [13]. Demnach wurden im Vorfeld der Revision vom Anlagenhersteller neue Erkenntnisse aus der Nachauswertung der bereits vorliegenden Prüfergebnisse aus GKN-2 und aus den in einer anderen deutschen Anlage ermittelten Prüfergebnissen an den Betreiber übermittelt. Im Rahmen der Nachauswertung der Inspektionsdaten aus 2018 und als Reaktion auf die WLN 2018/06 „Anzeigen bei Wirbelstromprüfungen von Dampferzeugerheizrohren“ konnte gezeigt werden, dass mit der Wirbelstrom-Rotiersonde (MRPC, motorized rotating pancake coil) eine wesentlich höhere Nachweiswahrscheinlichkeit erreicht werden kann als mit der Kombination von Array-Sonde (X-Probe) und Innendurchlaufspule (Bobbin Coil), wenn ein hoher Störpegel im Spaltbereich zwischen oberer DE-Einwalzung und Rohrbodenoberkante vorliegt. Störpegel werden nach Aussage des Sachverständigen insbesondere durch korrosionsbedingte Veränderungen der Bedingungen im Spalt (geometrische Änderungen, Ablagerungen) zwischen DE-Heizrohr und Rohrboden verursacht.

In Folge dieser neuen Erkenntnisse wurde die Prüf- und Auswertestrategie für die anstehende Revision geändert. In der Revision 2019 wurden dann bei erneuten Prüfungen der Heizrohre mittels Wirbelstromprüfung in allen vier Dampferzeugern volumetrische Anzeigen und Umfangsanzeigen gefunden. Von den Rohren mit volumetrischen Anzeigen wurden 20 verschlossen, davon vier im DE10 und 16 im DE20. Umfangsanzeigen an 191 Rohren wurden in allen vier DE auf der primärseitigen Eintrittsseite detektiert, dabei die überwiegende Anzahl (147) in DE20. Die Auswertungen der Wirbelstromprüfungen ergaben, dass in etwa die Hälfte der Umfangsanzeigen bereits 2018 vorhanden waren, allerdings bei der Auswertung in der Revision 2018 nicht erkannt wurden. Ein Teil der 2019 aufgefundenen Anzeigen wurde nur mit der Wirbelstrom-Rotiersonde erkannt, nicht bei der Prüfung mit der Kombination von Array-Sonde und Innendurchlaufspule.

Der Ausschuss DKW konnte die Darstellungen von Betreiber und Sachverständigen nachvollziehen. Die 2019 erkannten Befunde stehen im Einklang mit der im Jahr 2018 entwickelten Schadenshypothese. Die Erkennung der neuen Befunde im Jahr 2019 ist zum einen auf die verbesserte Auswertung und die Erweiterung des Prüfungsumfanges der mit der MRPC-Sonde geprüften DE-Heizrohre zurückzuführen, zum anderen aus einem weiterhin aktiven korrosiven Potenzial in den Dampferzeugern des GKN-2. Mit den verschiedenen durchgeführten Spülbehandlungen und der Beseitigung der Kondensatorleckagen konnten die wasserchemischen Bedingungen in den Dampferzeugern verbessert werden, wie sich aus den Analysedaten

---

der wasserchemischen Untersuchungen während des Betriebszyklus 2018 - 2019 und während der Revision 2019 zeigt. Auch belegt die insgesamt geringere Anzahl an neuen Anzeigen die Wirksamkeit dieser Maßnahmen. Es konnten jedoch nicht alle korrosiv wirkenden Verunreinigungen aus den Spalten und den Ablagerungen entfernt werden.

Der RSK liegen keine weiteren Erkenntnisse zur Schadensursache vor. Sie geht in der folgenden Empfehlung daher von der dargestellten Ursachenhypothese aus.

#### **4 Sicherheitstechnische Bedeutung**

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 DE-Heizrohrschäden können Systeme der Sicherheitsebene 2 oder Systeme zur Störfallbeherrschung (Sicherheitsebene 3) angefordert werden. Gleichzeitiges Versagen von mehreren DE-Heizrohren (>2F Bruch) wird in der Auslegung nicht unterstellt.

In allen in Betrieb befindlichen deutschen Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor(DWR)-Anlagen sind DE-Heizrohre aus dem Werkstoff Alloy 800 mod. eingesetzt. Das Auftreten von Lochkorrosion/interkristallinem Angriff und Spannungsrisskorrosion an diesen Heizrohren in den Bereichen der Einwalzungen im Rohrboden, zwischen Rohrboden und erstem Abstandhalter sowie der Abstandhaltergitter stellen Schädigungsmechanismen dar, die bisher nur unter sehr ungünstigen wasserchemischen Bedingungen unterstellt wurden.

#### **5 Bewertungsmaßstab**

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an DE-Heizrohre ergeben sich aus ihren Funktionen Wärmeabfuhr aus dem Primärkreislauf und Barriere zum Einschluss radioaktiver Stoffe als Bestandteil der DFU. Nach den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke (SiAnf) [14], Abschnitt 3.4 (1) muss die DFU so beschaffen, angeordnet sein und betrieben werden, dass das Auftreten von rasch fortschreitenden Rissen und von spröden Brüchen nicht zu unterstellen ist. Entsprechend sind Abrisse von DE-Heizrohren zu verhindern. In diesem Sinne sind Betriebsweisen zu vermeiden, die zu Spannungsrisskorrosion an den DE-Heizrohren führen können. Von den Anforderungen der SiAnf an die Basissicherheit (siehe SiAnf, Ziffer 3.4 (3)) und an Komponenten kleiner Nennweiten (siehe SiAnf, Interpretation 2, Abschnitt 4.1) sind die DE-Heizrohre jedoch ausgenommen. Im Übrigen gelten die allgemeinen technischen Anforderungen nach SiAnf, Abschnitt 3.1, insbesondere an die vollständige Prüfbarkeit entsprechend Ziffer 3.1 (12).

Nach SiAnf, Anhang 2, ist das Versagen eines DE-Heizrohrs mit einer Leckrate oberhalb der betrieblich zulässigen bis zum maximalen Leckquerschnitt 2F eines DE-Heizrohrs als Auslegungsstörfall zu behandeln. Im Alterungsmanagement nach KTA 1403 [15] sind die DE-Heizrohre der Gruppe M2 zuzuordnen, für die

---

eine vorbeugende Instandhaltung vorzunehmen ist. Dadurch ist ein alterungsbedingter Ausfall aufgrund systematischer Fehler zu verhindern. Auch hieraus ergibt sich die Forderung, Betriebsbedingungen zu vermeiden, die zu Spannungsrisskorrosion an den DE-Heizrohren führen können. Wenn es dennoch zu Schädigungen an DE-Heizrohren kommt, müssen diese durch geeignete zerstörungsfreie Prüfmethode so rechtzeitig erkannt werden, dass kein Versagen von DE-Heizrohren bis zum Zeitpunkt der nächsten Prüfung zu unterstellen ist. Als Versagen ist eine DE-Heizrohrleckage anzusehen, die größer als die betrieblich zulässige Leckage ist. Dabei sind die bisher bekannt gewordenen Schädigungsmechanismen an DE-Heizrohren zu berücksichtigen. Für die Prognose zur Integrität der DE-Heizrohre spielen die zerstörungsfreien Prüfungen eine wichtige Rolle.

## 6 Beratungsergebnisse

Aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse kommt die RSK zu den im Folgenden beschriebenen Ergebnissen:

In den Jahren 2005 und 2007 [1] waren bei älteren deutschen Kernkraftwerken rissartige Anzeigen infolge von Spannungsrisskorrosion festgestellt worden. Daraufhin wurden die beiden oben erwähnten RSK-Stellungnahmen entwickelt. Die Empfehlungen aus den RSK-Stellungnahmen sind aufgrund des neuen Kenntnisstands zu ergänzen.

Zur Gewährleistung der Integrität der DE-Heizrohre in den deutschen Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor sind zusätzliche Vorkehrungen zu treffen, um für den Betrieb die Einhaltung der Anforderung der SiAnf, Abschnitt 3.4 (1) zu gewährleisten, wonach die DfU so betrieben werden muss, dass das Auftreten von rasch fortschreitenden Rissen nicht zu unterstellen ist.

Vorrangig sind dafür Betriebsbedingungen zu vermeiden, die zu korrosiven Bedingungen und damit in Bezug auf das Medium zur Voraussetzung für das Auftreten von Spannungsrisskorrosion an den DE-Heizrohren führen können. Das Ereignis in GKN-2 hat gezeigt, dass die bisherigen Vorgaben im Betriebsreglement der Anlage, aber auch die Anforderungen der VGB-Richtlinie zur Wasserchemie im Sekundärkreis diesbezüglich nicht ausreichen. Bei längeren Einträgen auch von geringen Mengen ionaler Verunreinigungen wie Sulfaten oder Chloriden können sich im Bereich der Ablagerungen auf dem Rohrboden der DE durch Aufkonzentration lokal Bedingungen einstellen, unter denen die DE-Heizrohre anfällig für Korrosion sind.

Die in der Richtlinie für das Wasser in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren R 401 J des VGB PowerTech definierten Kontrollparameter für den Dauerbetrieb betrachten derartige geringe längerfristige Einträge, wie sie bspw. bei Kleinstleckagen an der Berohrung des Hauptkondensators auftreten können, nicht hinreichend. Korrosive Bedingungen für die DE-Heizrohre durch Aufkonzentration können insbesondere auch dann auftreten, wenn die Werte für die Kontrollparameter „Natrium“ und „Leitfähigkeit hinter stark saurem Kationenaustauscher“ im DE-Wasser in der DE-Abschlammung für den Dauerbetrieb noch deutlich unter den Aktionsschwellenwerten liegen. Durch die Einführung von integralen Kontrollparametern wie der „integralen Leitfähigkeit hinter stark saurem Kationenaustauscher“ bzw. der „integralen Natrium-Konzentration“ im DE-Wasser für den Dauerbetrieb kann die pro Betriebszyklus eingetragene Menge an ionalen Verunreinigungen begrenzt werden. Es sollten Aktionsbereiche definiert werden, die mit korrespondierenden Maßnahmen zur

---

Minimierung der integralen ionalen Belastung der DE verknüpft sind. Die Lage dieser Aktionsbereiche sollte unter Berücksichtigung der jüngsten Betriebserfahrung festgelegt werden.

Es sind daher entsprechende Anforderungen in das Betriebsreglement unter Berücksichtigung der aktuellen Erkenntnisse aufzunehmen. Zudem sollte die VGB-Richtlinie entsprechend aktualisiert werden. [E-1]

Wie zuvor dargelegt, können Kondensatorleckagen durch den Eintrag von Verunreinigungen zu korrosiven Bedingungen im Sekundärkreis führen. Häufige Kondensatorleckagen und ein längerer Betrieb mit Kondensatorleckagen sollten deshalb vermieden werden. Die RSK empfiehlt daher, wenn Kondensatorleckagen erkannt werden, frühzeitig Maßnahmen zu ihrer Beseitigung zu treffen. Es sollten zudem vorbeugende Maßnahmen gegen Kondensatorleckagen getroffen werden, wie regelmäßige Prüfungen und das Verstopfen von Kondensatorrohren in häufig von Leckagen betroffenen Bereichen. [E-2]

Hide-Out-Return-Analysen können Hinweise auf die Anreicherung von korrosiv wirkenden Verunreinigungen im Rohrbodenbereich der DE geben. Sie ermöglichen einen Überblick über die Belastung der DE mit gelösten Verunreinigungen. Darauf wurde bereits in den beiden früheren RSK-Stellungnahmen [1] und [2] eingegangen. In Fortschreibung dieser Stellungnahmen empfiehlt die RSK, für eine Trendbewertung der Gefährdung durch Spannungsrisskorrosion Hide-Out-Return-Analysen durchzuführen. Zusätzlich ist die Beprobung von DE-Wasser (Entleerungsproben) sinnvoll, wenn DE für die Revision entleert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es nicht nur zu interkristalliner Spannungsrisskorrosion bei sauren Bedingungen, sondern auch – wie die Ergebnisse von Laboruntersuchungen zeigen [16] – zu transkristalliner Spannungsrisskorrosion bei alkalischen Bedingungen kommen kann. Bei Auffälligkeiten der sekundärseitigen wasserchemischen Bedingungen sind zusätzlich Daten über den Eintrag von Verunreinigungen in die DE sowie über deren Austrag durch die DE-Abschlammung zu erfassen und zu bewerten. Bei Auffälligkeiten hinsichtlich der bei HOR-Analysen oder Entleerungsproben festgestellten Ionengehalte sind auch Berechnungen der pH(T)-Werte, d. h. der pH-Werte bei Betriebstemperatur, durchzuführen. [E-3]

Die RSK empfiehlt, bei Hinweisen auf korrosive Bedingungen an den DE-Heizrohren die DE nach dem Abfahren zu entleeren und ein zielgerichtetes Spülprogramm durchzuführen, um die Bedingungen in den Spalten und Belägen möglichst weitgehend zu neutralisieren. Dabei sind Wasserproben zur Analyse zu entnehmen, um die Wirksamkeit des Spülprogramms zu überwachen. [E-4]

Im GKN-2 hat der Eintrag von Eisenoxid zu erheblichen Ablagerungen auf dem DE-Rohrboden im Bereich der Strömungstotzonen geführt. Es ist davon auszugehen, u. a. aufgrund der Ergebnisse der Hide-Out-Return-Analysen, dass sich in den Ablagerungen die infolge der Kondensatorleckagen eingetragenen Verunreinigungen aufkonzentrieren konnten und zu Lochkorrosion/IGA geführt haben. Vor diesem Hintergrund sind übermäßige Ablagerungen zu vermeiden. Sofern es dennoch dazu gekommen ist, sollten Ablagerungen auf dem DE-Rohrboden mit geeigneten Verfahren beseitigt werden. [E-5]

Entsprechend den Anforderungen der KTA 1403 [15] ist der Schadensmechanismus Spannungsrisskorrosion an den DE-Heizrohren bei den zerstörungsfreien Prüfungen zu berücksichtigen. Das WKP-Konzept muss dazu geeignet sein, derartige Schädigungen rechtzeitig zu erkennen, um die Integrität der DE-Heizrohre zumindest für einen Prüfzyklus prognostizieren zu können.

---

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 entsprechen der Praxis in den Anlagen nach 2010. Die Prüfergebnisse aus der Revision 2019 in GKN-2 haben gezeigt, dass im Bereich zwischen oberer Rohreinwalzung und Rohrbodenoberkante, insbesondere wenn korrosionsbedingte Veränderungen der Bedingungen im Spalt zwischen Rohrboden und DE-Heizrohr vorliegen, Störsignale die sichere Erkennung von Rissen durch die Array-Sonde beeinträchtigen können. Vor diesem Hintergrund sind bei Dampferzeuger-Heizrohren, bei denen unter Verwendung der Array-Sonde aufgrund vorhandener Störsignale keine eindeutige Fehlererkennung stattfinden kann, zusätzliche Prüfungen mit der Wirbelstrom-Rotiersonde (MRPC, motorized rotating pancake coil) vorzusehen. [E-6]

Die Betriebserfahrung mit axialen und umfangsorientierten Anzeigen an DE- Heizrohren aus Alloy 800 mod., die auf interkristalline Spannungsrisskorrosion zurückgeführt werden, zeigt einen unterschiedlich schnellen Rissfortschritt. In einigen Fällen wurden „Schnellläufer“ mit hohen Wachstumsraten der Wanddickenschwächung festgestellt [16]. Aus den in [16] aufgeführten Daten ergäben sich bei Annahme einer konstanten Wachstumsgeschwindigkeit Wanddickenschwächungen von mehr als 20 bis zu ca. 40 % pro Jahr. Aufgrund der beschränkten Betriebserfahrung und der nicht als konstant anzunehmenden Rissfortschrittsgeschwindigkeit lässt sich jedoch aus Sicht der RSK eine maximale Rissfortschrittsgeschwindigkeit aus den Daten der zerstörungsfreien Prüfungen nicht sicher ableiten. Zudem ist beim Schadensmechanismus Spannungsrisskorrosion grundsätzlich ein schneller Rissfortschritt möglich.

Vor diesem Hintergrund kann nicht ausgeschlossen werden, dass es bei dem Schädigungsmechanismus Spannungsrisskorrosion innerhalb eines Betriebszyklus zu lokal wanddurchdringenden Rissen kommen kann. Um sicherzustellen, dass ein lokaler wanddurchdringender Riss im Betrieb erkannt wird, empfiehlt die RSK die Ermittlung der Rissöffnungsflächen und der daraus resultierenden Leckagen bei wanddurchdringenden lokalen Rissen unterhalb der kritischen Risslänge, bei der ein Abriss des Heizrohres nicht mehr sicher ausgeschlossen werden kann. Im Betriebsreglement sind Festlegungen zu treffen, durch die sichergestellt ist, dass Heizrohrleckagen vor Erreichen einer kritischen Risslänge mit Sicherheit erkannt werden und in diesem Fall die Anlage unverzüglich abgefahren wird. Dabei sind auch Unsicherheiten in der Ermittlung der Leckagerate zu berücksichtigen. [E-7]

Aus den Erkenntnissen aus GKN-2 lässt sich ableiten, dass vorlaufend zu den Rissanzeigen an den DE-Heizrohren Korrosion am DE-Rohrboden auftrat. Durch die Korrosion des Rohrbodens wurden in GKN-2 Bereiche der DE-Heizrohre freigelegt, in denen infolge der Verformungen beim Einwalzen Zugspannungen an der Heizrohräußenseite vorhanden sind. Damit waren auf der heißen Seite des betroffenen DE alle Bedingungen für Spannungsrisskorrosion gegeben: ausreichend hohe Temperaturen, Zugspannungen und ein korrosives Medium. Daher empfiehlt die RSK als ein Element des Maßnahmenpakets zur Verhinderung von Schäden an den DE-Heizrohren durch Spannungsrisskorrosion, die Ergebnisse der letzten und von künftigen zerstörungsfreien Prüfungen der DE-Heizrohre auf Veränderungen der Spalttiefe zwischen den DE-Heizrohren und dem Rohrboden auszuwerten. Dabei sollte auch geprüft werden, ob Hinweise auf ein Einbeulen (Denting) vorliegen. [E-8]

---

Wenn in einem Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor bei den wiederkehrenden Prüfungen an DE-Heizrohren Anzeigen auftreten, die Hinweise auf die betrieblichen Schädigungsmechanismen Lochkorrosion, IGA, Spannungsrisskorrosion oder Rohrbodenkorrosion geben, wird empfohlen, wie folgt vorzugehen:

- In den Beratungen im RSK-Ausschuss DKW wurde dargelegt, dass es bereits in der Vergangenheit an Dampferzeugern mit sekundärseitigen wasserchemischen Bedingungen, die ähnlich zu denen der deutschen DWR sind, korrosionsbedingte Schäden wie Lochkorrosion und Spannungsrisskorrosion gegeben hat. Eine Darstellung dazu findet sich beispielsweise in „Steam Generators for Nuclear Power Plants“, 2017 [17]. Rückblickend kann man die volumetrischen Befunde in GKN-2 in der Revision 2017 in das Muster der Schäden einordnen, die durch korrosionsbedingte Schädigungsmechanismen verursacht wurden. Vor diesem Hintergrund empfiehlt die RSK, bei Anzeigen, die Hinweise auf korrosionsbedingte Schädigungsmechanismen liefern, zu bewerten, wie sich die festgestellten Anzeigen in die bekannten sekundärseitigen Korrosionsmechanismen einordnen.
- 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, Anzeigencharakteristika und die chemischen Bedingungen in den befundbehafteten Bereichen mit denen in anderen Anlagen mit nachgewiesenen Schäden durch Lochkorrosion, IGA oder Spannungsrisskorrosion zu vergleichen. Im Zweifelsfall sind bei linearen Anzeigen Heizrohrabschnitte mit Befundanzeigen zwecks Schadensuntersuchung herauszutrennen. Bei der Bewertung des Erfordernisses eines Heizrohrziehens sind die Kenntnisse zum Schadensmechanismus, zum möglichen Schadensfortschritt und den möglichen Auswirkungen zu berücksichtigen.
- An allen DE sind die entsprechend der Befundlage kritischen Abschnitte der Heizrohre in den potenziell betroffenen Bereichen der DE zu prüfen.
- An den DE-Heizrohren, an denen Spannungsrisskorrosion festgestellt wird, sind die Fehlerabmessungen (Länge, Tiefe) und deren Orientierung (axial, in Umfangsrichtung verlaufend) zu bestimmen.
- Von Spannungsrisskorrosion betroffene Heizrohre müssen verschlossen werden. Wenn Häufungen von Rissbefunden an Heizrohren mit korrosionsbedingten Veränderungen des Spalts im Einwalzbereich im DE-Rohrboden korreliert werden können, sollte geprüft werden, ob zusätzlich Heizrohre ohne Rissbefunde an Positionen mit Rohrbodenkorrosion vorsorglich zu verschließen sind.
- Bei umfangsorientierten Rissbefunden sind die zu verschließenden Heizrohre zusätzlich so zu stabilisieren, dass auch bei einem vollständigen Abriss Folgeschäden vermieden werden.
- Geeignete Maßnahmen zur Beseitigung der korrosiven Bedingungen sind zu ergreifen.

- 
- 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 eine neue Bewertung durchzuführen. [E-9]

Diese Empfehlung schreibt die entsprechenden Empfehlungen aus [1] fort und ersetzt sie.

Um der RSK eine Verfolgung der Umsetzung der Empfehlungen und der weiteren Entwicklung zu ermöglichen, wird der VGB gebeten, zu gegebener Zeit zu folgenden Themen vorzutragen:

- Umsetzung der WLN [9] in den Anlagen,
- Überwachung des DE-Zustands in den Anlagen,
- Entwicklung der VGB-Richtlinie Wasserchemie.

## 7 Empfehlungen

**Empfehlung 1:** Vorrangig sind Betriebsbedingungen zu vermeiden, die zu korrosiven Bedingungen und damit in Bezug auf das Medium zur Voraussetzung für das Auftreten von Spannungsrisskorrosion an den DE-Heizrohren führen können. Es sind daher entsprechende Anforderungen unter Berücksichtigung der aktuellen Erkenntnisse in das Betriebsreglement aufzunehmen. Zudem sollte die VGB-Richtlinie VGB R 401 J (DWR) entsprechend aktualisiert werden.

**Empfehlung 2:** Treten in einer Anlage wiederholt Kondensatorleckagen auf, so wird empfohlen, neben der frühzeitigen Beseitigung von Leckagen auch vorbeugende Maßnahmen zu treffen, um langfristige Abweichungen der wasserchemischen Bedingungen von den Normalbetriebswerten zu vermeiden. Hierzu gehören regelmäßige Prüfungen und vorbeugendes Verstopfen von Kondensatorrohren in häufig von Leckagen betroffenen Bereichen.

**Empfehlung 3:** Zu einer Trendbewertung einer Gefährdung durch Spannungsrisskorrosion wird empfohlen, Hide-Out-Return-Analysen durchzuführen. Zusätzlich ist die Beprobung von DE-Wasser (Entleerungsproben) sinnvoll, wenn DE für die Revision entleert werden. Diese ermöglichen einen allgemeinen Überblick über die Belastung von DE durch gelöste Verunreinigungen. Werden anlagenspezifische Auffälligkeiten der wasserchemischen Verhältnisse festgestellt, sind zusätzlich Daten über den Eintrag von Verunreinigungen sowie über deren Austrag durch die DE-Abschlammung zu erfassen und zu bewerten. Bei Auffälligkeiten hinsichtlich der bei HOR-Analysen oder Entleerungsproben festgestellten Ionengehalte sind auch Berechnungen der pH(T)-Werte, d. h. der pH-Werte bei Betriebstemperatur, durchzuführen..

**Empfehlung 4:** Bei Hinweisen auf eine Gefährdung der DE-Heizrohre durch sekundärseitige Korrosionsmechanismen, dabei insbesondere Spannungsrisskorrosion, wird empfohlen, die DE nach dem Abfahren zu entleeren und ein zielgerichtetes Spülprogramm durchzuführen, um die Bedingungen in den

---

Spalten und Belägen möglichst weitgehend zu neutralisieren. Dabei sind ebenfalls Wasserproben zur Analyse zu entnehmen, um die Wirksamkeit des Spülprogramms zu überwachen.

**Empfehlung 5:** Übermäßige Ablagerungen sind zu vermeiden. Zur Entfernung von Ablagerungen auf dem Rohrboden ist ein geeignetes Verfahren zu wählen.

**Empfehlung 6:** Bei der Prüfung von Dampferzeuger-Heizrohren, bei denen unter Verwendung der Array-Sonde aufgrund vorhandener Störsignale im Spaltbereich zwischen DE-Heizrohr und Rohrboden keine eindeutige Fehlererkennung stattfinden kann, sind im Spaltbereich zusätzliche Prüfungen mit der Wirbelstrom-Rotiersonde (MRPC, motorized rotating pancake coil) vorzusehen.

**Empfehlung 7:** Um sicherzustellen, dass ein lokaler wanddurchdringender Riss im Betrieb erkannt wird, wird die Ermittlung der Rissöffnungsflächen und der daraus resultierenden Leckagen bei wanddurchdringenden lokalen Rissen unterhalb der kritischen Risslänge empfohlen. Im Betriebsreglement sind Festlegungen zu treffen, durch die sichergestellt ist, dass Heizrohrleckagen vor Erreichen einer kritischen Risslänge mit Sicherheit erkannt werden und in diesem Fall die Anlage unverzüglich abgefahren wird. Dabei sind auch Unsicherheiten in der Ermittlung der Leckagerate zu berücksichtigen.

**Empfehlung 8:** Zum frühzeitigen Erkennen von korrosiven Bedingungen in den DE sind die Ergebnisse der letzten und künftiger zerstörungsfreier Prüfungen der DE-Heizrohre im Hinblick auf Veränderungen der Spalttiefe zwischen den DE-Heizrohren und dem Rohrboden oberhalb der oberen Einwalzung und auf ein Einbeulen (Denting) auszuwerten.

**Empfehlung 9:** Wenn in einem Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor bei den wiederkehrenden Prüfungen an DE- Heizrohren Anzeigen auftreten, die Hinweise auf die betrieblichen Schädigungsmechanismen Lochkorrosion, interkristalliner Angriff (intergranular Attack (IGA)), Spannungsrisskorrosion oder Rohrbodenkorrosion geben, wird empfohlen, wie folgt vorzugehen:

- a) Es ist zu bewerten, wie sich die festgestellten Anzeigen in die bekannten sekundärseitigen Korrosionsmechanismen bei DE einordnen.
- b) 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, Anzeigencharakteristika und die chemischen Bedingungen in den befundbehafteten Bereichen mit denen in anderen Anlagen mit nachgewiesenen Schäden durch Lochkorrosion, IGA oder Spannungsrisskorrosion zu vergleichen. Im Zweifelsfall sind bei linearen Anzeigen Heizrohrabschnitte mit Befundanzeigen zwecks Schadensuntersuchung herauszutrennen. Bei der Bewertung des Erfordernisses eines Heizrohrziehens sind die Kenntnisse zum Schadenmechanismus, zum möglichen Schadensfortschritt und den möglichen Auswirkungen zu berücksichtigen.

- 
- c) An allen DE sind die entsprechend der Befundlage kritischen Abschnitte der Heizrohre in den potenziell betroffenen Bereichen der DE zu prüfen.
  - d) An den DE-Heizrohren, an denen Spannungsrisskorrosion festgestellt wird, sind die Fehlerabmessungen (Länge, Tiefe) und deren Orientierung (axial, in Umfangsrichtung verlaufend) zu bestimmen.
  - e) Von Spannungsrisskorrosion betroffene Heizrohre müssen verschlossen werden. Wenn Häufungen von Rissbefunden an Heizrohren mit korrosionsbedingten Veränderungen des Spalts im Einwalzbereich im DE-Rohrboden korreliert werden können, sollte geprüft werden, ob zusätzlich Heizrohre ohne Rissbefunde an Positionen mit Rohrbodenkorrosion vorsorglich zu verschließen sind.
  - f) Bei umfangsorientierten Rissbefunden sind die zu verschließenden Heizrohre zusätzlich so zu stabilisieren, dass auch bei einem vollständigen Abriss Folgeschäden vermieden werden.
  - g) Geeignete Maßnahmen zur Beseitigung der korrosiven Bedingungen sind zu ergreifen.
  - h) Nach dem erstmaligen Auftreten eines solchen Befundes muss beim nächsten Brennelement(BE)-Wechsel die Prüfung wiederholt werden.
  - i) Wenn bei der erneuten Prüfung weiterhin gleichartige Befunde auftreten, ist eine neue Bewertung durchzuführen.

---

## 8 Quellen

- [1] Schäden an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren durch Spannungsrisskorrosion – Ursache und Nachweis  
RSK-Stellungnahme aus der 428. Sitzung vom 15.07.2010
- [2] Zu unterstellende Leckagen an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren – Mehrfachrohrbruch/Lecköffnung wanddickengeschwächter DE-Heizrohre  
RSK-Stellungnahme aus der 447. Sitzung vom 03.05.2012
- [3] RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit  
Ergebnisprotokoll der 166. DKW-Sitzung am 12.10.2017
- [4] RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit  
Ergebnisprotokoll der 171. DKW-Sitzung am 28.06.2018
- [5] RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit  
Ergebnisprotokoll der 172. DKW-Sitzung am 05.11.2018
- [6] RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit  
Ergebnisprotokoll der 173. DKW-Sitzung am 22.11.2018
- [7] GRS  
Auswertung der Länderumfrage des BMU  
ME 04/2018 „Lineare Anzeigen bei WS-Prüfung von DE-HR“ in GKN-2  
vom 05.10.2018  
Kopien der auf der 173. Sitzung des RSK-Ausschusses DKW am 22.11.2018  
gezeigten Folien
- [8] RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit  
Ergebnisprotokoll der 174. DKW-Sitzung am 12.12.2018

- 
- [9] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH  
Weiterleitungsnachrichten zu meldepflichtigen Ereignissen in Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland (WLN 2018/06)  
Anzeigen bei Wirbelstromprüfungen von Dampferzeugerheizrohren im Kernkraftwerk Neckarwestheim-2 (GKN-2), gemeldet am 25.09.2017 und 14.09.2018  
Köln, 04.12.2018
- [10] RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit  
Ergebnisprotokoll der 175. DKW-Sitzung am 14.02.2019
- [11] RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit  
Ergebnisprotokoll der 177. DKW-Sitzung am 26.09.2019
- [12] Sicherheitstechnische Regel des KTA  
KTA 3201.4 Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren; Teil 4:  
Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung  
Fassung 2016-11  
BAnz AT 10.03.2017 B5
- [13] EnBW  
Schäden an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren durch Spannungsrisskorrosion -  
Maßnahmen zur Sicherstellung der Integrität der Heizrohre  
Kopien der in der 177. Sitzung des RSK-Ausschusses DKW am 26.09.2019 gezeigten  
Folien
- [14] Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke  
vom 22. November 2012, Neufassung vom 3. März 2015  
BAnz AT 30.03.2015 B2
- [15] Sicherheitstechnische Regel des KTA  
KTA 1403 Alterungsmanagement in Kernkraftwerken  
Fassung 2017-11  
BAnz AT 05.02.2018 B3

- 
- [16] Framatome  
DE-Heizrohre GKN II, Schädigungsmechanismus und Übertragbarkeitsbetrachtungen  
zu bisher vorliegenden Betriebserfahrungen,  
Kopien der in der 172. Sitzung des RSK-Ausschusses DKW am 05.11.2018 gezeigten  
Folien
- [17] Steam Generators for Nuclear Power Plants, 2017,  
Elsevier Ltd., 578 Seiten, ISBN 978-0-08-100894-2