

Bewertung zu Schäden durch Spannungsrisskorrosion an Dampferzeuger-Heizrohren im KKW Neckarwestheim 2 (GKN-II)

erstellt von

Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Mertins

TH Brandenburg, vormals GRS mbH

im Auftrag von .ausgestrahlt

Köln, im Juni 2020

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Mertins, Tel: +49 (0) 172 38 47 051

info@mertins-safety.de, www.mertins-safety.de

.ausgestrahlt, www.ausgestrahlt.de

Bund der Bürgerinitiativen Mittlerer Neckar, www.bbm.de

BUND Landesverband Baden-Württemberg, www.bund-bawue.de



Inhalt

1	Schäden an den Dampferzeugern im KKW GKN-II – Stand und sicherheitstechnische Bedeutung	3
1.1	Sachverhalt	3
1.2	Dampferzeuger und Frischdampfarmaturen	9
1.3	Bedeutung intakter DE-Heizrohre	10
1.4	Besondere Bedeutung der Spannungsrissskorrosion unter Sicherheitsaspekten	11
1.5	Auslegungsstörfall und auslegungsüberschreitender Störfall	12
1.6	Folgen von Lecks an den Dampferzeuger-Heizrohren	13
1.7	Gestaffeltes Sicherheitskonzept („Defence-in-Depth-Concept“)	14
1.8	Anforderungen des kerntechnischen Regelwerks hinsichtlich der druckführenden Umschließung des Primärkühlmittels	17
1.9	Sicht der Reaktorsicherheitskommission	21
2	Ergebnisse aus BMU-Forschungsvorhaben zu Schäden an DE-Heizrohren	26
2.1	Bewertung des Potenzials für unentdeckten Schadensfortschritt an druckführenden Komponenten – BMU-Forschungsvorhaben 3607R02583	26
2.2	Schädigungsmechanische Modellierung des Resttragvermögens von geschädigten Dampferzeugerheizrohren – BMU-Forschungsvorhaben 3610R01385	28
3	Zusammenfassung der Bewertung	30
4	Verzeichnis der Quellen	33
5	Anhang: Energieerzeugung und Energieübertragung in einem Atomkraftwerk	36

1 Schäden an den Dampferzeugern im KKW GKN-II – Stand und sicherheitstechnische Bedeutung

1.1 Sachverhalt

Das Kernkraftwerk Neckarwestheim-2 (GKN-II) ging am 9. November 1982 in Bau und nahm am 15. April 1989 seinen kommerziellen Leistungsbetrieb auf. In der Revision 2018 wurden mit Wirbelstromprüfungen erstmals lineare, umfangsorientierte Anzeigen¹ in Dampferzeuger-Heizrohren festgestellt. Betroffen waren die Dampferzeuger (DE) 20 und 40 (/UM 2018/).

Die Dampferzeuger – in Neckarwestheim-2 insgesamt vier – fungieren als Wärmetauscher zwischen dem radioaktiven Primär- und dem nicht radioaktiven Sekundärkreis des Kraftwerks. Jeder Dampferzeuger enthält ca. 4.000 U-förmige, ca. 12 Meter lange dünne Heizrohre, die vom heißen und radioaktiv belasteten Primärkühlmittel durchströmt und vom sekundärseitigen, unbelasteten Speisewasser umströmt werden, das dabei verdampft. Die DE-Heizrohre sind aus dem Werkstoff Alloy 800 mod. gefertigt, haben einen äußeren Durchmesser von 22 mm und eine Wanddicke von nur 1,2 mm – die Barriere zwischen Primär- und Sekundärkreis. Ein Abriss von Dampferzeuger-Heizrohren ist ein komplizierter Kühlmittelverluststörfall, der bis zur Kernschmelze führen kann. Details zu den Dampferzeugern, den mit ihnen verbundenen Frischdampfarmaturen und den aus DE-Heizrohr-Lecks erwachsenden Gefahren siehe unten Kapitel 1.2–1.6. Weitere Informationen zu Aufbau und Funktionsweise eines KKW mit Druckwasserreaktor (DWR) siehe Anhang (Kapitel 5).

Insgesamt wurden 2018 in Neckarwestheim-2 an 101 DE-Heizrohren – 99 im DE 20 und zwei im DE 40 – lineare, umfangsorientierte Anzeigen identifiziert. Die Wanddickenschwächungen waren unterschiedlich tief (maximale lokale Wanddickenschwächung an einem Rohr 91 %, die Restwandstärke dort betrug also nur noch 0,1 mm). Die Anzeigen

¹ „Anzeigen“ bezeichnet hier bei Prüfungen der Heizrohre detektierte Wanddickenschwächungen.

befanden sich jeweils im Bereich des Rohrbodens, der die Primär- von der Sekundärseite trennt und in den die Heizrohre mechanisch eingewalzt sind, und jeweils auf der heißen Seite der DE. Heiße Seite bezeichnet hier die Seite, in der das Primärkühlmittel in die DE-Heizrohre eintritt.

Der in GKN-II verwendete DE-Heizrohrwerkstoff Alloy 800 mod. soll als weitgehend resistent gegenüber Spannungsrisskorrosion gelten. Nichtsdestotrotz wurden die in GKN-II entdeckten rissartigen Befunde 2018 auf Spannungsrisskorrosion zurückgeführt, ausgelöst durch am Rohrboden sowie in den Spalten zwischen Rohrboden und Heizrohren abgelagerte Korrosionsprodukte, durch die geeignete Bedingungen für Spannungsrisskorrosion geschaffen worden seien. Durch Reinigungsmaßnahmen und eine geänderte chemische Fahrweise im Sekundärkreislauf sollte das Auftreten von Spannungsrisskorrosion reduziert werden (/UM 2018/). Trotz dieser Gegenmaßnahmen wurden dann 2019 weitere 191 DE-Heizrohre mit rissartigen Befunden festgestellt, von denen nach Angaben des Betreibers etwa die Hälfte bei den Untersuchungen 2018 übersehen wurde und die andere Hälfte im Laufe des neunmonatigen Betriebszyklus 2018/2019 neu hinzugekommen sein soll (/UM 2019/, /RSK 2019/).

Nach /RSK 2019/ sollen folgende primäre Schadensursachen für die Schädigungen verantwortlich sein:

- Ein großer Eintrag von Eisenoxid in die DE und dessen Ablagerung in den Strömungstotzonen.
- Die Verschlechterung der wasserchemischen Parameter.
- Bei den Hide-Out-Return-Analysen² wurden über die Jahre steigende Werte für Kalzium und Sulfat sowie leicht erhöhte Werte für Chlorid gemessen.

Der Betreiber hat 2018 wie 2019 jeweils die als rissig erkannten³ Rohre durch Stopfen verschlossen und darüber hinaus ein sogenanntes „Integritätskonzept“ samt sogenann-

² 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.

tem „Leck-vor-Bruch-Nachweis“ für die DE-Heizrohre vorgelegt (/EnBW 2018/, /EnBW 2019/).

Im Rahmen dieses „Integritätskonzepts“ hat der Betreiber zum einen Grenztraglastberechnungen für geschädigte DE-Heizrohre durchgeführt (/EnBW 2019/):

Tabelle 4: Ergebnis der Grenztraglastberechnung für abdeckende Fehlerabmessungen

maximale lokale WDS	Fehlerlänge	Fehlerwinkel	Biegemoment ^{*)}	maximal ertragbarer Differenzdruck	Abzusichernder Differenzdruck ^{**)}	Sicherheitsreserve
[%]	[mm]	[Grad]	[Nm]	[MPa]	[MPa]	[-]
70	12,4	65	9,1	53,4	15,5	3,4
57	29,5	154	9,1	36,9	15,5	2,4
53	41,6	216	9,1	36,8	15,5	2,4
35	69,1	360	9,1	59,5	15,5	3,8

*) im Störfall konservativ zu unterstellendes Biegemoment

**) Differenzdruck bei abdeckender Störfallbelastung (ATWS)

Abbildung 1: Ergebnis der Grenztraglastberechnung für abdeckende Fehlerabmessungen

Zum anderen hat er nach dem sogenannten FSK/MPA-Verfahren berechnet, welche Restwanddicke der DE-Heizrohre mindestens erforderlich ist, damit die Rohre die nach den atomrechtlichen Vorschriften zu berücksichtigenden Störfälle heil überstehen. Als abdeckende Störfallbelastung gilt in diesem Fall die des ATWS-Störfalls⁴; der dabei für die DE-Heizrohre anzusetzende Biegemoment beläuft sich nach Angaben des Betreibers auf 9,1 NM. Das Ergebnis der Berechnungen hat der Betreiber grafisch dargestellt (/EnBW 2018/):

³ Bei den Untersuchungen der DE-Heizrohre im Rahmen der Revision 2018 wurden nur 101 Rohre als risikoreich erkannt und die Risse in knapp 100 weiteren Rohren übersehen (/UM 2019/, /RSK 2019/).

⁴ ATWS: Betriebstransiente mit unterstelltem Ausfall des Schnellabschaltensystems

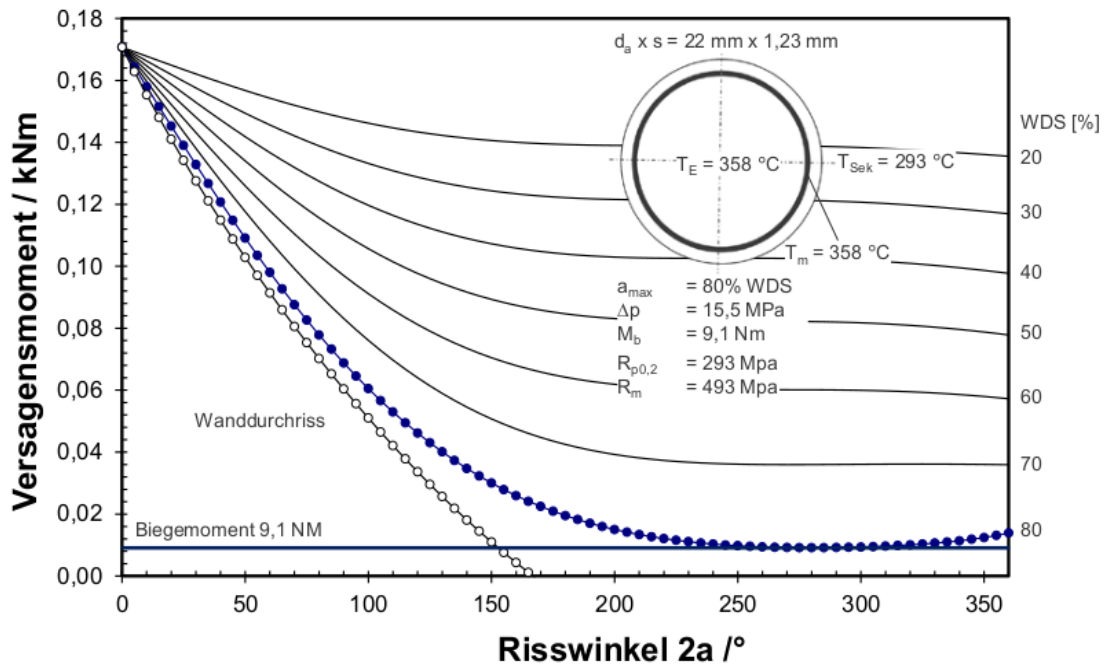


Bild 33: Berechnung der Mindestrestwanddicke für abdeckende Störfallbelastung (ATWS) mit FSK/MPA Verfahren

Abbildung 2: Berechnung der Mindestrestwanddicke für abdeckende Störfallbelastung (ATWS) mit FSK/MPA-Verfahren

Demnach wird ab einer Wanddickenschwächung von mehr als 80 % (blaue Perlenkette in der Grafik) die für einen solchen Störfall mindestens noch erforderliche Traglast der Heizrohre je nach Länge des Risses (Risswinkel 2α) unterschritten: Das Versagensmoment der Rohre ist dann geringer als das bei einem ATWS-Störfall zu unterstellende Biegemoment von 9,1 NM. Für eine Wanddickenschwächung von 90 % etwa (weiße Perlenkette in der Grafik) ist das ab einem Risswinkel 2α von ca. 150° der Fall, was einer Risslänge von ca. 29 mm entspricht.

Länge und maximale Wanddickenschwächung der 2018 und 2019 entdeckten Risse in den DE von GKN-II hat der Betreiber in folgendem Diagramm dargestellt (/EnBW 2019/):

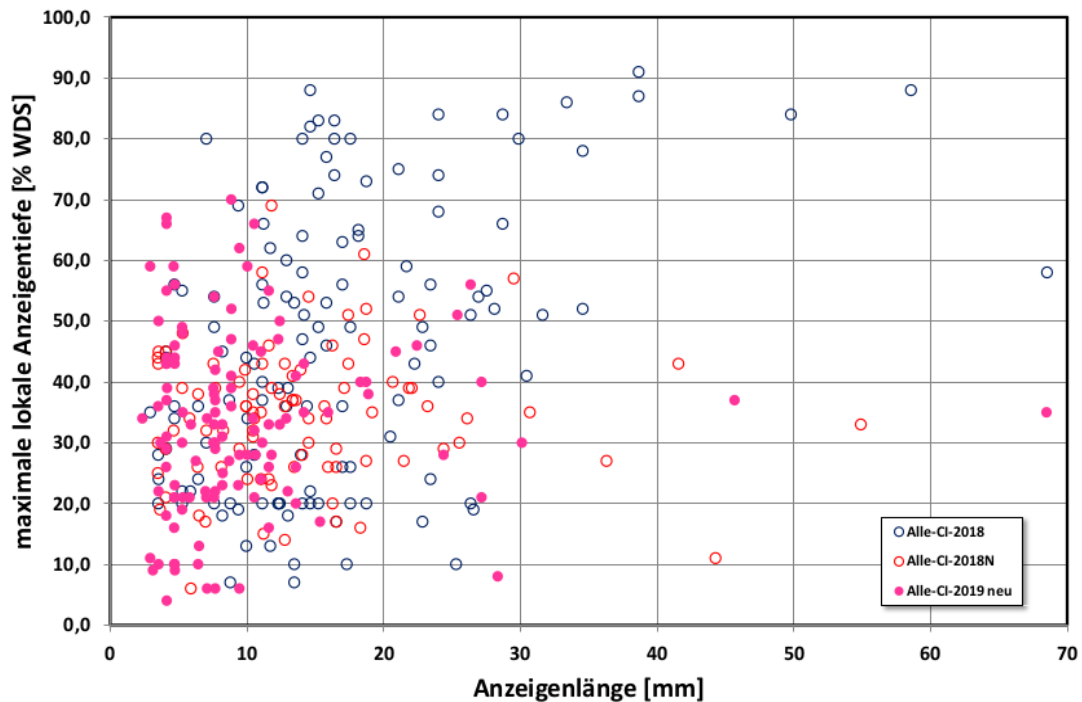


Bild 6: Einordnung der Anzeigen aus der Nachauswertung der X-Probe Daten 2018

Abbildung 3: Übersicht über Länge und maximale Wanddickenschwächung der in Neckarwestheim-2 entdeckten in Umfangsrichtung verlaufenden Risse in DE-Heizrohren; blau: 2018 entdeckt; orange: 2019 entdeckt, aber 2018 zugeordnet (damals übersehen); pink: 2019 entdeckt und 2018 noch nicht nachweisbar

Die Atomaufsicht hat 2018 wie 2019 jeweils ihre Zustimmung zum Wiederanfahren des Reaktors erteilt (/UM 2018/, /UM 2019/).

Die vorliegende Bewertung

- skizziert die sicherheitstechnische Bedeutung intakter Dampferzeugerheizrohre, insbesondere mit Blick auf das international etablierte und in den deutschen „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ (SiAnf) definierte Konzept der „gestaffelten Sicherheitsebenen“;⁵

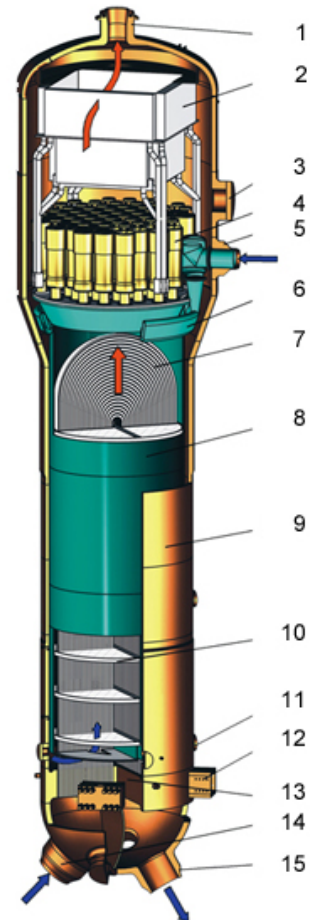
⁵ Zur Erläuterung der gestaffelten Sicherheitsebenen als Teil des in den SiAnf, Abschnitt 2(1) geforderten gestaffelten Sicherheitskonzeptes siehe etwa <https://www.nuklearesicherheit.de/genehmigung-und-aufsicht/sicherheitskonzept/gestaffeltes-sicherheitskonzept/>

- erläutert das im Kerntechnischen Regelwerk (KTR) definierte Konzept eines „Integritätsnachweises“ für Rohre („Bruchausschluss-Konzept“);
- formuliert Erkenntnisse und Empfehlungen auf Basis von Stellungnahmen der Reaktorsicherheitskommission sowie von im Auftrag des Bundesumweltministeriums durchgeführten Untersuchungen zu DE-Heizrohrschäden durch Spannungsrisskorrosion;
- erörtert, inwieweit das vom Betreiber vorgelegte sogenannte „Integritätskonzept“ für die DE-Heizrohre den Anforderungen des KTR an ein solches Konzept entspricht und ob die vorgelegten Nachweise den Abriss von Heizrohren in Neckarwestheim-2 sicher ausschließen;
- zeigt, dass der Weiterbetrieb des KKW Neckarwestheim-2 mit vorgeschädigten DE-Heizrohren nicht im Einklang mit dem Kerntechnischen Regelwerk und international etablierten Sicherheitsprinzipien steht.

1.2 Dampferzeuger und Frischdampfarmaturen

Die Dampferzeuger in KKW mit Druckwasserreaktor (DWR; alle noch laufenden KKW in Deutschland mit Ausnahme von Gundremmingen C sind Druckwasserreaktoren und haben jeweils vier Dampferzeuger) fungieren als Wärmetauscher zwischen Primär- und Sekundärkreis (zu Aufbau und Funktionsweise eines KKW mit DWR siehe Anhang). **Die ca. 4.000 U-Rohre pro Dampferzeuger**, die sogenannten DE-Heizrohre, **werden vom heißen und radioaktiv belasteten Primärkühlmittel durchströmt** (Aufbau eines Dampferzeugers siehe Abbildung 4). Sekundärseitiges Speisewasser umströmt die DE-Heizrohre und verdampft. Vier getrennte Frischdampfleitungen als Teil des Frischdampfsystems (FD-System) führen von den Dampferzeugern zum Hochdruck(HD)-Teil der Turbine. Im Frischdampfsystem, also nach dem Frischdampf-Ausgang der Dampferzeuger, sind mehrere Armaturen mit unterschiedlichen betrieblichen und sicherheitstechnischen Aufgaben vorhanden:

- Frischdampfabschlussarmatur: Absperren der Frischdampfleitung, z. B. bei Beschädigung der Frischdampfleitung,
- FD-Abblaseabsperrentil: während des Normalbetriebs geschlossen, wird bei Ausfall der Hauptwärmesenke geöffnet, um



- 1 Dampfaustritt
- 2 Feinabscheider (Dampftrockner)
- 3 Mannloch
- 4 Grobabscheider (Wasser)
- 5 Speiswassereintrittsstutzen
- 6 Speiswasserringleitung
- 7 Heizrohre
- 8 Leitmantel
- 9 Behälter
- 10 Rohrhaltegitter
- 11 Handloch
- 12 Trag- und Führungspratzen
- 13 Rohrboden
- 14 Kühlmittelintritt
- 15 Kühlmittelaustritt

Abbildung 4: Skizze eines Dampferzeugers in einem KKW

den Druck im FD-System kontrolliert abzusenken – Abblasen erfolgt in die Atmosphäre –,

- Absperrarmatur vor Sicherheitsventil: im Normalbetrieb geöffnet, wird nur geschlossen, wenn das FD-Sicherheitsventil in Offenstellung versagt,
- **FD-Sicherheitsventil:** wird bei einem FD-Druck von ca. 88 bar⁶ geöffnet, ist in der Lage, die Vollastfrischdampfmenge eines Dampferzeugers abzublasen. **Das Abblasen des Frischdampfes erfolgt außerhalb des Containments, also direkt in die Atmosphäre.**

1.3 Bedeutung intakter DE-Heizrohre

Die DE-Heizrohre stellen die Schnittstelle zwischen dem Primärkreislauf und dem sekundärseitigen Wasser-Dampfkreislauf in einem KKW mit Druckwasserreaktor (DWR) dar und gehören somit zur druckführenden Umschließung (DfU) des Primärkühlmittels⁷. Der Wärmeaustausch zwischen den beiden Kreisläufen erfolgt durch die Heizrohre. Wanddurchdringende Schäden oder gar Brüche an einzelnen Heizrohren im Leistungsbetrieb führen aufgrund der unterschiedlichen Druckverhältnisse zum Übertritt von Primärkühlmittel in den Wasser-Dampf-Kreislauf. Die Barrierefunktion der druckführenden Umschließung gegen den Austritt radioaktiver Stoffe ist dann nicht mehr gegeben. **Schäden an DE-Heizrohren sind deshalb sicherheitstechnisch relevant und führten weltweit bereits mehrfach zum Austausch kompletter Dampferzeuger, unter anderem 1983 im KKW Obrigheim und 2002 bzw. 2011 in den französischen Reaktoren Fessenheim 1 und 2.**

⁶ Zu den Druckverhältnissen in Primär- und Sekundärkreislauf sh. Kap. 5.

⁷ Definition der Druckführenden Umschließung (DfU) in den SiAnf: Gesamtheit der druckführenden Wandungen der Komponenten des Druckraumes des Reaktordruckbehälters bis einschließlich der ersten Absperrarmatur, für Rohrleitungen des Druckraumes des Reaktordruckbehälters, die den Sicherheitsbehälter durchdringen, bis zur ersten Absperrarmatur außerhalb des Sicherheitsbehälters.

1.4 Besondere Bedeutung der Spannungsrisskorrosion unter Sicherheitsaspekten

Spannungsrisskorrosion bezeichnet eine spezielle Form der Rissbildung in unter Spannung stehenden Werkstoffen. Die entsprechenden Randbedingungen vorausgesetzt tritt sie unvorhersehbar auf und die entstehenden Risse können sehr schnell wachsen.

Für das Auftreten von Spannungsrisskorrosion müssen drei Bedingungen erfüllt sein:

- der Werkstoff muss empfindlich gegen Spannungsrisskorrosion sein,
- Zugspannungen müssen vorliegen,
- ein spezifisches Angriffsmittel muss vorhanden sein. Als spezifische Angriffsmittel wirken etwa Chloride.

All diese Bedingungen treten an den Dampferzeuger-Heizrohren in GKN-II auf.

Die Schädigung von DE-Heizrohren im Bereich der Einwölbungen der DE-Heizrohre im Rohrboden und der Abstandsgitter zwischen den DE-Heizrohren durch sogenannte interkristalline Spannungsrisskorrosion (IkSpRK) ist ein bekanntes Phänomen. In diesen Bereichen, bei denen keine oder nur geringe Durchströmung stattfindet, ist eine Aufkonzentration von Chloriden und anderen korrosionsfördernden Verunreinigungen möglich. Dadurch bedingte wanddurchdringende Schäden (Risse) an einzelnen DE-Heizrohren im Leistungsbetrieb oder gar Brüche von DE-Heizrohren führen auf Grund der unterschiedlichen Druckverhältnisse (Primärseite ca. 160 bar, Sekundärseite ca. 65 bar) zum Übertritt von Primärkühlmittel in den Wasser-Dampf-Kreislauf der Sekundärseite und somit gegebenenfalls zur Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung.

1.5 Auslegungsstörfall und auslegungsüberschreitender Störfall

Der Auslegung von KKW in Deutschland liegt als einer der Auslegungsstörfälle der vollständige Bruch eines DE-Heizrohres mit einem doppelendigen Ausströmungsquerschnitt (2 F) zugrunde (Ereignis D3-31 gemäß den SiAnf). Die Beherrschung eines solchen Störfalles erfordert ein komplexeres Vorgehen als bei den meisten anderen Störfällen, die bei der Auslegung von KKW zu berücksichtigen sind.

Auch einen Auslegungsstörfall dürfen weder Betreiber noch Aufsichtsbehörden billigend in Kauf nehmen. Vielmehr müssen sie gemäß Atomgesetz und Strahlenschutzverordnung dafür Sorge tragen, dass ein solcher Störfall sicher nicht eintritt.

Wanddickenschwächungen (Risse) und Lecköffnungen an DE-Heizrohren vermindern deren Grenztragfähigkeit: Derart vorgeschädigte Rohre können insbesondere in Belastungssituationen (Druckstöße, Erschütterungen, ...) leichter reißen. Aufgrund der möglichen Folgen eines solchen Heizrohrschadens und der dadurch freigesetzten Radioaktivität haben Wanddickenschwächungen an DE-Heizrohren einen erheblichen Einfluss auf die Sicherheit von KKW mit Druckwasserreaktor (DWR).

DE-Heizrohrlecks mit Leckquerschnitten > 2 F sind auslegungsüberschreitend.

Insbesondere bei korrodierten Heizrohren können auslegungsüberschreitende Leckquerschnitte nicht ausgeschlossen werden. Als Ursachen hierfür kommen z. B. infrage:

- Gleichzeitige Leckbildung an mehreren DE-Heizrohren aufgrund von Korrosionsmechanismen,
- gleichzeitiges Lösen mehrerer Verschlussstopfen,
- Folgeschäden an Nachbarrohren, etwa durch nach einem Heizrohrbruch umher-schlagende Rohrenden oder unter hohem Druck austretendes Wasser, insbesondere bei vorhandener Vorschädigung der Nachbarrohre,
- Folgeschäden aufgrund von Belastungen aus Störfällen wie Lecks und Brüche im Speisewasser- und Frischdampfbereich, insbesondere bei vorhandener Vorschädigung der Rohre.

1.6 Folgen von Lecks an den Dampferzeuger-Heizrohren

Eine besondere sicherheitstechnische Bedeutung von auslegungsüberschreitenden Störfällen mit Leckquerschnitten $> 2 F$ ergibt sich daraus, dass hierdurch neben einer **erheblichen Freisetzung von Primärkühlmittelaktivität** auch ein **erheblicher Verlust von Primärkühlmittel** unter **Umgehung des Sicherheitsbehälters** (sog. **Bypass-Ereignisse**) entsteht. Durch Bypass-Ereignisse wird somit die Barrierenfunktion des Containments unwirksam. Hier unterscheiden sich übrige Kühlmittelverluststörfälle deutlich von denen im Bereich der Dampferzeuger, denn eine Umgehung der Barriere Containment ist bei den übrigen Kühlmittelverluststörfällen nicht unmittelbar zu befürchten.

Beim DE-Heizrohrbruch handelt es sich also um einen **Kühlmittelverlust-Störfall** in den Sekundärkreis **unter Umgehung des Sicherheitseinschlusses**, wodurch beim störfallbedingten Öffnen von Frischdampfarmaturen (z. B. Frischdampfsicherheitsventil) im Bereich des defekten Dampferzeugers infolge des Druckausgleiches zwischen Primär- und Sekundärkreis eine **direkte und unmittelbare Verbindung zur Atmosphäre** besteht.

Relevant für das Potenzial einer hohen Aktivitätsfreisetzung beim Störfall DE-Heizrohrbruch wäre ein länger anhaltender hoher Druck im Primärkreis, der zu einer hohen Leckrate in den Sekundärkreis führt. Dieser kann ereignisablaufbedingt z. B. durch die primärseitigen Sicherheitseinspeisepumpen aufgeprägt werden oder durch die Unverfügbarkeit der primärseitigen Hauptkühlmittelpumpen entstehen. Insofern zielen die Maßnahmen zur Störfallbeherrschung darauf ab, solche Zustände im Störfallablauf zu vermeiden. Insbesondere soll der Primärkreisdruck rasch dem Druck im Sekundärkreis angeglichen werden, sodass der Übertritt von Primärkühlmittel in den Sekundärkreislauf begrenzt werden kann.

Prinzipiell besteht schon bei einem auslegungsgemäßen Störfallablauf die Gefahr, dass durch das aus dem defekten Heizrohr ausströmende Wasser der Druck im Dampferzeuger so weit ansteigt, dass die Frischdampfsicherheitsventile öffnen und eine direkte Verbindung vom Primärkreis in die Umgebung schaffen. Dies gilt erst recht bei einem auslegungsüberschreitenden Störfallablauf, etwa beim Bruch mehrerer Heizrohre (Leckquerschnitt $> 2 F$).

Aus technischer Sicht besteht in der Folge der Öffnung eines Frischdampfsicherheitsventils die Möglichkeit, dass dieses Sicherheitsventil in Offenstellung hängenbleibt, womit eine direkte Verbindung vom Reaktorkern zur Umwelt gegeben wäre. In einem solchen Zustand wäre eine **ungehinderte Freisetzung von Radioaktivität in die Umwelt** sowie der **Verlust von Primärkühlmittel** die Folge. **In der Tendenz wären Schäden an den Brennelementen infolge unzureichender Kühlung der Brennelemente, einschließlich des Erreichens von Schmelzzuständen des Reaktorkerns mit erheblichen Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umwelt nicht mehr auszuschließen.**

1.7 Gestaffeltes Sicherheitskonzept („Defence-in-Depth-Concept“)

Die Internationale Atomenergie-Organisation (International Atomic Energy Agency, IAEA) ist Autor und Herausgeber der „IAEA Safety Standards“.⁸ Sie reflektieren den internationalen Konsens über die Einhaltung eines hohen Sicherheitsstandards von KKW zum Schutz von Menschen und Umwelt gegen schädliche Effekte durch ionisierende Strahlung. In der Kategorie „Safety Requirements“ der „IAEA Safety Standards“ sind die grundlegenden Anforderungen zusammengefasst, die nach Auffassung der IAEA erfüllt werden müssen, um den Schutz von Menschen und der Umwelt jetzt und in der Zukunft zu sichern. Die EU-Kommission hat diese Anforderungen über eine Richtlinie EU-weit rechtsverbindlich gemacht.⁹

Demnach ist dieser Schutz u.a. durch ein gestaffeltes Sicherheitskonzept („Defence-in-Depth Concept“¹⁰) zu realisieren, mit dem gewährleistet werden soll, dass bei allen zu betrachtenden Ereignissen die erforderlichen Barrieren und damit die Rückhaltefunktionen im erforderlichen Umfang erhalten bleiben. Im Rahmen des gestaffelten Sicherheitskonzepts sind gestaffelte, wirksame und zuverlässige Maßnahmen und Einrichtungen einerseits zum Vermeiden von Störungen und Verhindern von Störfällen, andererseits

⁸ <https://www.iaea.org/resources/safety-standards>

⁹ Council Directive 2014/87/EURATOM of 8 July 2014 amending Directive 2009/71/Euratom establishing a Community framework for the nuclear safety of nuclear installations

¹⁰ Safety of Nuclear Power Plants: Design Specific Safety Requirements, No. SSR-2/1 (Rev. 1), International Atomic Energy Agency, Vienna 2016

zum Beherrschen dennoch möglicher Störungen und unterstellter Störfälle sowie Maßnahmen und Einrichtungen zum Begrenzen der Auswirkungen von auslegungsüberschreitenden Anlagenzuständen und zum Ausschluss von Ereignisabläufen mit frühen oder großen Freisetzen vorzusehen.

Mit den Maßnahmen und Einrichtungen im gestaffelten Sicherheitskonzept soll erreicht werden, dass

- ein möglichst störungsfreier Betrieb (Sicherheitsebene 1) durch zuverlässigkeitsfördernde Auslegungs-, Fertigungs- und Betriebsgrundsätze gewährleistet sowie Abweichungen vom Normalzustand frühzeitig erkannt und weitgehend begrenzt werden, so dass Betriebsstörungen vorgebeugt werden kann,
- dennoch auftretende Betriebsstörungen (Sicherheitsebene 2) möglichst beherrscht und damit das Auftreten von Störfällen vermieden werden kann,
- die zuverlässige Beherrschung von dennoch postulierten Störfällen (Sicherheitsebene 3) sichergestellt ist und damit die Ausweitung eines Störfalles zu einem auslegungsüberschreitenden Anlagenzustand verhindert wird,
- für den Fall eines dennoch eintretenden auslegungsüberschreitenden Anlagenzustands (Sicherheitsebene 4) die Auswirkungen begrenzt sowie Ereignisabläufe mit frühen oder großen Freisetzen radioaktiver Stoffe praktisch ausgeschlossen werden.

Als übergeordnete sicherheitstechnische Zielsetzung des Konzepts der gestaffelten Sicherheitsebenen gilt, dass mittels resilienter Eigenschaften¹¹ der Maßnahmen und Einrichtungen auf der Sicherheitsebene 2 gegebenenfalls auftretende Abweichungen/Störungen des Normalbetriebs abgefangen und die Anlage wieder auf den sicheren Ausgangszustand, den Normalbetrieb, zurückgeführt wird. Im Falle von Störfällen (Sicherheitsebene 3) wäre ein kontrollierter Anlagenzustand zu erreichen und zu gewährleisten.

Nach den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit vom 3. März 2015 (SiAnf),¹²

¹¹ Resilienz: Fähigkeit eines Systems, akute Störungen und Stresssituationen zu bewältigen.

¹² SiAnf: Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 3. März 2015 (BAnz AT 30.03.2015 B2), https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/rsh/3-bmub/3_0_1.pdf

Abschnitt 2.1(12) ist eine gegebenenfalls eingetretene Unverfügbarkeit sicherheitstechnisch wichtiger Einrichtungen auf einer Sicherheitsebene zeitlich zu begrenzen. Grundsätzlich müssen alle vier Sicherheitsebenen gemäß den Erfordernissen der jeweiligen Betriebsphasen verfügbar sein. In den Sicherheitsempfehlungen der IAEA heißt es, dass beim Betrieb von KKW immer alle vier Sicherheitsebenen des Gestaffelten Sicherheitskonzepts verfügbar sein müssen.¹³ Für Barrieren einzuhaltende Anforderungen sind in SiAnf, Abschnitt 2.2(1) angegeben.

Schäden an den DE-Heizrohren sind Ereignisse, die der Sicherheitsebene 2 im gestaffelten Sicherheitskonzept zuzuordnen sind. Abhängig vom Umfang der DE-Heizrohrschäden können Systeme der Sicherheitsebene 2 oder diejenigen Systeme, die zur Störfallbeherrschung (Sicherheitsebene 3) erforderlich sind, angefordert werden. Gleichzeitiges Versagen von mehr als einem DE-Heizrohr (>2F-Bruch) wird in der Auslegung des KKW nicht unterstellt, wäre also ein auslegungsüberschreitender Ereignisablauf (sh. auch oben Kapitel 1.5).

Das Auftreten von Lochkorrosion/interkristallinem Angriff und Spannungsrisskorrosion an DE-Heizrohren aus dem Werkstoff Alloy 800 mod. 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, mit dem Auftreten in GKN-II aber auch für bis dato als unproblematisch angesehene wasserchemische Bedingungen¹⁴ festgestellt sind.

Das Auftreten von Lochkorrosion/interkristallinem Angriff und Spannungsrisskorrosion an den Heizrohren der DE in ihrem Betrieb stellt eine Störung des Normalbetriebs (Sicherheitsebene 1) eines KKW dar. Ein derartiger Zustand ist somit der Sicherheitsebene 2 („Betriebsstörungen“) des gestaffelten Sicherheitskonzepts („Defence-in-Depth Concept“) zuzuordnen.

¹³ Sh. 4.10 in „IAEA Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements, No. SSR-2/1 (Rev. 1), Vienna 2016“: „The design shall take due account of the fact that the existence of multiple levels of defence is not a basis for continued operation in the absence of one level of defence. All levels of defence in depth shall be kept available at all times and any relaxations shall be justified for specific modes of operation.“

¹⁴ Sh. hierzu etwa /RSK 2019/

1.8 Anforderungen des kerntechnischen Regelwerks hinsichtlich der druckführenden Umschließung des Primärkühlmittels

Im Rahmen des Sicherheitskonzeptes von KKW in Deutschland, festgeschrieben im kerntechnischen Regelwerk, wozu u.a. die SiAnf und die Regeln des kerntechnischen Ausschusses (KTA¹⁵) zählen, werden sicherheitstechnische Versagenskonzepte für Rohrleitungen angewendet. Diese legen die Leck- und Bruchannahmen und die Art des Versagens fest, die für die Analyse der Versagensfolgen zu unterstellen sind.

In deutschen Anlagen wird für sicherheitstechnisch wichtige Rohrleitungen im Rahmen dieses Konzeptes der „Bruchausschluss“ angenommen. Mit dem Begriff „Bruchausschluss“ wird das Postulat bezeichnet, dass das katastrophale Versagen einer Rohrleitung, d. h. deren Bruch infolge des Überschreitens kritischer Risslängen, über die gesamte Betriebsdauer ausgeschlossen werden soll. Dies setzt einerseits voraus, dass diese Rohrleitungen „basissicher“ sind, d. h. den Qualitätsmerkmalen der sogenannten „Rahmenspezifikation Basissicherheit“¹⁶ entsprechen, bei deren Einhaltung ein katastrophales Versagen aufgrund herstellungsbedingter Mängel nicht mehr unterstellt werden muss. Andererseits erfordert dies eine ausreichende Vorsorge gegen betriebs- oder störfallbedingte Einwirkungen, die zu einem solchen katastrophalen Versagen führen könnten.

Die Anforderungen an die „Basissicherheit“ sind in den SiAnf, Abschnitt 3.4 angegeben:

- Hochwertige Werkstoffeigenschaften mit dem Hauptaugenmerk auf die chemische Zusammensetzung, die Bruch-Zähigkeit, die Verarbeitbarkeit und die Prüfbarkeit.
- Konservative Begrenzung der Spannungen und Verringerung der Spitzenspannungen; dies beinhaltet sowohl einen ausreichenden Sicherheitsabstand der auftretenden gegen die ertragbaren Belastungen als auch eine Bevorzugung von Auslegungs- und Konstruktionsaspekten zur Verringerung von Spannungskonzentrationen in Schweißnähten.

¹⁵ KTA: Kerntechnischer Ausschuss

¹⁶ Rahmenspezifikation „Basissicherheit von druckführenden Komponenten“, 2. Anhang zu den RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren (2. Ausgabe vom 24. Januar 1979), Kapitel 4.2

- Abgesicherte Anwendung optimierter Herstellungs- und Prüftechnologien mit Bevorzugung bestimmter Halbzeuge sowie engen Toleranzen zur Erzielung eines geringen Versatzes im Schweißnahtbereich.
- Kenntnis und Beurteilung ggf. vorliegender Fehler durch die Möglichkeit, vorhandene Fehlstellen durch Prüfungen aufzufinden und zu bewerten.
- Berücksichtigung des Betriebsmediums in Bezug auf thermo-mechanische und korrosive Einwirkungen.

Für solcherart ausgelegte und betriebene Rohrleitungen soll ein „Leck-vor-Bruch“-Verhalten gelten, d. h. dass diese auch unter Störfallbelastungen zunächst ein stabiles Leck erzeugen, ehe ein Bruch („katastrophales Versagen“) eintritt. Nur unter diesen Voraussetzungen kann die rechtzeitige Erkennung dieses stabilen Lecks als zusätzliche absichernde Maßnahme genutzt werden, um die Anlage abzufahren, ehe es zu einem Bruch der Rohrleitung kommen kann.

Der Ausschluss des plötzlichen Versagens der Wandung der druckführenden Rohrleitung bedeutet den Ausschluss von Rissen einer „kritischen“ Größe, die unter den anzunehmenden Beanspruchungen aus dem Betrieb einschließlich der Auslegungsstörfälle instabil werden könnten und damit zum Abriss der Rohrleitung führen könnten. Der entsprechende Nachweis wird in der deutschen Praxis üblicherweise in zwei Schritten durchgeführt:

- Im ersten Schritt wird ein Anriss von einer Größe angenommen, der durch die durchgeführten zerstörungsfreien Prüfungen hätte erkannt werden müssen. Für diesen Anriss ist nachzuweisen, dass er während der gesamten Lebensdauer der Anlage nur so wenig wächst, dass er die Wand nicht durchdringt und einen Abstand zu kritischen Rissgrößen behält. Mit diesem Nachweis soll eine geringe Empfindlichkeit der Rohrleitung gegen Ermüdungsschäden gezeigt werden.
- In einem weiteren Schritt, dem eigentlichen Leck-vor-Bruch-Nachweis, wird ein wanddurchdringender Riss postuliert. Dieser Riss muss einerseits so groß gewählt werden, dass die durch ihn unter Betriebsbeanspruchungen entstehende Leckage innerhalb kurzer Zeit erkannt wird. Andererseits muss der postulierte Riss so klein

sein, dass er auch unter den maximal anzunehmenden Störfalllasten einen ausreichenden Abstand zu der kritischen Risslänge behält. Damit soll sichergestellt werden, dass die Anlage in jedem Falle abgefahren wird, ehe ein solcher Riss zu einem kritischen Riss wachsen könnte, der bei einem Störfall zum Abriss der Rohrleitung führen würde. D. h. die Erkennung des aus der Rissöffnung austretenden Leckmassenstroms muss durch eine Qualifizierung der installierten Leckdetektionssysteme sichergestellt sein. Darüber hinaus muss auch das Abfahren der Anlage durchführbar sein.

Nach KTA 3206 erfolgt der Nachweis des „Bruchausschlusses“ im Betrieb durch Anwendung des „Integritätskonzeptes“. Mit dem „Integritätskonzept“ ist beabsichtigt, die Maßnahmen und Nachweise zur Sicherstellung der für die Integrität von Rohrleitungen erforderlichen Qualität über die gesamte Betriebszeit zu konkretisieren. Sind die im Rahmen des „Integritätskonzeptes“ nach KTA 3206 erforderlichen Nachweise erbracht und Maßnahmen umgesetzt, Abbildung 5, so soll für die betrachteten Rohrleitungen der „Bruchausschluss“ in Anspruch genommen werden können.

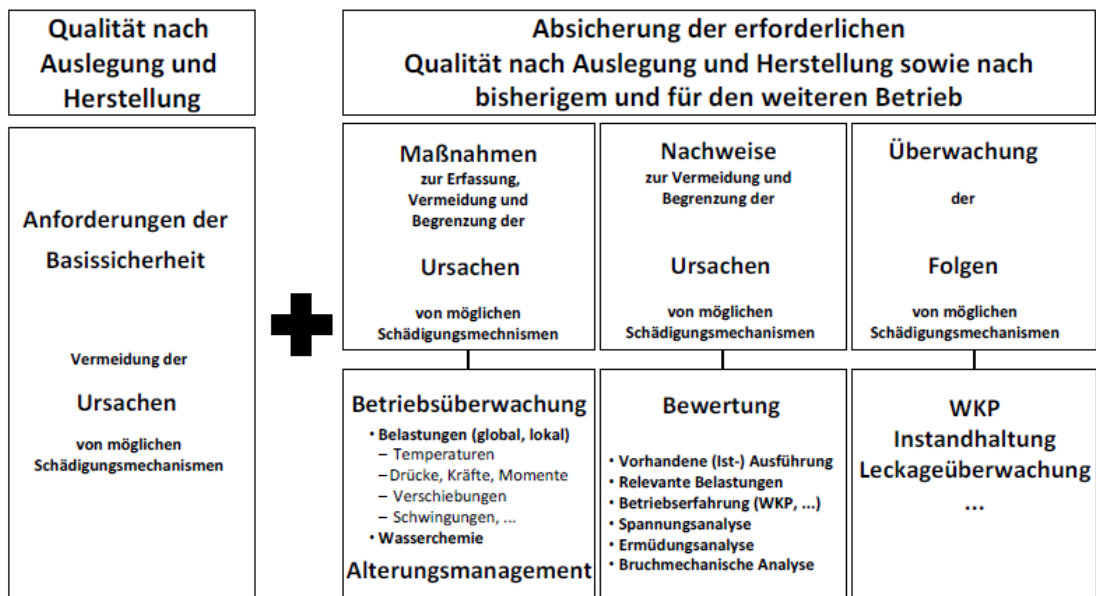


Abbildung 5: Wesentliche Elemente des „Integritätskonzeptes“ nach KTA 3206

Nach /KTA 3206/ muss durch Auslegung und Herstellung für den Betrieb u.a. sichergestellt sein, dass korrosive Schädigungsmechanismen, insbesondere rissbildende Korrosion wie z.B. Spannungsrisskorrosion (SpRK) oder dehnungsindu-

zierte Risskorrosion (DRK), sowie relevante schwingende Belastungen (z. B. stationäre Schwingungen, Resonanzschwingungen) nicht zu unterstellen sind. Die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen ist bei der Herstellung, Inbetriebsetzung sowie im Betrieb zu überprüfen.

Weitere technische Einzelheiten hierzu sind in den Regeln des KTA 3201.1 – 3201.4 und 3206 angegeben.

Die oben erläuterten Anforderungen zum Bruchabschluss, nachzuweisen über die „Basisicherheit“ der Bauteile und die Anwendung eines adäquaten „Integritätskonzepts“, gelten allerdings nur für die großen Rohrleitungen in KKW, insbesondere des Primärkreislaufes (DfU). **Für die dünnen Dampferzeugerheizrohre kann ein Bruchabschluss und ein Leck-vor-Bruch-Verhalten nach diesen Vorgaben hingegen weder unterstellt noch nachgewiesen werden.** Dies gilt umso mehr, als die DE-Heizrohre laut KTR schon von den Anforderungen an die für solche Nachweise erforderliche „Basisicherheit“ ausgenommen sind.

Wollte man dennoch einen „Integritätsnachweis“ für Dampferzeuger-Heizrohre führen, wären diese oben genannten, in den Regeln des KTA 3201.1 – 3201.4 und 3206 angegebenen Prinzipien aber analog anzuwenden. Das wiederum scheitert im vorliegenden Fall jedoch schon daran, dass bei den DE-Heizrohren in GKN-II eine korrosive Umgebung, ein vorgeschädigtes Material, aber auch Materialspannung insbesondere im Bereich der Einwölbungen in die DE-Rohrböden vorliegen. Insofern ist ein solcher „Integritätsnachweis“ nach den Maßstäben, die das kern-technische Regelwerk für die größeren Rohre aufstellt, für die DE-Heizrohre, erst recht für die in GKN-II, praktisch nicht möglich.

Hinsichtlich der erforderlichen Barrierewirkung der DfU des Primärkühlmittels, wozu die DE-Heizrohre gehören, gelten darüber hinaus die generellen Anforderungen der SiAnf, Abschnitt 3.4 (1). **Danach müssen die DE-Heizrohre als Teil der DfU so beschaffen und angeordnet sein sowie betrieben werden, dass das Auftreten von rasch fortschreitenden Rissen und von spröden Brüchen nicht zu unterstellen ist.** Entsprechend sollen Abrisse von DE-Heizrohren im Betrieb verhindert werden. In diesem Sinne sind Betriebsweisen zu vermeiden, die zu dementsprechenden Korrosionszuständen an

den DE-Heizrohren führen können. Korrosionszustände bzw. korrosive Verunreinigungen in den Dampferzeugern sind jedoch systembedingt¹⁷ und somit praktisch nicht auszuschließen.

1.9 Sicht der Reaktorsicherheitskommission

In den vergangenen Jahren hat sich die Reaktorsicherheitskommission mehrfach mit Spannungsrisskorrosion an DE-Heizrohren befasst, zuletzt – aus Anlass der wiederholten Rissfunde in GKN-II – am 22./23. Oktober 2019 (/RSK 2019/). Daraus gibt es folgende Erkenntnisse:

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an DE-Heizrohre ergeben sich aus ihren Funktionen „Wärmeabfuhr aus dem Primärkreislauf“ und „Barriere zum Einschluss radioaktiver Stoffe“. Nach den SiAnf, Abschnitt 3.4 (1) muss die DfU des Primärkühlmittels so beschaffen, angeordnet sein und betrieben werden, dass das Auftreten von rasch fortschreitenden Rissen und von spröden Brüchen nicht zu unterstellen ist. Entsprechend sollen auch Abrisse von DE-Heizrohren verhindert werden. In diesem Sinne sind Betriebsweisen zu vermeiden, die zu Spannungsrisskorrosion an den DE-Heizrohren führen können. Von den Anforderungen der SiAnf an die Basissicherheit (SiAnf, Abschnitt 3.4 (3)) und an Komponenten kleiner Nennweiten (SiAnf, Interpretation 2¹⁸, 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 Abschnitt 3.1 (12).

¹⁷ Beim Verdampfen von Wasser bleiben korrosive Substanzen wie Salze im DE-Wasser zurück, die nicht in den Dampf übergehen. Das Wasser im DE konzentriert sich dadurch kontinuierlich auf. Durch wasserchemische und technische Maßnahmen soll die Aufkonzentrierung des DE-Wassers soweit begrenzt werden mit dem Ziel, Korrosion und Ablagerungen zu vermeiden. Diese Aufkonzentration lässt sich jedoch nicht vollständig ausschließen, insbesondere in Bereichen eingeschränkter Strömungsbedingungen innerhalb des DE, wie z.B. in Bereichen des Rohrbodens oder von Abstandshalterungen.

¹⁸ Bekanntmachung der Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012 vom 29. November 2013 (BAnz AT 10.12.2013 B4), geändert am 3. März 2015 (BAnz AT 30.03.2015 B3)

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.

**Ein Versagen von mehr als einem DE-Heizrohr stellt demnach einen auslegungs-
überschreitenden Ereignisablauf dar** (siehe auch oben Kapitel 1.5).

In dem nach SiAnf, Abschnitt 1 (3) geforderten **Alterungsmanagement** (technische Einzelheiten sh. KTA 1403) **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. Wie weiter unten angegeben lassen sich eben gerade solche Betriebsbedingungen im Betrieb des KKW GKN-II nicht ausschließen.**

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. Das WKP-Konzept¹⁹ muss also dazu geeignet sein, derartige Schädigungen rechtzeitig zu erkennen, um die Integrität der DE-Heizrohre zumindest für einen Prüfzyklus prognostizieren zu können.

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Anlage GKN-II und aus zerstörenden Untersuchungen an gezogenen DE-Heizrohren anderer Anlagen werden die Befunde in GKN-II vom Hersteller Framatome auf folgende Schädigungsmechanismen zurückgeführt (/RSK 2019/):

- Die in der Revision 2017 und 2018 festgestellten volumetrischen Anzeigen sind auf Lochkorrosion und/oder interkristallinen Angriff (intergranular attack, IGA) unter stark

¹⁹ WKP – Wiederkehrende Prüfungen

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.
- 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 DE 10 und 16 im DE 20. Umfangsanzeigen an 191 Rohren wurden in allen vier DE auf der primärseitigen Eintrittsseite detektiert, dabei die überwiegende Anzahl (147) in DE 20. Die Auswertungen der Wirbelstromprüfungen ergaben, dass etwa die Hälfte der Umfangsanzeigen bereits 2018 vorhanden war, allerdings bei der Auswertung in der Revision 2018 nicht erkannt wurde. 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.

Spannungsrisskorrosion an DE-Heizrohren war aufgrund von Befunden an DE-Heizrohren der Kernkraftwerke Biblis A und Unterweser bereits im Juli 2010 Thema in der RSK (/RSK 2010/). Hieraus gibt es folgende Erkenntnisse:

Die Schädigung durch interkristalline Spannungsrisskorrosion (IkSpRK) von DE-Heizrohren aus dem Werkstoff Alloy 800 mod²⁰, wie er in den in Betrieb befindlichen deutschen KKW mit DWR-Anlagen eingesetzt ist, im Bereich der Einwalzungen und der Abstandsgitter stellt damals einen neuen, bis dahin nicht angenommenen Schädigungsmechanismus dar.

²⁰ Beim Werkstoff Alloy 800 mod soll es sich um einen für den Einsatz in KKW optimierten Werkstoff handeln (Werkstoff-Nummer 1.4558, X2NiCrAlTi32 20).

Die erforderliche rechtzeitige Erkennung (vor der Leckage des DE-Heizrohres) dieses Schadens ist mit den damals eingesetzten Methoden der zerstörungsfreien Prüfung (zfP) nicht in ausreichendem Maße gewährleistet.

Bei dem damals festgestellten Risswachstum im KKW Unterweser von bis zu 35 % der Wanddicke pro Jahr und mit Prüfintervallen von vier bzw. fünf Jahren dürfen die bisherigen Kriterien zum Verschließen der Rohre nicht mehr angewendet werden. Bei einer Anzeigencharakteristik, die auf IkSpRK hinweist, müssen diese DE-Heizrohre vielmehr umgehend verschlossen werden. Zudem sind die Prüfumfänge und Prüfintervalle dem neuen Sachstand anzupassen.

Im Oktober 2019 schließlich verschärft die RSK aus Anlass der unerwarteten Risse in den DE-Heizrohren des KKW Neckarwestheim-II erneut die Regeln (/RSK 2019/). Festzuhalten ist:

Vorrangig sind deshalb auch Betriebsbedingungen zu vermeiden bzw. auszuschließen, die zu Schädigungsmechanismen wie Korrosions- und Erosionsvorgängen an den DE-Heizrohren führen können. Ereignisse in GKN-II haben jedoch gezeigt, dass die bisherigen Vorgaben im Betriebsreglement der Anlage, aber auch die Anforderungen der VGB-Richtlinie zur Wasserchemie im Sekundärkreis diesbezüglich nicht ausreichten. 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.

Im GKN-II 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/IGA²¹ geführt haben.

²¹ IGA - intergranular attack

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** – die RSK beruft sich hierbei auf eine Präsentation von Framatome in der 172. Sitzung des RSK-Ausschusses DKW am 05.11.2018; die 2019 in GKN-II entdeckten Risse waren damals noch unbekannt – **wurden „Schnellläufer“ mit hohen Wachstumsraten der Wanddickenschwächung festgestellt.** Aus den aufgeführten Daten ergäben sich nach Angaben von Framatome (und Stand 2018) bei Annahme einer konstanten Wachstumsgeschwindigkeit Wanddickenschwächungen von mehr als 20 bis zu ca. 40 % pro Jahr.

Die Annahme einer konstanten Wachstumsgeschwindigkeit stellt jedoch, bezogen auf vorliegende Betriebserfahrungen, keinen konservativen Ansatz mehr dar. Bei Heizrohr-Prüfungen während der Revision 2019 wurden in GKN-II Risse detektiert, die während des nur 9 Monate langen Betriebszyklus' 2018/2019 neu entstanden sind und in diesem Zeitraum bis zu 70 % der Wandstärke durchdrungen haben (sh. /EnBW 2019/, Bild 6; oben abgebildet als Abbildung 3).

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.

Die RSK (sh. /RSK 2019/, Seite 4 ff.) **folgt der Darstellung von Framatome**, wonach es sich erstens bei den festgestellten rissartigen Befunden in GKN-2 um Spannungsrisskorrosion handelt und zweitens im Bereich der oberen Einwalzungen der DE-Heizrohre von GKN-2 **alle für das Auftreten von Spannungsrisskorrosion notwendigen Voraussetzungen weiterhin gegeben sind**, nämlich:

- ein „weiterhin aktives korrosives Potenzial in den DE von GKN-2“ ,
- axiale Zugspannungen, die an den besonders gefährdeten Stellen sogar „besonders hoch“ sind, und
- ein unter den vorliegenden Bedingungen bezüglich Spannungsrissskorrosion empfindlicher Werkstoff oder Werkstoffzustand.

2 Ergebnisse aus BMU-Forschungsvorhaben zu Schäden an DE-Heizrohren

2.1 Bewertung des Potenzials für unentdeckten Schadensfortschritt an druckführenden Komponenten – BMU-Forschungsvorhaben 3607R02583

Im Unter anderem auf Basis der in den 1990er und 2000er-Jahren in den Kernkraftwerken Biblis A, Biblis B und Unterweser entdeckten DE-Heizrohrschäden analysiert 2009 das BMU-Forschungsvorhaben 3607R02583 (/GRS 2009/) das Potenzial für unentdeckten Schadensfortschritt an druckführenden Komponenten in KKW. Es stellt fest, dass die bis dahin in KKW aufgetretenen Schäden an druckführenden Komponenten hinsichtlich der Schadensursachen und -mechanismen gut bekannt wären. Zur Beherrschung systematischer Schäden sollen Maßnahmen implementiert worden sein, mit denen ein weiterer Schadensfortschritt durch den jeweiligen Schädigungsmechanismus ausgeschlossen oder zumindest verringert werden könnte. Dennoch **kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich mit zunehmender Betriebszeit oder an Stellen mit Vorschädigungen Bedingungen einstellen können, die das unvorhergesehene Auftreten betriebsbedingter Schädigungsmechanismen mit einem unerwartet hohen Fehlerwachstum zur Folge haben können.** Dies kann dazu führen, dass eine Verfolgung bzw. Auffindbarkeit eines unzulässigen oder gar kritischen Fehlers durch das vorgegebene Prüfintervall nicht mehr sicher gegeben ist.

Für DE-Heizrohre erfolgt die Prüfung mit Wirbelstromverfahren von der Innenseite aus zur Auffindung von Befunden auf der Innen- oder Außenoberfläche und von Wanddickenschwächungen. Dabei kommen für verschiedene Fehlertypen und Heizrohbereiche verschiedene Techniken (Durchlauf-, Rotations- und Array-Sonden) zum Einsatz.

Die angegebenen Prüfverfahren bzw. Prüftechniken sind je nach der dargestellten Fähigkeit unterschiedlich gut in der Lage, Fehler an DE-Heizrohren zu erkennen. Vorwiegend kommt bei wiederkehrenden Prüfungen das Wirbelstrom-Verfahren zum Einsatz. Die Prüfung mit der Innendurchlaufsonde ist nach wie vor die Standardprüfung unter Verwendung der Standardfrequenz und zusätzlich mit den unterschiedlichen Prüffrequenzen für geometrisch gestörte Bereiche. Im Allgemeinen sollen die bei der Prüfung erzielten integralen Messergebnisse für die Beurteilung der Integrität der Heizrohre ausreichend sein.

Die Grundlage für den anzuwendenden Prüfumfang und die Prüfzyklen bildet die KTA-Regel 3201.4. Diese Regel sieht einen Prüfumfang von 20 % aller Heizrohre in einem Prüfintervall von fünf Jahren vor, wobei innerhalb von zwei Jahren die halbe Anzahl der Dampferzeuger erfasst werden muss. Durch die ergänzenden Aussagen der genannten Regel kann der angegebene Prüfumfang jedoch insofern erweitert werden, dass bei jeder wiederkehrenden Prüfung die aus der Konstruktion und Betriebserfahrung bekannten Rohrbereiche mit höherer Korrosionsgefährdung zu untersuchen sind.

Die Betrachtung der aufeinanderfolgenden Prüfergebnisse aus den KKW Biblis A und Unterweser zeigt teilweise ein sehr schnelles Fehlerwachstum. Bei linearer Extrapolation dieses Fehlerwachstums können wanddurchdringende Rissbildungen bis zur nächsten Prüfung nicht ausgeschlossen werden.

Integritätsbetrachtungen können an DE-Heizrohren anhand von Berstdruckversuchen an vorgeschädigten Heizrohren vorgenommen werden. Diese Betrachtungen orientieren sich am Grenztragverhalten von vorgeschädigten Heizrohren. **Demnach ist oberhalb des Rohrbodens bei Störfallbelastungen mit $\Delta p = 175$ bar (sekundärseitiger Druckverlust und Ansprechen der primärseitigen Sicherheitsventile) bei einer Wanddickenschwächung oberhalb von etwa 70 % mit Leckagen zu rechnen. Bei Belastungen aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb mit $\Delta p = 105$ bar ist oberhalb von**

85 % Wanddickenschwächungen mit Leckagen zu rechnen. Die in den KKW Biblis A und Unterweser gemessenen maximalen Wanddickenschwächungen kamen nahe an diesen Wert heran.

Die bisherige Betriebserfahrung schließt nicht aus, dass es im Laufe des Betriebs zu vereinzelt, unbemerkten, schnell wachsenden Fehlern und damit zu Heizrohrleckagen kommen kann. Diese Möglichkeit besteht grundsätzlich auch dann, wenn wiederkehrende Prüfungen mit verkürzten Prüfintervallen und/oder erhöhtem Prüfumfang durchgeführt werden.

Ganz generell kann festgestellt werden, dass die Korrosionsneigung von Alloy 800 mod. unter sauren Bedingungen zunimmt.

2.2 Schädigungsmechanische Modellierung des Resttragvermögens von geschädigten Dampferzeugerheizrohren – BMU-Forschungsvorhaben 3610R01385

Vor dem Hintergrund, dass an DE-Heizrohren in bereits mehreren KKW Spannungsrisskorrosion aufgetreten ist, obwohl der für diese Rohre verwendete Stahl als nicht anfällig für Spannungsrisskorrosion gilt, führt die Materialprüfungsanstalt Stuttgart 2013 im Rahmen des BMU-Forschungsvorhabens 3610R01385 (/MPA 2013/) Versuche durch, die das Resttragvermögen geschädigter DE-Heizrohre näher untersuchen sollen. Sie verwendet dabei originale, den Anforderungen des kerntechnischen Regelwerks entsprechende DE-Heizrohre, wie sie in den DE der deutschen KKW eingebaut sind.

Im Vorhaben wird angegeben, dass die Beanspruchung der DE-Heizrohre im Wesentlichen aus dem Innendruck infolge der Druckdifferenz zwischen dem Primär- und Sekundärkreislauf resultiert. Neben tribologischen Schäden z. B. durch die strömungsinduzierte Schwingungsanregung im Bereich von Abstandshaltern (Fretting) können auch korrosive Schäden z.B. in Form von Spannungsrisskorrosion (SpRK) auftreten. **Durch ein Zusammenwirken von mechanischer Belastung oder Eigenspannungen und lokalen Korrosionsbedingungen kann SpRK oft plötzlich und unvorhergesehen auftreten.** Durch SpRK verursachte Risse sind meist sehr fein und verästelt und überwiegend axial orientiert. Im Bereich knapp über dem Rohrboden oder im Bereich der Einwalzun-

gen wurden aber auch schon SpRK-Risse in Rohrumfangsrichtung beobachtet²² – wie die 2018 und 2019 in GKN-II entdeckten.

Um praxisrelevante Rohrschädigungen abzubilden, wurden Innendruckproben mit Umfangskerbe und Längskerbe untersucht. Die Kerbtiefe betrug ca. 2/3 der Wanddicke. Die Proben mit Längsfehlern zeigen ein typisches „Leck-vor-Bruch“-Verhalten, während die Proben mit Umfangskerbe spontan durch Bruch versagen. **Somit wären die Analyseergebnisse, dass „die Proben mit Umfangskerbe spontan durch Bruch versagten“ als Indiz für ein fehlendes Leck-vor-Bruch-Verhalten zu werten.**

²² Sh. auch IAEA-TECDOC-1668, 2011. Assessment and Management of the Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators.

3 Zusammenfassung der Bewertung

- Das KKW GKN-II hat den kommerziellen Leistungsbetrieb am 15.04.1989 aufgenommen. Die Dampferzeuger sind somit bereits mehr als 30 Jahre in Betrieb. (Kap. 1.1)
- Die DE-Heizrohre stellen die Schnittstelle zwischen dem Primärkreislauf und dem sekundärseitigen Wasser-Dampfkreislauf dar. Wanddurchdringende Schäden an einzelnen Heizrohren im Leistungsbetrieb führen aufgrund der unterschiedlichen Druckverhältnisse zum Übertritt von Primärkühlmittel in den Wasser-Dampf-Kreislauf und sind somit wegen ihrer Bedeutung für die Barrierefunktion sicherheitstechnisch relevant. Bei DE-Heizrohrschäden können in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad Systeme der Sicherheitsebene 2 oder diejenigen Systeme, die zur Störfallbeherrschung (Sicherheitsebene 3) erforderlich sind, angefordert werden. Gleichzeitiges Versagen von mehreren DE-Heizrohren (> 2 F-Bruch) ist ein auslegungsüberschreitender Störfall. (Kap. 1.3, 1.5)
- Von den Anforderungen an die „Basissicherheit“ und an Komponenten kleiner Nennweiten sind die DE-Heizrohre ausgenommen (sh. SiAnf). Ein Bruchabschluss und ein Leck-vor-Bruch-Verhalten kann deshalb nach diesen Vorgaben weder unterstellt noch nachgewiesen werden. Da bei den DE-Heizrohren in GKN-II zudem eine korrosive Umgebung, ein vorgeschädigtes Material sowie potenziell spannungsrissskorrosionsauslösende Materialspannung vorliegt, ist ein „Integritätsnachweis“ für die DE-Heizrohre nach den Maßstäben, die das kern-technische Regelwerk dafür aufstellt, praktisch erst recht nicht möglich. (Kap. 1.8)
- Für die DE-Heizrohre gelten jedoch die generellen Anforderungen der SiAnf, Abschnitt 3.4 (1). Danach müssen die DE-Heizrohre als Teil der DfU so beschaffen und angeordnet sein sowie 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 Be-

triebsweisen zu vermeiden, die zu Spannungsrisskorrosion an den DE-Heizrohren führen können. (Kap. 1.8)

- Die in der Revision 2017 und 2018 in den DE von GKN-II 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. Darüber hinaus wurden in der Revision 2018 auch zahlreiche auf Spannungsrisskorrosion zurückzuführende Risse in Umfangsrichtung erkannt, die durch dieselben ungeeigneten Betriebsbedingungen entstanden sind. Trotz Gegenmaßnahmen wurden in der Revision 2019 dann bei erneuten Prüfungen der Heizrohre mittels Wirbelstromprüfung sogar in allen vier Dampferzeugern volumetrische Anzeigen und Umfangsanzeigen (Risse in Umlaufrichtung) gefunden, darunter zahlreiche neu entstandene. (Kap. 1.1)
- Als übergeordnete sicherheitstechnische Zielsetzung des Konzepts der gestaffelten Sicherheitsebenen gilt, dass mittels resilienter Eigenschaften der Maßnahmen und Einrichtungen im gestaffelten Sicherheitskonzept gegebenenfalls auftretende Abweichungen (Betriebsstörungen) vom Normalbetrieb abgefangen und wieder auf den sicheren Ausgangszustand, den Normalbetrieb (Sicherheitsebene 1), zurückgeführt werden.
Die Schäden an den DE-Heizrohren sind als Betriebsstörung einzustufen und stellen somit einen Zustand dar, der der Sicherheitsebene 2 zuzuordnen ist.
Ein dauerhafter (gestörter) Anlagenbetrieb unter den Bedingungen der Sicherheitsebene 2 ist gemäß SiAnf, Abschnitt 2.1 (12) unzulässig. D.h., dass ein Betrieb des Reaktors mit vorgeschädigten oder potenziell geschädigten DE-Heizrohren sowie korrosivem Milieu nicht zulässig ist. Die Schäden an den Dampferzeuger-Heizrohren werden bereits seit Jahren beobachtet, die Schadensmechanismen sind systemimmanent. (Kap. 1.7, 1.8)
- Vor dem Hintergrund der Unklarheit über die Risswachstumsgeschwindigkeit bei Spannungsrisskorrosion, wie sie die RSK in ihrer Stellungnahme vom 22./23.10.2019 (512. RSK-Sitzung) herausstellt, und den Betriebserfahrungen

aus GKN-II, wonach trotz aller Gegenmaßnahmen weiterhin mit neuen Rissen und mit Risswachstum in den DE-Heizrohre zu rechnen ist, ist ein Auftreten eines nicht wanddurchdringenden Risses, der aber bereits die Grenzen der Traglastberechnungen für den ATWS-Störfall überschreitet, nicht sicher auszuschließen.²³ (Kap. 1.1, 1.9)

- Die DE-Heizrohre in GKN-II haben über den bisherigen Betriebszeitraum von mehr als 30 Jahren und insbesondere durch das seit vielen Jahren und bis heute vorhandenen korrosive Milieu irreversible Schädigungen erfahren, die den Verlust der erforderlichen Integrität befürchten lassen. Die Wiederherstellung der Qualität der erforderlichen Barrierefunktion der DE-Heizrohre ist notwendig und nur durch Austausch der geschädigten Dampferzeuger-Heizrohre, gekoppelt mit einer angepassten sekundärseitigen Wasserchemie, möglich. (Kap. 1.7, 1.8, 1.9)
- Die Auswertung von DE-Heizrohrschäden in den Kernkraftwerken Biblis A, Biblis B und Unterweser zeigten bereits 2010, dass bei Spannungsrisskorrosion in einem engen Zeitraum mit hohem Fehlerwachstum zu rechnen ist. In GKN-II traten im Betriebszyklus 2018/2019 Risswachstumsgeschwindigkeiten von bis zu 70 % Waddickenschwächung im Zeitraum von neun Monaten auf. (Kap. 2.1, 1.1)
- Das in GKN-II praktizierte Verstopfen bereits stark geschädigter DE-Heizrohre ist zwar als eine temporär wirkende Reparaturmaßnahme zu sehen, kann jedoch keinen Beitrag zur Eindämmung oder Beseitigung der Schädigungsmechanismen leisten. Nach dem für Kernkraftwerke weltweit geltenden Regeln des gestaffelten Sicherheitskonzepts wäre hierfür ein Austausch der jeweils betroffenen Dampferzeuger erforderlich. (Kap. 1.7)

²³ Die ATWS-Lastbedingungen würden unter bestimmten Risskonfigurationen im Ereignisablauf rechnerisch ein Versagen zeigen, unter Normalbetriebsbedingungen müsste nicht zwangsweise ein Leck auftreten.

4 Verzeichnis der Quellen

/EnBW 2018/ EnBW Kernkraft GmbH: Kernkraftwerk Neckarwestheim Block II, Sachstands-Bericht ME 04/2018, Ursachenanalyse und Integritätsnachweis, LNMQ/2018/10

https://www.bund-bawue.de/fileadmin/bawue/Dokumente/Themen/Atomkraft/2018-10-15_EnKK-LNMQ_2018_10_Ind_a_geschwaerzt.pdf

/EnBW 2019/ EnBW Kernkraft GmbH: Kernkraftwerk Neckarwestheim Block II, Arbeitsbericht, Prüfung der Dampferzeugerheizrohre GKN II in der Revision 2019 und Bewertung der Ergebnisse, LNMQ/2019/11

https://www.ausgestrahlt.de/media/filer_public/07/fc/07fc4319-0daf-4370-9ba1-a4b1e7a46269/lmq_2019_11_index_a_geschwaerzt.pdf

/GRS 2009/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit: Bewertung des Potentials für unentdeckten Schadensfortschritt an druckführenden Komponenten, BMU-Vorhaben 3607R02583

https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2009111112/1/BfS_2009_BfS-RES-FOR-26-09.pdf

/KTA 3206/ Kerntechnischer Ausschuss: KTA-Regel 3206, Nachweise zum Bruchabschluss für druckführende Komponenten in Kernkraftwerken

http://www.kta-gs.de/d/regeln/3200/3206_r_2014_11_ber2.pdf

/MPA 2013/ Materialprüfungsanstalt Stuttgart: Schädigungsmechanische Modellierung des Resttragvermögens von geschädigten Dampferzeugerheizrohren, BMU-Vorhaben 3610R01385

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3610_r_01385_dampferzeugerheizrohr_bf.pdf

/RSK 2010/ Reaktorsicherheitskommission: Schäden an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren durch Spannungsrisskorrosion – Ursache und Nachweis, Stellungnahme, Anlage zum Ergebnisprotokoll der 428. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission am 15.07.2010

<http://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/epanlage1rsk428hp.pdf>

/RSK 2019/ Reaktorsicherheitskommission: Schäden an Dampferzeuger(DE)-Heizrohren durch Spannungsrisskorrosion – Maßnahmen zur Sicherstellung der Integrität der Heizrohre, Empfehlung der 512. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 22./23.10.2019

<http://www.rskonline.de/sites/default/files/reports/epanlage4rsk512hp.pdf>

/UM 2018/ Umweltministerium Baden Württemberg: Zusammenfassender Bericht des Umweltministeriums zum Meldepflichtigen Ereignis GKN II ME 04/2018 „Lineare Anzeigen bei Wirbelstromprüfung von Dampferzeugerheizrohren“ (Stand: November 2018)

https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Kernenergie/Berichte/Anlagen/GKN/Aufarbeitung_ME-04-2018/GKNII_Bericht_des_UM_zum_ME-042018.pdf

/UM 2019/ Umweltministerium Baden-Württemberg: Zusammenfassender Bericht des Umweltministeriums zu den Prüfungen im Rahmen der Jahresrevision 2019 infolge des meldepflichtigen Ereignisses GKN II Nr. 04/2018 „Lineare Anzeigen bei Wirbelstromprüfung von Dampferzeugerheizrohren“ (Stand: 17.09.2019)

https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Kernenergie/Berichte/Anlagen/GKN/Aufarbeitung_ME-04-2018/190917_GKNII_Bericht_des_UM_zum_ME-042018.pdf

5 Anhang: Energieerzeugung und Energieübertragung in einem Atomkraftwerk

Der Prozess der Energieerzeugung und Energieübertragung in einem Kernkraftwerk (KKW) mit Druckwasserreaktor (DWR) ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

Eine DWR-Anlage ist dadurch charakterisiert, dass die Dampferzeugung zum Antreiben der Turbine über zwei voneinander getrennte

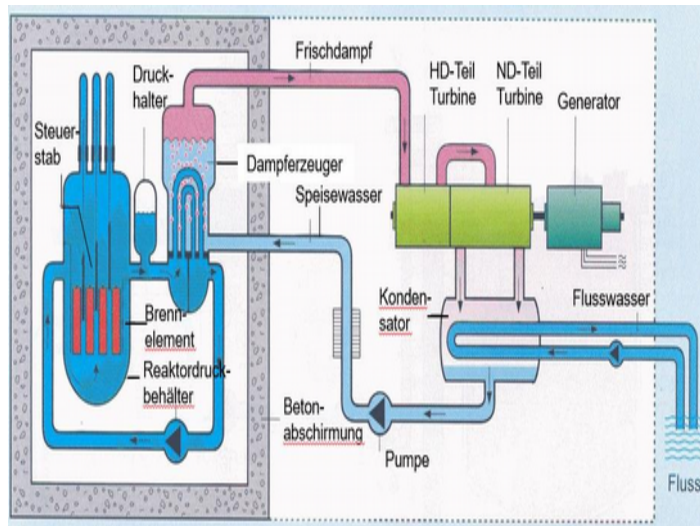


Abbildung 6: Darstellung des Prozesses der Energieerzeugung und der Energieübertragung in einem KKW (vereinfacht)

Kreislaufsysteme, dem Primär- und dem Sekundärkreislaufsystem erfolgt. Die im Reaktor erzeugte Wärme wird über Dampferzeuger vom primären Reaktorkühlkreislauf an den sekundären Wasser-Dampf-Kreislauf abgegeben. Dem Primärkreislauf wird durch einen Druckhalter ein ausreichend hoher Druck aufgeprägt, um ein Verdampfen des Kühlmittels im Reaktor zu vermeiden.

Das Reaktorkühlsystem besteht bei neueren Anlagen aus vier primären Reaktorkühlkreisläufen, in denen jeweils eine Hauptkühlmittelpumpe das Kühlmittel zwischen Dampferzeuger und Reaktordruckbehälter umwälzt, und einem Druckhalter, der über eine Volumenausgleichsleitung mit dem Reaktorkühlsystem verbunden ist. Als Kühlmittel dient entgastes, vollentsalztes und im gewissen Umfang boriertes Wasser. Die Reaktorleistung wird über die Stellung der Steuerstäbe und über die Änderung der Borkonzentration des Kühlmittels geregelt.

Die Wärme, die bei der Kernspaltung in den Brennelementen des Reaktorkerns entsteht, führt zur Aufwärmung des Primärkühlmittels (Wasser) von ca. 290 auf ca. 325°C im Re-

aktordruckbehälter. Die Zirkulation des Primärkühlmittels wird durch Kühlmittelpumpen sichergestellt. Das aufgewärmte, unter einem Druck von ca. 160 bar stehende Wasser wird in die Dampferzeuger gepumpt, wobei dort Wasserdampf entsteht. Der unter Druck von ca. 65 bar stehende Wasserdampf wird einer mehrstufigen Dampfturbine zugeführt, die einen Generator mit einer Leistung von ca. 1350 MW (elektrisch) antreibt.

Der Prozess der Elektroenergiegewinnung in einem KKW lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Durch Kernspaltung im Reaktorkern Erzeugung von Wärmeenergie,
- mit der Wärme des Reaktorkerns Erzeugung von Wasserdampf im Dampferzeuger,
- Wasserdampf unter hohem Druck treibt Dampfturbine an,
- Bewegung der Turbine erzeugt elektrische Energie im Generator.