

Stellungnahme zu noch offenen sicherheitstechnischen Fragen im Hinblick auf Verformungen von Brennelementen in deutschen Druckwasserreaktoren (DWR) einschließlich einer Bewertung der statistischen KMV-Analyse

INHALT

1	Anlass der Beratung	2
2	Beratungsgang	3
3	Beantwortung sicherheitstechnischer Fragestellungen der RSK (RSK-Empfehlungen vom 18.03.15)	4
3.1	Konzept der Nachweisführung der Betreiber.....	4
3.2	Umsetzung der RSK-Empfehlungen 1-3	5
3.2.1	Bestimmung der BE-Verformungen im Leistungsbetrieb	6
3.2.2	Nachweisführung Leistungsdichteverteilung und DNB	9
3.2.3	Nachweisführung KMV (Methode der statistischen Nachweisführung)	12
3.2.3.1	Nachweisführung KMV ohne Berücksichtigung geänderter Spaltweiten	12
3.2.3.2	Nachweisführung KMV mit Berücksichtigung geänderter Spaltweiten.....	15
3.3	Umsetzung der RSK Empfehlung 4.....	17
3.4	Umsetzung der RSK Empfehlungen 5-8.....	19
3.5	Umsetzung der RSK-Empfehlung 9.....	21
4	Zusammenfassung und Empfehlung.....	22
	Beratungsunterlagen	23
A1	Anhang 1: Empfehlungen der RSK zu „Verformungen von Brennelementen in deutschen Druckwasserreaktoren“ vom 18.03.15 [2]	25

1 Anlass der Beratung

Die ab 2000 beobachtete Zunahme von Brennelement (BE) -Verformungen in deutschen DWR-Anlagen war bereits mehrfach Gegenstand von Beratungen der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK). In ihrer Stellungnahme vom 18.03.2015 [2] nahm die RSK eine über die bisherigen Diskussionen zu einzelnen Aspekten des Brennelementverhaltens und von Brennelementverformungen hinausgehende Gesamtbeurteilung aller diesbezüglich in den letzten Jahren bekannt gewordenen einschlägigen Phänomene und deren sicherheitstechnischer Bewertung vor. Schwerpunktmäßig wurden dabei mit den Brennelementverformungen einhergehende Fragen der sicherheitstechnischen Nachweise behandelt. Die RSK stellte fest, dass Betreiber und Hersteller bereits eine Reihe von Maßnahmen zur Verringerung der Brennelementverformungen vorgenommen haben, die aufgrund neuerer Daten aus den deutschen DWR-Anlagen bereits eine Verbesserung der Situation erkennen und eine weitere Verbesserung erwarten lassen. Ungeachtet dessen kam die RSK zum Ergebnis, dass Brennelementverformungen von sicherheitstechnischer Bedeutung sein können. Die aus den Verformungen resultierenden Auswirkungen auf die sicherheitstechnischen Nachweise für die Auslegung und den Betrieb des Reaktorkerns sind daher zu berücksichtigen. Der Umgang mit stärker verformten Brennelementen erfordert des Weiteren besondere Vorsichtsmaßnahmen zur Vermeidung von mechanisch verursachten Schäden an Brennelementen. Die RSK hat im Ergebnis der Beratungen Empfehlungen ausgesprochen, die sicherstellen sollen, dass

- die Eintrittswahrscheinlichkeit für unzulässige BE-Verformungen reduziert wird,
- sicherheitstechnische Nachweise unter Berücksichtigung von gegebenen Brennelementverformungen geführt werden und
- Maßnahmen bei Vorliegen von Schwergängigkeiten von Steuerelementen sowie zum Umgang mit deformierten Brennelementen in den Betriebsvorschriften festgelegt werden.

Die RSK hatte zudem die Stellungnahme „DWR-Neutronenflussschwankungen“ vom 11.04.2013 [1] erstellt, in der zu einem anderen Aspekt des Reaktorkernverhaltens Stellung genommen wurde, der auch mit der mechanischen Auslegung der Brennelemente zusammenhängt.

Auf der Grundlage der beiden RSK-Stellungnahmen wurde von der GRS und dem Physikerbüro Bremen (PhB) im Auftrag des BMU eine Liste von Fragen erstellt, deren Ziel eine Ergänzung bzw. Konkretisierung der Empfehlungen der RSK war und die vom BMU mit der Bitte um Beantwortung an die Aufsichtsbehörden der Länder geschickt wurde.

Eine Auswertung des Rückflusses [3] zu den Fragen ergab, dass zur Thermohydraulik und zu den Neutronenflussschwankungen die Ergebnisse teilweise nicht nachvollziehbar waren und offene Fragen verblieben. Zur mechanischen Auslegung, Prüfung und Überwachung sowie zur Handhabung von Brennelementen wurden die Empfehlungen der RSK als weitgehend umgesetzt bzw. teilweise noch in Bearbeitung eingeordnet.

Auf Basis dieser Auswertung wurde die RSK vom BMU um eine schriftliche Stellungnahme gebeten (Beratungsauftrag [16] vom 10.01.2016), inwieweit aus Sicht der RSK noch offene sicherheitstechnische Fragen im Hinblick auf die oben genannten Themengebiete bestehen. Die RSK beauftragte in ihrer 487. Sitzung am 11./12.10.2016 den Ausschuss Anlagen- und Systemtechnik (AST) mit der Vorbereitung der Stellungnahme. Dabei sollte die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen zur Verringerung der BE-Verbiegungen berücksichtigt werden. Der AST etablierte hierzu eine AG „BE-Verformung“.

2 Beratungsgang

In einem Schreiben vom 14.12.2016 hatte der Ausschuss AST Fragen an die Betreiber u. a. zur Brennelementverformung formuliert und in einer ergänzenden Mail vom 18.01.2017 konkretisiert. Hierzu wurde der Bericht der Betreiber [4] der Geschäftsstelle mit Mail vom 18.09.2017 übersandt. In ihrer 1. Sitzung am 23.11.2017 beriet die AG BE-Verformung die Aufgabenstellung und identifizierte offene Punkte. Sie bereitete eine Liste von Fragen vor, die den Betreibern mit Schreiben vom 02.01.2018 übermittelt wurde, und bat den VGB um vertiefende Erläuterungen zu dieser Thematik. In der 2. Sitzung der AG am 14.02.2018 wurden die Fragen vom BE-Hersteller im Rahmen einer Telefonkonferenz beantwortet. Darüber hinaus hörte die AG einen Bericht der GRS zu noch offenen Fragen bzgl. des Einflusses einer Brennelementverformung auf die Spannungs- und Festigkeitsanalyse von Führungsrohren an.

Beratungsthemen der 3. Sitzung der AG am 27.03.2018 waren die Beantwortung der Fragen der GRS, Berichte der GRS zur statistischen Kühlmittelverlust (KMV, engl.: loss of coolant accident, LOCA) Analyse und zum Einfluss von Brennelementverformungen auf die Leistungsverteilung. Zudem befasste sich die AG mit einer Empfehlung der französischen GPR zur Brennelementverformung.

Auf der 127. Sitzung des AST wurden Stellungnahmen der GPR vom 01./02.04.2015 zu den Grundsätzen der im Rahmen der 4. zehnjährlichen Überprüfung der 900-MW-Reaktoren vorgenommenen Sicherheitsbeurteilung (Avis relatif aux orientations du réexamen de sûreté associé aux quatrièmes visites décennales des réacteurs du palier 900 MWe, 01./02.04.2015) und vom 15.06.2017 zu Brennstabkriterien (Avis et recommandations relatif aux critères de tenue du combustible des réacteurs à eau sous pression, 15.06.2017) beraten. Die AG BE-Verformung wurde daraufhin gebeten, sich auch mit den Stellungnahmen der GPR zu dem Einfluss von Brennelementverformungen zu befassen und hierbei vorliegende Hintergrundinformationen zu berücksichtigen.

Beratungsthemen der 4. Sitzung der AG am 24.05.2018 waren u. a. die Durchsicht der Stellungnahmen der GPR sowie von Hintergrundinformationen des IRSN. Im Ergebnis zeigte sich, dass diese Berichte trotz einer im Detail unterschiedlichen Vorgehensweise keine unbekannteren Aspekte enthielten. In ihrer 5. Sitzung am 16.08.2018 hörte die AG einen Bericht des Herstellers zu den Ergebnissen von KMV-Analysen unter Berücksichtigung von Brennelementverformungen. Zur Vorbereitung der 6. Sitzung der AG am 14.11.2018 wurde den Betreibern mit Mail vom 28.08.2018 eine weitere Liste von Fragen übermittelt, die die AG im Nachgang zu ihrer 5. Sitzung erstellt hatte und die von der Fa. Framatome in der 6. AG Sitzung beantwortet wurden.

Parallel zu den Anhörungen war die AG in die Beratung des Entwurfs einer Stellungnahme eingestiegen. In ihrer 7. und 8. Sitzung am 17.01.2019 und am 06.03.2019 setzte die AG die diesbezüglichen Beratungen fort. Der Ausschuss AST trat in seiner 140. Sitzung am 11.09.2019 in die Beratung der von der AG vorbereiteten Stellungnahme ein und setzte die diesbezüglichen Beratung in seiner 141., 142. und 143. Sitzung am 17.10.2019, am 05.12.2019 und, nach einem Fachgespräch von Mitgliedern der AG mit Vertretern der Firma Framatome am 18.02.2020 in Erlangen, am 19.02.2020 fort. Die Stellungnahme wurde von einer Redaktionsgruppe anhand eingegangener Kommentare in einer Telefonkonferenz am 24.04.2020 sowie im Nachgang zur 144. Sitzung des Ausschusses am 14.05.2020 überarbeitet und im Nachgang zu dieser Sitzung im Umlaufverfahren als Entwurf für die RSK verabschiedet. Die RSK beriet die Stellungnahme in ihrer 515. Sitzung am 17.06.2020 und verabschiedete diese per Umlaufverfahren am 07.07.2020.

3 Beantwortung sicherheitstechnischer Fragestellungen der RSK (RSK-Empfehlungen vom 18.03.15)

Eine Zusammenfassung der Empfehlungen der RSK vom 18.03.15, auf die in diesem Kapitel Bezug genommen wird, ist im Anhang 1 gegeben.

Die nachfolgende Bewertung der RSK geht von der Voraussetzung aus, dass die Verformungen der BE in den von den Betreibern für ihre Untersuchungen herangezogenen Kernen für in Zukunft auftretende Verformungen abdeckend bleiben.

3.1 Konzept der Nachweisführung der Betreiber

Gemäß den RSK-Empfehlungen sind Nachweise zum Einfluss der Verformung auf das kernweit minimale DNB-Verhältnis ($DNBR_{min}$)¹ sowie auf die Heißstab- und Schadensumfanganalyse für KMV-Störfälle erforderlich.

Ziel des von den Betreibern in [4] vorgestellten Konzepts der Nachweisführung ist es zu zeigen, dass die erforderliche Schadensvorsorge bisher sichergestellt war und dass für alle zukünftig eingesetzten Kerne die Auswirkungen von realistisch zu erwartenden BE-Verformungen auf die Einhaltung der DNB- und KMV-Nachweisziele durch die in der Praxis angewandte konservativ deterministische Nachweisführung abgedeckt sind. Damit werden implizit auch die Empfehlungen 1-3 der RSK-Stellungnahme von den Betreibern als erfüllt angesehen.

Für diese Nachweisführung werden exemplarisch Verformungen von BE in Kernen herangezogen, die zum einen gut vermessen wurden und zum anderen große Verformungen aufwiesen. Anhand der expliziten Betrachtung dieser realen Kerne und der hierfür berechneten BE-Verformungen im Leistungsbetrieb (siehe

¹ DNBR (DNB-Ratio) ist das Verhältnis der kritischen zur aktuellen Wärmestromdichte. $DNBR_{min}$ ist das minimale betriebliche Verhältnis der kritischen zur aktuellen Wärmestromdichte (Quelle KTA 3101.1)

Kap. 0) erlauben die Analysen im Vergleich mit den bislang berechneten Margen gemäß den Betreibern auch die sicherheitstechnische Einordnung weiterer Kerne mit hohen Verformungen an BE. Dafür liegen jedoch keine ausreichende Messinformation für die tatsächliche Wasserspaltverteilung im Kern vor.

Da durch geeignete Maßnahmen die Verformung in den letzten Jahren wieder zurückgegangen ist, werden in [4] diese exemplarischen Kernverformungen in Verbindung mit statistisch ermittelten Wasserspaltverteilungen für die KMV-Analysen auch als generisch abdeckend für die Zukunft angesehen.

In [4] wurde folgender Ansatz gewählt:

Ausgehend von deterministisch-konservativen Rechnungen für die o. g. repräsentativen Reaktorkerne mit „geraden“ BE wurden die Änderungen in den für die Nachweise relevanten Parametern (Leistungsdichteverteilung (LDV), DNB) bei Änderung der Spaltweiten zwischen den BE-Reihen als Folge der BE-Verbiegung ermittelt.

Bezüglich der Einhaltung des minimal zulässigen DNB-Verhältnisses ($DNBR_0$)² erfolgte für die exemplarischen Kerne ein Vergleich der aus der Verformung resultierenden Veränderung des minimalen DNB-Verhältnisses mit den in den bisherigen Rechnungen vorhandenen Margen.

Zum Nachweis der Einhaltung der KMV-Kriterien wurde ein statistisches Verfahren angewendet, das auch eine statistische Behandlung für im Kern angesetzte Spaltweiten beinhaltet. Sofern die durch die abgeleiteten Spaltweitenverteilungen hervorgerufenen Effekte durch die vorhandenen Margen in den konservativ-deterministischen KMV-Analysen für nicht-verformte BE abgedeckt sind, ergeben sich nach Auffassung der Betreiber keine Einschränkungen der Kernausslegung im Vergleich zu den bisherigen Auslegungen. Das Prinzip einer solchen Nachweisführung ist auch in der RSK-Stellungnahme zu Anforderungen an die statistische Nachweisführung bei KMV-Analysen von 2015 [7] als mögliches Vorgehen genannt worden.

3.2 Umsetzung der RSK-Empfehlungen 1-3

Die Empfehlungen 1-3 der RSK-Stellungnahme vom 18.03.2015 [2] befassen sich mit dem Einfluss von veränderten Wasserspalten zwischen den Brennelementen infolge von BE-Verbiegungen auf die Leistungsdichteverteilung und auf das minimale DNB-Verhältnis im Reaktorkern.

² $DNBR_0$ ist das im Normalbetrieb minimal zulässige $DNBR$. Es wird so festgelegt, dass bei dessen Einhaltung im Normalbetrieb - in Verbindung mit anderen Auslegungsanforderungen - die Einhaltung der sicherheitstechnischen Anforderungen auf den Sicherheitsebenen 1 bis 4a nachgewiesen werden kann.

3.2.1 Bestimmung der BE-Verformungen im Leistungsbetrieb

Sachverhalt

Gemäß dem Bericht der Betreiber [4] sowie den Antworten des Herstellers [8] erfolgt die Bestimmung der in-core-Spaltweiten wie folgt:

Die Berechnung der BE-Verformung im heißen Kernverbund erfolgt iterativ durch die Kopplung eines mechanischen und eines hydraulischen Modells im nichtlinearen 3D-Finite-Element-Programm KWUSTOSS. Dieses Programm wurde ursprünglich beim Hersteller für statische und dynamische Analysen zum Nachweis der Brennelementintegrität im Normalbetrieb und bei Störfällen entwickelt und dann für die Vorausberechnung der BE-Verbiegung erweitert.

Das mechanische BE-Modell bildet die wesentlichen Eigenschaften (Steifigkeit, Verformungsmoden) des realen BE (inklusive der Führungsrohre, Abstandhalter, Brennstäbe) ab. Durch die im Vergleich zur Temperatur bei der Geradheitsmessung im BE-Lagerbecken höhere Betriebstemperatur des Kerns entstehen thermische Dehnungen (mit Rückwirkung auf die Niederhalterkraft) und die Materialeigenschaften ändern sich. Dies wird im mechanischen Modell berücksichtigt.

Die Berechnungen werden für BOC und EOC separat durchgeführt. Für die Bestimmung der kernweiten in-core-BE-Verformung werden zuerst die im freistehenden Zustand gemessenen ex-core-BE-Verformungen auf das detaillierte mechanische Modell als Anfangsverformung übertragen. Die einzelnen BE-Modelle werden dann als BE-Reihen entsprechend dem Beladeplan zu einem Ganzkernmodell zusammengesetzt.

Zwischen benachbarten BE und zur Kernumfassung ist ein mechanischer Kontakt der Abstandhalter (AH) möglich. Dieser tritt ein, wenn benachbarte BE unterschiedlich stark verformt sind und sich berühren. Dies ist insbesondere zu BOC der Fall und führt gemäß Betreiber z. B. dazu, dass stark verformte BE im Kern „gerichtet“ werden. Da die AH im Modell eine realistische Steifigkeit besitzen, werden auch Veränderungen der AH-Außenmaße durch die Zwängung mit den Nachbarn berücksichtigt. Diese sind jedoch kleiner als 0,1 mm. Die Einhaltung der geometrischen Randbedingungen bei einem Kontakt erzeugt elastische BE-Deformationen.

Im Kernverbund werden die BE zusätzlich zu den mechanischen Belastungen aus dem Kontakt mit den Nachbar-BE oder mit der Kernumfassung mit den folgenden Kräften belastet:

- Axiale Strömungskräfte auf Brennstäbe
- Axiale Strömungskräfte auf AH
- Niederhalterkraft auf den Kopf
- Laterale Strömungskräfte

KWUSTOSS beinhaltet ein Modul, um diese Kräfte in der Modellierung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung zwischen den BE und der Kühlmittelströmung im Kern zu berücksichtigen.

Bei Durchströmung des Kerns mit dem Kühlmittel entstehen dadurch, dass die BE im Kern nicht gerade sind, zusätzlich veränderte Querströmungen. Diese wiederum erzeugen laterale Kräfte vornehmlich auf die AH und zusätzliche elastische BE-Verformungen. Die lateralen Kräfte werden BE-reihenweise mit einem hydraulischen Modell berechnet.

Der Einfluss der Strömung im Kern auf verformte Brennelemente ist von der Fa. Framatome experimentell untersucht worden. Das Berechnungsmodell wurde mit den Versuchen validiert und kann deren Ergebnisse reproduzierbar nachrechnen [17].

Die Berechnung des Gleichgewichts der BE-Verformungen im Betriebszustand erfolgt nun iterativ: Abwechselnd werden die lateralen Kräfte mit dem Hydraulikmodell und die elastischen Verformungen mit dem mechanischen Modell berechnet, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wird. Dieser konvergierte Gleichgewichtszustand ist die Grundlage für die Ableitung der Verformung im Betriebszustand. Weitere Informationen zur Methode, Beispiele zur Validierung sowie Anwendungen sind in [5] enthalten.

Zur Frage der AG, wie und mit welchen Resultaten die Ergebnisse der Bestimmung der kernweiten BE-Verformung unter Betriebsbedingungen auf Basis der im kalten Zustand gemessenen Verformungen validiert wurden, führte der Hersteller aus, dass best-estimate Rechnungen durchgeführt wurden, deren Resultate anhand der gemessenen Brennelementverformungen validiert wurden und verweist dazu auf [17].

KWUSTOSS wird auch zur Vorhersage von BE-Verformungen verwendet. Dazu wird auf Basis des BOC-Zustands eine Vorausberechnung des in-core-EOC-Zustands durchgeführt. Hieraus ist dann eine Vorhersage des Verformungszustands der BE ex-core nach ihrem Einsatz möglich. Diese Option erlaubt somit einen direkten Vergleich mit den Daten der Geradheitsmessungen, so dass dadurch eine weitergehende Verifikation des Gesamtsystems vorliegt. Nach Aussagen des Herstellers [17] zeigte der Vergleich der beobachteten Verformungen mit den vorhergesagten Verformungen nach Einsatz eine sehr gute Übereinstimmung mit Abweichungen in der Größe von etwa ± 1 mm, was der Unsicherheit bei der Geradheitsmessung entspricht.

Weiterhin führte der Hersteller aus, dass die Ursachen der Brennelementverformung verstanden sind, was sich auch in der inzwischen gelungenen Verringerung der Verformungen durch die Einführung von Brennelementen mit höherer Quersteifigkeit zeigt. Zudem ist es gelungen, die Biegeamplituden einzelner vorverformter Brennelemente durch Einsatz in weitgehend begradigten Kernen wieder zu verringern.

Die Zustandsänderung vom kalten in den warmen Zustand der Brennelemente erzeugt vergleichsweise geringe Spannungen, so dass aus Sicht des Herstellers im Hinblick auf die Brennelementverformung nicht von einem unerkannten reversiblen Verformungszustand auszugehen ist. Weitere Effekte, die im heißen Zustand zu einer anderen Verformung führen und die bei der Vorhersage des Verformungszustands der BE ex-core wieder aufgehoben werden, sind aus Sicht des Herstellers nicht erkennbar bzw. lassen sich aus den modellierten Effekten nicht ableiten.

Aus den nominalen Wasserspalten zwischen den BE sowie den berechneten in-core-Verformungen der BE lassen sich die zugehörigen Wasserspalte während des Betriebs ermitteln. Als Wasserspalt wird dabei der Abstand zwischen zwei benachbarten Abstandhaltern definiert, der durch den in der Kernreihe zur Verfügung

stehenden Gesamtpalt limitiert ist. Spaltverkleinerungen sind durch den Kontakt mit dem Nachbar-BE begrenzt. Der axiale Verlauf der Wasserspalte wird charakterisiert durch typische Biegemuster (S-förmig, C-förmig, Lage des „Bauches“) und die maximale Wasserspaltgröße.

Weiterhin nahm der Hersteller zur Frage Stellung, inwieweit die Leistungsverteilung Einfluss auf die Spaltweite hat.

Demnach gibt es für einzelne Reaktoren anlagentypische Verformungsmuster, die sich über mehrere Zyklen hinweg als stabil erwiesen haben (z. B. hinsichtlich Vorzugsrichtungen oder Verbiegungsformen). Die Ausbildung dieser Muster wird hauptsächlich mit der Nachladung desselben BE-Designs und dem typischen Umsetzen der BE beim BE-Wechsel in Zusammenhang gebracht. Zusammen mit den lateral wirkenden Kräften aufgrund der Querströmungen bilden sich weitgehend stabile längerfristige Verformungsmuster im Kern aus. Diese Effekte werden vom Hersteller als bedeutender angesehen als mögliche Einflüsse der BE-Leistung auf die Spaltweite und können auch die beobachtete schwache Korrelation zwischen Leistung und Brennelementverformung erklären.

Im Zusammenhang mit der Empfehlung 5 der RSK, dass bei Steuerelementen mit erkennbarem Trend zu höheren Fallzeiten weitergehende Messungen durchgeführt werden sollen, wird von den Betreibern angemerkt, dass unterschiedliche Biegeformen zu gleichen Fallzeiten führen können. Entscheidend seien die Krümmungsradien und Biegeamplituden, die sich bei den jeweiligen Biegeformen einstellen. Die Eigenschaften des Steuerelements spielten ebenfalls eine Rolle. Eine eindeutige Zuordnung der Fallzeit zu Brennelementverformungen sei mit einfachen Mitteln nicht möglich.

Bewertung

Aus Sicht der RSK bestätigt die Tatsache, dass es in den letzten Jahren zu einem Rückgang der BE-Verformungen gekommen ist, dass ein Verständnis der wesentlichen Ursachen der BE-Verformungen erreicht wurde.

Vor diesem Hintergrund ist aus Sicht der RSK auch der Ansatz, die berechneten in-core-Verformungen durch eine Vorausberechnung der zu erwartenden EOC ex-core-Verformung und einen Abgleich mit tatsächlichen EOC ex-core-Messungen durchzuführen, für eine Validierung des Modells grundsätzlich geeignet. Allerdings findet auch der Abgleich der berechneten EOC-Werte wieder mit den im kalten Zustand gemessenen ex-core-Werten statt. Die RSK sieht keinen Hinweis darauf, dass bei der Berechnung des Übergangs aus dem kalten in den heißen Betriebszustand und der erneuten Rückrechnung in den kalten Betriebszustand relevante Effekte nicht berücksichtigt werden.

Für den tatsächlichen in-core-Zustand unter Betriebsbedingungen können zwar durch Indikatoren, wie die Fallzeitmessungen der Steuerstäbe, qualitative Aussagen dahingehend getroffen werden, dass die vorliegenden Verformungen geringer sind als in den Fällen, in denen es zu verlängerten Fallzeiten kam. Eine quantitative Aussage über tatsächliche bzw. maximale BE-Verformungen kann aber nach Aussage der Betreiber aus diesen Indikatoren derzeit nicht abgeleitet werden.

Zur Frage, inwieweit die bei der Bestimmung der BE-Verformungen unter Betriebsbedingungen relevanten Unsicherheiten quantitativ ermittelt und Sensitivitätsanalysen durchgeführt wurden, führte der Hersteller aus, dass die Unsicherheiten in den einzelnen Parametern nicht explizit berücksichtigt wurden. Die sich aus den BE-Verformungen ergebenden Wasserspaltverteilungen sind gemäß [4] als best-estimate-Wasserspaltverteilungen zu verstehen; Unsicherheiten in den ermittelten Wasserspaltverteilungen können in den nachfolgenden Analyseschritten durch die statistische Behandlung dieser Verteilungen berücksichtigt werden.

Vor dem oben diskutierten Hintergrund, dass zwar eine Unsicherheit bzgl. der in-core-Verformungen der BE im Betriebszustand vorliegt, die Modellberechnungen zur Verformung jedoch zusätzlich im kalten Zustand experimentell validiert wurden und auch die darauf basierenden Vorhersagen für zu erwartende Verformungen im Rahmen der Unsicherheiten der Geradheitsmessungen mit den tatsächlichen Verformungen übereinstimmen, sieht die RSK es als ausreichend an, die Unsicherheit in der Berechnungskette durch die statistische Behandlung von im Reaktorkern vorhandenen Wasserspaltverteilungen (d. h. von unterschiedlichen Spalttypen und zugehörigen Spaltweiten sowie deren räumlicher Verteilung im Kern) implizit mit zu berücksichtigen.

3.2.2 Nachweisführung Leistungsdichteverteilung und DNB

Sachverhalt

In [4] werden methodische Weiterentwicklungen zur Bestimmung der Auswirkungen veränderter Spaltweiten auf die lokale Leistungsdichte vorgestellt, zum einen auf Basis des CASCADE 3D Codes (AREVA), zum anderen auf Basis von CASMO5/SIMULATE5 (Studsvik/PreussenElektra), sowie die Ergebnisse von Anwendungen dieser Methoden auf verschiedene Reaktorkerne dargestellt. Es wurden umfangreiche Ex-core Geradheitsmessungen für solche Zyklen durchgeführt, die hinsichtlich der Steuerelement-Fallzeiten, Handhabungsschwierigkeiten, BE-Schäden oder im vorherigen Zyklus gemessener hoher Verformungswerte (Abweichungen der Mittellinien zwischen geradem und verformtem BE) auffällig waren. Konkret handelt es sich um die KBR Zyklen 25-27 mit maximalen ex-core gemessenen Verformungen von ca. 21 mm (berechnet in-core 14 mm) sowie um den GKN II Zyklus 28 mit einer maximalen ex-core Verformung von ca. 15 mm (berechnet in-core 9 mm). Für die KBR Kerne ergeben sich aus den Analysen mit CASMO5/SIMULATE5 für die Zyklen 25-27 Erhöhungen in der maximalen Stablängenleistung von 2 W/cm, 6 W/cm bzw. 34 W/cm (siehe Tabelle 2 in [4]), für den GKN II Kern, berechnet mit CASCADE 3D, von 30 W/cm (siehe Tabelle 1 in [4]).

Die für diese Reaktorkerne und BE-Verformungen ermittelten Auswirkungen auf die DNB-Verhältnisse betragen für die KBR Kerne für die Zyklen Z25, Z26 und Z27 eine maximale Verringerung von 2 – 3 % (DNB-Punkte) und für den GKN II Kern von 10 DNB-Punkten (siehe [4], Tabelle 2 bzw. S. 24). Gemäß den Ausführungen der Betreiber in [4] sind mit den betrachteten Kernen ungünstige Verformungsbedingungen quantifiziert worden, die für aktuelle und zukünftige Kerne mit gleichbleibenden oder verringerten Verformungsniveaus als abdeckend angesehen werden können.

Typische $DNBR_{min}$ -Werte für Anlagen mit 16x16-BE liegen gemäß Tabelle 2 des VGB-Berichts [4] im Bereich 2,3 bis 2,5.³ Damit seien Auswirkungen in der Größe von 10 DNB-Punkten durch in der Praxis der Nachweisführung enthaltene konservative Annahmen (gemäß [10] insbesondere die Nicht-Berücksichtigung von Rückkopplungen zwischen Neutronik und Thermohydraulik) deutlich abgedeckt, so dass keine Notwendigkeit besteht, die Auswirkungen von BE-Verformungen auf die DNB-Verhältnisse zyklusspezifisch zu bestimmen.

Bewertung

Berücksichtigung von Unsicherheiten der Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Auswirkungen auf lokale Leistungsdichten bzw. DNB-Bedingungen:

Im Zuge der Beratungen zur Berücksichtigung der Unsicherheiten in den Analyseergebnissen hat sich die AG insbesondere auch mit Unsicherheiten der angewandten Codes zur Leistungsdichtebestimmung (CASCADE-3D bzw. CASMO5/SIMULATE5) befasst. Hierzu verweisen die Betreiber auf Ergebnisse von Vergleichsrechnungen mit „Referenzcodes“ (CASMO3/APOLLO-A bzw. MCNP). Gemäß diesen Ergebnissen liegen die höchsten Unter- und Überschätzungen der lokalen Leistungsdichte für Hochleistungsstäbe und für einen Zusatzspalt von 1 cm symmetrisch im Bereich 10 % bis 15 % bei einer Standardabweichung von 5% (im Fall einer Konstellation von MOX/ UO_2 -Brennelementen lag eine Überschätzung von 27 % vor). Aus Sicht der Betreiber müssen diese Unsicherheiten nicht gesondert berücksichtigt werden, sondern können im Rahmen der gesamten Nachweisführung beachtet werden.

Insgesamt stufen die Betreiber die in [4] vorgenommenen „exemplarischen“ Anwendungen der Verfahren auf einzelne Kerne im Ergebnis als „hinreichend realistisch“ ein. Allerdings liegen bislang keine Untersuchungen vor, anhand derer eine quantitative Bewertung der Unsicherheiten, die mit den in [4] vorgelegten Analysen zu den Auswirkungen geänderter Wasserspaltweiten auf die lokalen DNB-Bedingungen einhergehen, vorgenommen werden könnte.

Angesichts der insgesamt in den DNB Analysen vorhandenen Vereinfachungen, Näherungen oder best-estimate Ansätzen (bspw. bei der Ermittlung der unterschiedlich möglichen Wasserspaltverteilungen im Reaktorkern und der hieraus resultierenden lokalen Leistungsdichte) sollten aus Sicht der RSK die aus den möglichen Wasserspaltverteilungen resultierenden Unsicherheiten im DNB Verhalten eingegrenzt werden. Wie in der RSK Empfehlung 3 [2] angesprochen⁴ sollten hierfür Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt werden (siehe die im nachfolgenden Abschnitt formulierte Empfehlung).

³ $DNBR_{min}$ ist das minimale betriebliche DNB-Verhältnis.

⁴ „Zur Absicherung der vorliegenden exemplarischen Erkenntnisse zum Einfluss von BE-Verformungen auf das kernweit minimale DNB-Verhältnis $DNBR_{min}$ sollten zusätzliche Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden.“

Abdeckender Charakter der durchgeführten Analysen:

Mittels der in [4] dargestellten Analysen soll anhand von exemplarischen Kernen, die zum einen gut vermessen wurden und zum anderen große Verformungen aufwiesen, generisch gezeigt werden, dass bei Berücksichtigung von in der Vergangenheit aufgetretenen bzw. zukünftig zu erwartenden BE-Verformungen die Nachweiskriterien des Regelwerks mit Abstand eingehalten wurden bzw. werden und zyklusspezifische Nachweise zu den Auswirkungen von BE-Verformungen daher nicht erforderlich sind.

Vor dem Hintergrund, dass

- bei einer Verringerung des DNBR von bspw. 0,1 infolge geänderter Spaltweiten, wie für den exemplarischen GKN II Kern gemäß [4] ermittelt, zwar noch erhebliche DNB Margen vorhanden sind, andererseits aber bislang keine Sensitivitätsanalysen vorgelegt wurden, anhand derer eine Eingrenzung der Unsicherheiten infolge geänderter Spaltweiten vorgenommen werden könnte, und,
- solche Sensitivitätsanalysen für eine Bestätigung des abdeckenden und generischen Charakters der vorgelegten exemplarischen DNB Analysen von der RSK für erforderlich angesehen werden,

empfiehlt die RSK:

Die bei der Ermittlung des DNB Verhaltens infolge geänderter Wasserspalte im Reaktorkern zu berücksichtigenden Unsicherheiten sollten mittels geeigneter Sensitivitätsanalysen bestimmt werden. Methodisch können aus Sicht der RSK diese Analysen analog zu den statistischen KMV-Analysen generisch auf Basis der in [4] ausgewählten Reaktorkerne (bzw. Zyklen) und Wasserspaltverteilungen erfolgen. Die Ergebnisse (z. B. minimales DNBR mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % und einer statistischen Sicherheit von mindestens 95 %) sind in Relation zu den vorhandenen DNB Margen bei den führenden Transienten zu bewerten. (**Empfehlung**)

Kernüberwachung:

In der RSK Empfehlung 1 wird gefordert, dass eine relevante Erhöhung der maximalen lokalen Leistungsdichte bei der Ermittlung der tatsächlichen maximalen Leistungsdichte aus den Messwerten berücksichtigt werden muss.

Von den Betreibern wird hierzu angeführt [4], dass für die Einhaltung der Auslegungsgrenzen das konsistente Ineinandergreifen der Elemente Kernüberwachung und Nachweisführung erforderlich ist und gemäß dem kerntechnischen Regelwerk die in der Kernüberwachung maximale zulässige Leistungsdichte die Leistungsdichte ist, bei der unter Berücksichtigung aller relevanten Unsicherheiten (hier: insbesondere Effekte aus nicht-nominalen Wasserspalten) die sicherheitstechnischen Nachweise erfolgreich geführt werden können. Die in [4] dargestellten Nachweise zeigen, dass bei Berücksichtigung nicht nominaler Wasserspalte die Nachweise erfolgreich geführt werden können.

Die RSK stellt zunächst fest, dass es infolge nicht-nominaler Wasserspalte lokal zu Leistungsdichteänderungen kommen kann, die von der Kerninstrumentierung ggf. nicht registriert werden, wenn diese Änderungen nicht nah genug an Detektorpositionen vorliegen. Da jedoch gezeigt wurde, dass die Störfallanalysen zur Einhaltung der Nachweiskriterien Reserven bezüglich der Leistungsdichtewerte aufweisen, die größer sind als der mögliche Effekt nicht-nominaler Wasserspalte, ist es aus Sicht der RSK nicht erforderlich, die Messwerte der Leistungsdichteüberwachung dahingehend zu pönalisieren, dass die Effekte aus nicht-nominalen Wasserspalten abgedeckt werden. Die Aufgabe, den Wert der Leistungsdichte so zu begrenzen, dass Ausgangszustände für zu berücksichtigende Störfälle eingehalten werden (Schutzbegrenzung), wird bei einem solchen Vorgehen durch eine abdeckende Störfallanalyse erfüllt. Die RSK hat daher keine Einwände gegen das methodische Vorgehen der Betreiber.

3.2.3 Nachweisführung KMV (Methode der statistischen Nachweisführung)

3.2.3.1 Nachweisführung KMV ohne Berücksichtigung geänderter Spaltweiten

Zum Nachweis der Einhaltung der KMV-Kriterien wird von den Betreibern ein statistisches Verfahren angewendet. Das Vorgehen hierzu ist in der auf der 143. AST-Sitzung verabschiedeten Empfehlung behandelt und bewertet worden [11]. Zum Verständnis der Zusammenhänge sind im Folgenden die wesentlichen Sachverhalte wiedergegeben, die zu dieser Empfehlung führten.

Kerntechisches Regelwerk

Die „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ [6] legen fest, dass die anzusetzenden Anfangszustände bei einer Nachweisführung mit Verwendung statistischer Verfahren mittels realistischer Parameterwerte unter Einbeziehung ihrer Unsicherheitsbandbreite zu erfassen sind. Die Unsicherheiten, die mit dem jeweiligen Analyseergebnis verbunden sind, sind in ihrer Gesamtheit zu quantifizieren und zu berücksichtigen. Hierfür sind die Parameter (Anfangs- und Randbedingungen sowie Modellparameter) und Modelle zu identifizieren, die die Ergebnisunsicherheiten wesentlich beeinflussen und die gemäß dem aktuellen Kenntnisstand vorhandenen Unsicherheitsbandbreiten mitsamt den Verteilungen der identifizierten Parameter zu quantifizieren. Bei der Ermittlung der Gesamtunsicherheit mit statistischen Verfahren ist die in Richtung des Nachweiskriteriums gehende einseitige Toleranzgrenze zu ermitteln, wobei die Einhaltung des Nachweiskriteriums mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % und einer statistischen Sicherheit von mindestens 95 % nachzuweisen ist.

Die RSK-Stellungnahme der 475. Sitzung am 15.04.2015 [7] gibt in Bezug auf die Nachweisführung bei Kühlmittelverluststörfällen als übergeordneten Bewertungsmaßstab für eine Störfallanalyse vor, dass die Einhaltung der Nachweiskriterien mit einer hohen Aussagesicherheit nachgewiesen wird. Bei einer Nachweisführung mit Verwendung statistischer Verfahren muss die gewonnene Aussage für die Gesamtheit der Brennstäbe gelten. Deshalb ist bei einer Nachweisführung mit statistischer Behandlung von Unsicherheiten das Nachweiskriterium so anzuwenden, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % bei einer statistischen Sicherheit von mindestens 95 % höchstens ein Brennstab das Nachweiskriterium überschreitet. Aus Sicht der RSK kann ein Verfahren herangezogen werden, das eine Aussage über die Gesamtheit der

Brennstäbe gewinnt, indem eine hinreichend große Menge der ungünstigen realen Brennstäbe im Kern analysiert wird. Dazu kann aus der Gesamtzahl der Brennstäbe im Reaktorkern oder der Gesamtzahl der Rechenfälle eine Vorauswahl z. B. aufgrund von Rechenergebnissen für den Brennstabzustand vor einem Kühlmittelverluststörfall oder ingenieurmäßigen Bewertungen getroffen werden, um die Anzahl der erforderlichen thermohydraulischen Rechnungen auf einen handhabbaren Umfang zu beschränken.

Die RSK-Stellungnahme der 475. Sitzung gibt vor, dass für die Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen abdeckend von Volllastzuständen auszugehen ist. Für die integrale Leistung und die maximale lokale Leistungsdichte sind des Weiteren neben der Zyklusvorausplanung und der Betriebserfahrung die im Zyklus zu erwartenden Fahrweisen aufgrund von Ansprechwerten für Begrenzungen und ggf. auch weitere vorhandene Maßnahmen und Einrichtungen (z. B. administrative Vorgaben für Lastzyklen) zu beachten, die die Einhaltung der den Analysen zugrunde gelegten Werte bzw. Werteverteilungen sicherstellen. Bei der maximalen Leistungsdichte sind zusätzlich die Auswirkungen von Brennelementverformungen zu bewerten und ggf. zu berücksichtigen.

Sachverhalt

Der VGB hat die Umsetzung der Anforderungen der „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ [6] und der „RSK-Stellungnahme der 475. Sitzung“ [7] für die Nachweisführung mit Verwendung statistischer Verfahren bei Kühlmittelverluststörfällen in [4] beschrieben.

Die statistische KMV-Heißstabanalyse ist ein wesentliches Element der Nachweisführung. Basierend auf einer Kernbelegung für einen Zyklus unter Berücksichtigung der vorhergehenden Zyklen wird mit Hilfe eines Kernsimulators die Leistungsverteilung als Funktion der Zeit sowie der Abbrände bestimmt. Ein stationärer Brennstabcode bestimmt den Brennstabzustand zu KMV-Beginn für alle Nachweisstäbe, die „heißen“, d. h. der in der Leistung führenden Brennelemente und Brennelemente im Umgebungs kanal und im Restkern. Bei der statistischen KMV-Heißstabanalyse werden mit einem thermohydraulischen Systemcode und einem transienten Brennstabcode danach die Störfallanalyse und die KMV-Heißstabanalyse für den Kühlmittelverluststörfall (2F-Bruch) durchgeführt.

Bei der Ermittlung von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bezüglich Leistung und Leistungsdichte werden gemäß RSK-Stellungnahme [7] für die Reaktorleistung Werte bis zu 106 % sowie für die Leistungsdichte Werte bis zum zweiten Ansprechwert des Reaktorleistungsbegrenzungs systems berücksichtigt.

Im Hinblick auf die Unsicherheiten der Leistungsdichte wurde von den Betreibern für den ungünstigsten Fall (MOX-Brennstoff) ein 1-Sigma-Wert von 3,5 % für die Leistungsdichteverteilung ermittelt, der konservativ abdeckend für alle Brennstäbe angesetzt wird. Um sicherzustellen, dass die statistische Verteilung bis zu dem durch die Begrenzungseinrichtungen vorgegebenen Wert reicht, werden die Ränder der Unsicherheit der Leistungsdichteverteilung mit $\pm 3\sigma$ festgelegt, sofern mit 3σ der GW2 (KMV-Grenzwert) eingeschlossen ist bzw. mit $n\sigma$ ($n > 3$) um den GW2 zu erreichen.

Das statistische Kriterium für die maximale Hüllrohrtemperatur „höchstens ein Brennstab überschreitet das Nachweiskriterium mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % bei einer statistischen Sicherheit von mindestens 95 %“ erfordert, dass neun zufällig ermittelte Parametersätze pro Brennstab und damit für den Gesamtkern ca. 500.000 (Vorkonvoi, Konvoi) Rechnungen durchzuführen sind [4].

Um die Anzahl der detaillierten thermohydraulischen Analysen mit S-RELAP zu begrenzen, wird die maximale Hüllrohrtemperatur (Maximum der Hüllrohrtemperaturen beim ersten bzw. zweiten Peak) während eines Kühlmittelverluststörfalls (2F-Bruch) für alle ca. 500.000 Rechenfälle mit Hilfe einer auf einer multiplen linearen Regression beruhenden Korrelation näherungsweise bestimmt. Diese Anlagen- und Störfall-spezifische Korrelation für die maximale Hüllrohrtemperatur (PCT) wird aus den Ergebnissen von detaillierten Variationsrechnungen (am Beispiel eines Kerns von KKP-2) abgeleitet, die die wesentlichen, mit Unsicherheiten behafteten Eingabe- und Modellparameter für den Thermohydraulik (TH)-Code (Brennstabzustände, insbesondere Stablängenleistungen und gespeicherte Energien, Reaktorparameter zu KMV-Beginn und Modellparameter des TH-Codes S-RELAP) berücksichtigen. Die Standardabweichung zwischen den mit dieser Korrelation ermittelten PCT und den PCT aus den S-RELAP-Analysen beträgt im Bereich hoher PCT ca. 15 – 20 K.

Die Ergebnisse der Korrelation für die maximale Hüllrohrtemperatur für die ca. 500.000 Rechenfälle werden in absteigender Reihenfolge der maximalen Hüllrohrtemperatur sortiert. Danach werden volle TH-Rechnungen mit S-RELAP beginnend für die Brennstäbe mit den höchsten Hüllrohrtemperaturen gemäß der Vorhersage durch die Korrelation durchgeführt. Nach der Abarbeitung einer gewissen Zahl an S-RELAP-Rechnungen und einem hinreichenden Abstand der maximalen Hüllrohrtemperatur des zuletzt durchgeführten Rechenlaufs zur bis dahin ermittelten maximalen Hüllrohrtemperatur werden keine weiteren S-RELAP-Rechnungen mehr durchgeführt [9].

Bzgl. der Auffassung der RSK, dass auch Volllastzustände mit einem ausgeprägten Maximum der Stablängenleistung in der oberen Kernhälfte (Leistungsdichteverteilung mit Peak oben) in den Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu berücksichtigen sind, gehen Betreiber und Hersteller in ihrer Analyse aus ihrer Sicht konservativ vor, indem für die verschiedenen Zykluszeitpunkte (BOC, MOC, EOC) die typische im Betrieb auftretende axiale Leistungsdichteverteilung (näherungsweise trapezförmig, außer beim Erstkern) über ihre gesamte Länge mit einem Faktor multipliziert wird, der aus der nach Betriebsdaten statistisch ermittelten, bis zum KMV-Ansprechwert verlängerten normierten Verteilungskurve der maximalen Leistungsdichte statistisch ausgewählt wurde (sogenanntes würfeln). Eine nicht durch Betriebserfahrungen ableitbare Umverteilung zu einer axialen Leistungsdichteverteilung mit Peak oben kommt dabei zwar nicht zustande, aber evtl. hohe lokale Leistungsdichten in der oberen Kernhälfte sind dadurch statistisch abgedeckt. Betreiber und Hersteller begründen diese Verfahrensweise u. a. damit, dass die gewählte Variationsmethode für die lokale Stablängenleistung zu konservativen Ergebnissen in Bezug auf die Hüllrohrtemperatur führe.

Bzgl. des gemäß SiAnf bei statistischen KMV-Analysen zu berücksichtigenden ungünstigsten Zykluszeitpunkts wird in den Unsicherheitsanalysen von Betreibern und Hersteller gezeigt, dass kein signifikanter Unterschied der maximalen PCT als Funktion des Zykluszeitpunkts erkennbar ist.

Bewertung

Insgesamt ergibt sich aus [11] und den darin erörterten Fragen aus Sicht der RSK, dass das Konzept der Betreiber [4] für ein statistisches Verfahren zum Nachweis der Einhaltung von Nachweiskriterien für die maximale Hüllrohrtemperatur bei KMV nachvollziehbar ist und grundsätzlich den diesbezüglichen Vorgaben der RSK in [7] entspricht. Eine statistische KMV-Analyse, bei der auch der Zykluszeitpunkt statistisch variiert worden ist, soll jedoch jeweils daraufhin bewertet werden, ob ein für die maximale Hüllrohrtemperatur signifikant ungünstiger Zykluszeitpunkt identifiziert werden kann. In einem solchen Fall sollte eine dedizierte statistische KMV-Analyse für diese(n) Zykluszeitpunkt(e) durchgeführt werden, andernfalls ist eine statistische Einbeziehung des Zykluszeitpunkts ausreichend. Aus den vorliegenden statistischen Analysen ist ersichtlich, dass für die drei untersuchten Zykluszeitpunkte (BOC, MOC, EOC) kein relevanter Unterschied in der Verteilung der maximalen Hüllrohrtemperaturen auftritt [15].

Die Ergebnisse zeigen, dass die statistische KMV-Analyse im Vergleich zur konservativen deterministischen KMV-Analyse deutlich niedrigere maximale Hüllrohrtemperaturen aufweist (868 °C im Vergleich zu 1.005 °C [9]) und Nachweise mit der konservativen deterministischen KMV-Analyse somit abdeckend sind.

3.2.3.2 Nachweisführung KMV mit Berücksichtigung geänderter Spaltweiten

Gegenstand dieser Stellungnahme sind bzgl. der statistischen KMV-Analyse die Änderungen, die sich aufgrund veränderter Spaltweiten infolge der BE-Verformung ergeben, wie dies in der RSK-Stellungnahme der 475. Sitzung [7] gefordert ist.

Sachverhalt

Als Grundlage für eine statistische Analyse zur Berücksichtigung der Brennelementverformungen wurden Biegemessungen aus den Jahren 2012 und 2013 für den Zyklus 25 in KBR und den Zyklus 28 in GKN-II ausgewählt [4], die eine verlässliche Klassifizierung nach Spalttypen und eine statistische Auswertung der Spaltweiten erlauben und die hinsichtlich der größten gemessenen Spaltweiten nach Aussage der Betreiber abdeckend für die künftig zu erwartenden Verhältnisse sind. Die Verformungsdaten zu BOC und EOC wurden so aufbereitet, dass sie als Basis für die Erzeugung von statistisch variierten Wasserspaltdaten für den ganzen Kern (in-core, heißer Zustand) verwendet werden können. Durch die Berücksichtigung dieser beiden Anlagen werden sowohl Kerne mit S-förmigen Verformungen als auch Kerne mit C-Verformungen in der Datenbasis erfasst. Nach der Klassifizierung aller Wasserspalte (in zehn Spalttypen) wird spalttypweise eine statistische Auswertung durchgeführt. Aufgrund der geometrischen Randbedingungen der äußeren BE an der Kernumfassung treten große Wasserspalte gemäß [4] mit erhöhter Wahrscheinlichkeit am Kernrand auf. Im Fachgespräch [12] wurde dargestellt, dass beim angewendeten statistischen Auswahlverfahren (im Folgenden vereinfacht Würfelverfahren genannt) insbesondere folgende Maßnahmen zur relativen Erhöhung der Häufigkeit großer Wasserspalte im Kern getroffen wurden:

- es werden nur Spalttypen gewürfelt, welche potenziell große Wasserspalte im Kern bedingen,

-
- Randspalte und Innenspalte werden nicht getrennt gewürfelt (dadurch wird die Eintrittswahrscheinlichkeit für größere Innenspalte erhöht).

Der Spalt zwischen zwei frischen Brennelementen ist der nominelle Wasserspalt. Basierend auf den wie oben genannt ermittelten Spaltverteilungen werden durch ein Würfelverfahren zufällige Spaltverteilungen ermittelt. Dabei werden von den zehn klassifizierten Spalttypen die fünf Spalttypen berücksichtigt, bei denen hinreichend große Spalte auftreten (z. B. Verformung von zwei Brennelementen in entgegengesetzter Richtung). Beim Würfelverfahren wird wie folgt vorgegangen:

- Würfeln einer Spaltposition in der zu betrachtenden Reihe/ Spalte. Wurde diese Position schon einmal gewürfelt, dann wird das Würfeln wiederholt.
- Würfeln des Spalttyps.
- Würfeln der Spaltbreite entsprechend Spalttyp und Spaltklasse (Innen- oder Randspalt).
- Prüfung, ob Kompatibilitätsbedingung (Summenrestspalt > 0 mm) erfüllt ist.
- Prüfung, ob der Summenrestspalt der Reihe/Spalte in einer beliebigen AH-Ebene kleiner als ein Schwellwert (9 mm) ist. Falls der Schwellwert unterschritten wird, ist das Würfelverfahren für diese Reihe/ Spalte abgeschlossen.

Abschließend wird der Summenrestspalt einer jeden Reihe bzw. Spalte und für jede AH-Position auf die Spaltpositionen gleichmäßig verteilt, welche nicht gewürfelt wurden.

Mit diesem Würfelverfahren werden für 300 Wasserspaltverteilungen BOC-, MOC- und EOC-Zustände erzeugt. In einem weiteren Schritt wird die Berechnung der Leistungsdichteverteilung beispielhaft für einen KKP-2 Kern mit Hilfe des AREVA-Codes CASCADE-3D durchgeführt. Der 95 % / 95 % Wert für die maximale Stablängenleistung bei den 300 gewürfelten Wasserspaltverteilungen beträgt für den KKP-2 Kern bei BOC 463 W/cm. Der Mittelwert für die maximale Stablängenleistung beträgt bei BOC 436,4 W/cm (siehe Tabelle in [13]).

Für die aus der gemessenen Wasserspaltverteilung abgeleitete Wasserspaltverteilung im Betrieb im Zyklus 25 von KBR wurde bei BOC eine maximale Stablängenleistung von 448,2 W/cm berechnet und im Zyklus 28 von GKN-2 eine von 439,4 W/cm [4].

Der VGB Bericht [4] kommt zu dem Schluss, dass der Vergleich der mit statistischen Methoden abgeleiteten 95 % / 95 %-Werte mit den ebenfalls bestimmten Maximalwerten unter Verwendung der „gemessenen Verteilungen“ die Konservativität der angewandten statistischen Vorgehensweise belegt und dass somit das Verfahren des Würfelns von Wasserspalten geeignet ist, deren Einfluss auf die Leistungsdichteverteilung für die statistische KMV-Heißstabanalyse adäquat abzubilden.

Bewertung

Aus Sicht der RSK ist im Hinblick auf das oben beschriebene Verfahren der Betreiber, mit dem der Einfluss geänderter Spaltweiten auf die Leistungsdichteverteilung für die statistische KMV-Heißstabanalyse ermittelt werden soll, zu bewerten, inwieweit dieses Verfahren geeignet ist, die Auswirkungen geänderter Spaltweiten hinreichend zu erfassen.

Hierzu kommt die RSK zu folgenden Ergebnissen:

- Die auf Basis der herangezogenen Biegemessungen aus den Jahren 2012 und 2013 für den Zyklus 25 in KBR und den Zyklus 28 in GKN-II erzeugten 300 Wasserspaltverteilungen, jeweils für BOC- und EOC-Zustände, sowie für 300 interpolierte MOC-Zustände, liefern eine gute Abdeckung der Häufigkeiten der einzelnen Spalttypen und vor allem der maximalen Spaltweiten in den Kernen von KBR und GKN-2.
- Die Anwendung dieser Wasserspaltverteilungen anhand eines KKP-2 Kerns (Zyklus 22) ergibt Verteilungen der maximalen Stablängenleistungen, die mit ihren Mittelwerten in der Nähe der für die herangezogenen Wasserspaltverteilungen in den Anlagen KBR bzw. GKN II berechneten Maximalwerte liegen und mit ihrem oberen Ausläufer nahe an den LOCA-Ansprechwert der Peak-RELEB heranreichen.
- Die Auswahl der für die Anwendung des Verfahrens herangezogenen Biegemessungen aus den Jahren 2012 und 2013 für den Zyklus 25 in KBR und den Zyklus 28 in GKN-II ist sachgerecht. Diese Messungen decken zwar nicht zwingend alle in diesem Zeitraum gemessenen maximalen Spaltweiten ab, sie bilden jedoch aufgetretene geänderte Spaltweiten in zwei Kernen ab und stellen aus Sicht der RSK eine hinreichend repräsentative Basis dar.
- Die zum Erfassen von Auswirkungen geänderter Spaltweiten erzeugte Anzahl von 300 Kernvariationen ist nach Auffassung der RSK groß genug, um die Variationsbreiten mit Blick auf eine statistische KMV-Heißstabanalyse ausreichend abzubilden.

Zusammenfassend kommt die RSK zu dem Ergebnis, dass mit den von den Betreibern vorgelegten Analysen gezeigt wurde, dass angesichts der in der konservativ-deterministischen Nachweisführung enthaltenen Konservativitäten auch nicht-nominale Wasserspalte infolge von BE-Verformung die sicherheitstechnische Aussage einer konservativ-deterministischen Nachweisführung nicht in Frage stellen. Die Bewertung der RSK geht dabei von der Voraussetzung aus, dass die Verformungen der von den Betreibern für ihre Untersuchungen herangezogenen Kerne für die Zukunft abdeckend bleiben.

3.3 Umsetzung der RSK Empfehlung 4

Die Empfehlung 4 aus der RSK-Stellungnahme vom 18.03.2015 [2] bezieht sich auf die Effekte von BE-Verformungen auf die Spannungs- und Stabilitätsanalyse für die Brennelemente.

Einfluss auf Spannungs- und Festigkeitsanalysen

BE-Verformungen wirken sich auf den bestimmungsgemäßen Betrieb sowie auf die Beherrschung von Störfällen, EVA und Notstandsfällen aus. Hierbei lassen sich die Auswirkungen möglicher Brennelementverformungen auf die im Rahmen der BE-Strukturauslegung zu berücksichtigenden Parameter auf die Spannungs- und Stabilitäts-Analyse eingrenzen. [2]

Wesentliches Ziel der Spannungsanalyse ist der Nachweis, dass unzulässige plastische Verformungen vermieden werden (Spannungskriterium). Die Stabilitätsanalyse soll zeigen, dass ein Führungsrohrknicken nicht eintritt (Stabilitätskriterium). In den bisherigen Auslegungsnachweisen für die Brennelementstruktur wurden Brennelementverformungen mit Amplituden, wie sie im Betrieb deutscher DWR-Anlagen festgestellt wurden, weder für den bestimmungsgemäßen Betrieb noch für Störfälle und EVA berücksichtigt. Ziel von Empfehlung 4 ist es, dieses Defizit in den bisherigen Nachweisen zu beheben, indem gezeigt wird, dass die Auslegungsreserven die möglichen Effekte der BE-Verformungen auf die Spannungs- und Stabilitätsanalyse abdecken.

Sachverhalt

Der VGB-Bericht [4] enthält die Ergebnisse neuer AREVA-Analysen bezüglich der Empfehlung 4. Die Untersuchungen für den Normalbetrieb sind für HTP 16x16- und 18x18-Brennelemente ohne Maßnahmen zur Verbesserung der Steifigkeit durchgeführt worden. Es wurden 20 mm C-Biegung und 15 mm S-Biegung berücksichtigt und deren Einfluss auf die Festigkeitsnachweise quantitativ bestimmt. Im Normalbetrieb bleibt gemäß [4] die zusätzliche Biegespannung im Führungsrohr unter 30 MPa und die verbleibende Marge zur Auslegungsgrenze für plastische Verformungen des Führungsrohrs beträgt etwa 40 MPa. Dies entspricht einem Sicherheitsfaktor von 1,6.

Für Störfälle wurden das aktuelle 18x18-Brennelementdesign HTP und HTP-I untersucht. Diese Störfallanalysen erfolgten ausgehend von der Betriebserfahrung in 18x18-Anlagen mit 20 mm C-Biegung und 10 mm S-Biegung. Im Ergebnis der Analysen wird gemäß [4] eine verbleibende Auslegungsreserve von mehr als 30 % für die Summe von Membran- und Biegespannung errechnet. Die Rechnungen wurden mit konservativen Randbedingungen durchgeführt: Es wurden ein freistehendes Brennelement ohne laterale Abstützung durch Nachbarn betrachtet, so dass eine Zunahme der axialen Kraft nicht durch die benachbarten BE abgetragen werden kann, sondern ausschließlich durch eine höhere Verformung. Weiterhin werden die zulässigen Spannungen anhand der Eigenschaften unbestrahlten Materials abgeleitet; die Festigkeit bestrahlten Materials ist ca. doppelt so hoch. Zudem ist zu berücksichtigen, dass der Festigkeitsnachweis für eine statische Belastung auf der Grundlage von Zugversuchen durchgeführt wurde; bei kurzzeitigen Belastungen ist die Festigkeit höher. Generell ist auch das Spannungsniveau für den Normalbetrieb für 16x16-Brennelemente niedriger als für 18x18-Brennelemente [14].

Weiterhin wurde ein Nachweis, dass die Knickspannungsgrenze nicht überschritten wird und dass die Führungsrohre nicht ausknicken, von AREVA vorgelegt. Es wurde auch der Nachweis für die Stabilität eines verformten Brennelements geführt. In diesem Nachweis wird gezeigt, dass eine zusätzlich aufgebrachte Last

auf das mit den Betriebslasten beaufschlagte Brennelement nur kleine Zusatzauslenkungen und Zusatzspannungen erzeugt. Dies bedeutet im Sinne einer Stabilitätsaussage, dass das Brennelement auch im verformten Zustand eine ausreichende Steifigkeit besitzt und zusätzliche Lasten aufnehmen kann.

Bewertung

In der Betriebserfahrung von Anlagen mit 16x16-BE wurden in der Vergangenheit ex-core S-Biegungen in der Größenordnung von 15 mm beobachtet. Mit Verweis auf verschiedene in den durchgeführten Störfallanalysen enthaltene Konservativitäten haben die Betreiber und Hersteller aus Sicht der RSK nachvollziehbar dargelegt, dass für 16x16-Brennelemente die Spannungsgrenzen im Störfall auch bei S-Biegungen von 15 mm eingehalten werden. Dies gilt auch für den Normalbetrieb. Ebenso sind die im Hinblick auf die Stabilität der Brennelemente geführten Analysen geeignet zu zeigen, dass das Brennelement auch im verformten Zustand eine ausreichende Steifigkeit besitzt und zusätzliche Lasten aufnehmen kann.

Zusammenfassend wurde aus Sicht der RSK plausibel gezeigt, dass die Auslegungsreserven die möglichen Effekte der BE-Verformungen auf die Spannungs- und Stabilitätsanalyse abdecken.

3.4 Umsetzung der RSK Empfehlungen 5-8

Die Empfehlungen 5 – 8 aus der RSK-Stellungnahme vom 18.03.2015 [2] betreffen das Vorgehen bei erhöhten SE-Fallzeiten, den Umgang mit verformten BE im Betrieb der Anlagen und die Bewertung der konstruktiven Eigenschaften von Brennelementen im Hinblick auf eine mögliche BE-Verformung.

In ihrem Bericht [3] kommen die GRS und das PHB zu den RSK-Empfehlungen 5 – 8 zu den folgenden Ergebnissen:

Empfehlung 5:

Auch wenn in einigen Anlagen kein Trend zu höheren Fallzeiten erkennbar war, werden wiederkehrend Fallzeitmessungen mit Aufnahme von Laufzeitoszillogrammen, Gängigkeitsprüfungen und stichprobenartige BE-Geradheitsmessungen sowie ereignisabhängig zusätzliche Messungen (z. B. Fallzeitmessungen) durchgeführt. Die in den betrieblichen Regelungen (z. B. im BHB, PHB) festgeschriebenen Maßnahmen sind ausreichend, um einen Trend zu höheren Fallzeiten sicher zu erkennen.

In der Anlage KKI-2 erreichte im Jahr 2011 ein Steuerelement (SE) die untere Endstellung nur stark verzögert. Diesem Umstand wird durch umfangreiche Maßnahmen Rechnung getragen. So werden im KKI-2 unabhängig von den gemessenen Fallzeiten wiederkehrend vor dem Abfahren/Anfahren Laufzeitoszillogramme aufgenommen und analysiert. Brennelement-Steuerelement (BE-SE) -Konfigurationen mit den jeweils höchsten Fallzeiten werden zusätzlich während der Revision weitergehenden Inspektionen (optische Befundung, Geradheitsmessung mit Messspinnenverfahren) unterzogen. Entsprechende Vorgaben finden sich

im PHB. Zusätzlich werden BE-/SE-Hebe- und Absetzvorgänge hinsichtlich des Last- und Reibverhaltens messtechnisch überwacht und es existieren Vorgaben zur Positionierung verformter BE im Folgezyklus.

Auch die Anlage KBR war stark von BE-Verformungen betroffen. Diesem Umstand wurde in der Vergangenheit durch umfangreiche Maßnahmen Rechnung getragen. Insbesondere wurde das in der RSK-Empfehlung 5 vorgeschlagene Vorgehen in der Vergangenheit umgesetzt. Umfänge und Inhalte von BE-Inspektionen, Reibkraftmessungen SE/BE, Fallzeitmessungen etc. sind in den schriftlichen Regelungen des KBR festgelegt.

Empfehlung 6:

In allen DWR-Anlagen werden in der Revision, unabhängig davon, ob Hinweise auf relevante Verformungen vorliegen oder nicht, stichprobenartig Geradheitsmessungen durchgeführt. Der Umfang der Stichprobe beträgt bei den meisten Anlagen zwischen 5 - 15 % der eingesetzten BE. Der Umfang der Stichprobe ist ausreichend, wenn in dieser potentiell besonders betroffene BE (BE-Typen, Standzeiten, Vorverformung) enthalten sind. Das Inspektionsprogramm wird vor dem BE-Wechsel mit der Behörde und dem Sachverständigen abgestimmt. Bei Feststellen von „Besonderheiten“ wird eine Erweiterung der Inspektionen festgelegt. Einige Anlagen verweisen hierbei auf eine entsprechende Auflage in der Betriebsgenehmigung. In der Vergangenheit wurden in den Anlagen KKP-2, KKI-2 und KBR 100-%-Geradheitsmessung durchgeführt. Für die übrigen Anlagen erlaubt o. g. allgemeine Festlegung, für jede „Besonderheit“ ein individuelles Vorgehen abzustimmen.

Empfehlung 7:

Bzgl. des Umgangs und der Überwachung bei der Handhabung verformter BE werden in [3] geeignete Messmethoden (z. B. SE-Fallzeitmessungen, SE-Reibkraftmessungen, Erfassung von Laufzeitdaten mittels Laufzeitosziloskop, Last-Weg-Aufzeichnungen) und Kriterien (MAX- und MIN-Lastwerte auf Basis von Erfahrungswerten zu auftretenden Lasten bei der BE-Handhabung) genannt, anhand derer eine entsprechende Bewertung erfolgen kann, ob eine erhöhte Gefahr für die Beschädigung von BE besteht. Ebenso sind geeignete spezielle Handhabungswerkzeuge sowie weitere Hilfsmittel (z. B. Dummy-BE, Unterwasserkameras, die z. B. an einem U-Boot angebracht werden, BE- Positionier-System) und Prozeduren (z. B. versetztes Heben: Ein von drei Seiten freistehendes BE wird mittels der BE-Lademaschine um 150 mm angehoben und anschließend seitlich aus dem BE-Verband gefahren. Dadurch werden Berührungen mit Nachbar-BE vermieden.) vorhanden und werden eingesetzt, um das Risiko für das Auftreten von BE-Beschädigungen beim Umgang mit verformten BE zu minimieren.

Empfehlung 8:

Es wurden ergänzende qualitative Bewertungsgrößen (z. B. die Steifigkeit des gesamten BE und der BE-Struktur sowie das Kriechverhalten der BE-Struktur) im Sinne der RSK-Empfehlung 8 identifiziert und entsprechende Designänderungen in den Anlagen umgesetzt. Die Designänderungen wurden gemäß der

üblichen Vorgehensweise für die Einführung von neuen BE-Designs bzw. von signifikanten Designänderungen eingeführt und bewertet. Hierbei ist ein AREVA-Tool zur Abschätzung der Auswirkungen der Designänderungen auf die Geradheit der BE zum Einsatz gekommen. Als Methodik zur Ableitung von Aussagen über das Verformungspotenzial der BE im Kernverband wird beispielhaft der Einsatz von Vorläufer-BE und deren Untersuchung und Vermessung während BE-Wechsels genannt.

Es zeigt sich insgesamt, dass geeignete ergänzende Kenngrößen zur Bewertung der konstruktiven Eigenschaften hinsichtlich BE-Verformungen identifiziert wurden. Die gewählte Konstruktion wurde im Rahmen der Auslegung unter Berücksichtigung dieser Größen hinsichtlich der Verformung bewertet.

Bewertung der Umsetzung der RSK Empfehlungen 5-8

Auf Basis der oben dargestellten Ausführungen im Bericht [3] sind aus Sicht der RSK die RSK-Empfehlungen 5 – 8 umgesetzt.

3.5 Umsetzung der RSK-Empfehlung 9

In ihrer Stellungnahme vom 18.03.2015 [2] hatte die RSK Bezug genommen auf die Stellungnahme zu den Neutronenflussschwankungen in DWR von 2013 [1]. Es wurde auf neuere Untersuchungen zur Ursachenklärung für die Neutronenflussschwankungen verwiesen, nach denen ein Zusammenhang zwischen der Höhe der Schwingungsamplituden der Neutronenflussschwankungen und dem Maß der Brennelementverbiegungen bestehen könnte. Daraufhin hatte die RSK in [2] eine Fortsetzung der Ursachenklärung im Rahmen von Forschungsvorhaben insbesondere bezüglich der Größe und Ursachen von Einflüssen empfohlen, die zu einer Relativbewegung der Brennelemente gegenüber den Kühlmittelströmen führen können.

Wie in Empfehlung 9 gefordert, hat in den letzten Jahren eine Intensivierung der Ursachenforschung zu den Neutronenflussschwankungen stattgefunden. Bislang liegen noch keine Ergebnisse vor, die eine vollständige Erklärung der räumlichen Korrelation verschiedener Neutronenflusssignale und eine Quantifizierung der Schwankungsamplituden ermöglichen.

Der neuere Modellansatz kollektiver strömungsinduzierter BE-Schwingungen ist nach derzeitigem Kenntnisstand in der Lage, die Phasenbeziehungen zwischen den Neutronenflusssignalen exakt abzubilden und die räumliche Verteilung der Schwankungsamplituden qualitativ zu beschreiben.

Die RSK begrüßt, dass die Betreiber die Bearbeitung der einschlägigen Forschungsvorhaben durch Bereitstellung von Messdaten auch weiterhin unterstützen.

4 Zusammenfassung und Empfehlung

Zusammenfassend kommt die RSK zu dem Ergebnis, dass mit Ausnahme der nachfolgend genannten Empfehlung die Empfehlungen der RSK Stellungnahme [2] berücksichtigt wurden und die hierzu durchgeführten Analysen der Betreiber sowie die erzielten Ergebnisse plausibel sind. Es verbleibt allerdings folgende **Empfehlung**:

Die bei der Ermittlung des DNB Verhaltens infolge geänderter Wasserspalte im Reaktorkern zu berücksichtigenden Unsicherheiten sollten mittels geeigneter Sensitivitätsanalysen bestimmt werden. Methodisch können aus Sicht der RSK diese Analysen analog zu den statistischen KMV-Analysen generisch auf Basis der in [4] ausgewählten Reaktorkerne (bzw. Zyklen) und Wasserspaltverteilungen erfolgen. Die Ergebnisse (z. B. minimales DNBR mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % und einer statistischen Sicherheit von mindestens 95 %) sind in Relation zu den vorhandenen DNB Margen bei den führenden Transienten zu bewerten.

Beratungsunterlagen

- [1] RSK-Stellungnahme
(457. Sitzung am 11.04.2013)
DWR Neutronenflussschwankungen

- [2] RSK-Stellungnahme
(474. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 18.03.2015)
Verformungen von Brennelementen in deutschen Druckwasserreaktoren (DWR)

- [3] Abschlussbericht zum AP 3 des Vorhabens UM15R01326
„Fachliche Unterstützung des BMUB zu den Themen „Verformungen von Brennelementen“ und
„Neutronenflussschwankungen“
GRS-Köln-Garching, A-6130/6100, elm, poi, Physikerbüro Bremen, September 2016

- [4] Schriftlicher VGB-Bericht, 12.09.2017
RSK-Stellungnahme: Verformung von Brennelementen in deutschen Druckwasserreaktoren
(DWR), Statusbericht und sicherheitstechnische Bewertung der Betreiber

- [5] Tagungsbeitrag Jahrestagung Kerntechnik 2012: Status of Fuel Assembly Bow Modeling at
AREVA, V. Marx, M. Wicklein, AREVA GmbH Stuttgart, 22.-24.05.2012

- [6] Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 3. März 2015, Anhang 5 (BAnz AT 30.03.2015
B2)

- [7] RSK-Stellungnahme
(475. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 15.04.2015)
Anforderungen an die statistische Nachweisführung bei Kühlmittelverluststörfall-Analysen

- [8] Veit Marx, Framatome
Nicht-nominale Wasserspalte, Beantwortung der Fragen der RSK zur Mechanik
Präsentation, 14.11.2018

-
- [9] Dietmar Deuble, Alfred Knoll
Stat. LOCA-Analyse mit nicht-nominalen Wasserspalten
Präsentation, 14.11.2018
- [10] Klaus Kuehnel, Klaus-Dieter Richter, Gerhard Drescher, Ivo Endrizzi
High Local Power Densities Permissible at Siemens Pressurized Water Reactors
Nuclear Technology, Vol. 137, Febr. 2002, pp 73-83
- [11] Empfehlung: Ergänzende Anforderungen an eine statistische LOCA-Analyse
Anhang zum Ergebnisprotokoll der 143. Sitzung des Ausschusses ANLAGEN- UND
SYSTEMTECHNIK am 19.02.2020
- [12] Dietmar Deuble, Veit Marx, Martin Schlieck-Weber, Würfeln von Wasserspaltverteilungen
(Framatome/ VGB Verfahren), Fachgespräch der RSK-AG-Brennelementverbiegung,
FRAMATOME, Erlangen, 18.02.2020
- [13] R. Jaspers, Ergänzung zum Fachgespräch der RSK-AG-Brennelementverbiegung vom 18.02.2020,
FRAMATOME, email vom 21.02.2020
- [14] Ergebnisvermerk der 6. Sitzung der Ad-hoc-AG BE-Verbiegung am 14.11.2018
- [15] Dietmar Deuble, Beantwortung von Fragen aus der RSK-AST-Sitzung vom 13. Dezember 2018,
FRAMATOME 07.01.2019
- [16] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
Verformungen von Brennelemente, Schäden an Niederhaltefedern und Abstandhaltern,
Neutronenflussschwankungen
Schreiben RS I 3 – 17018/1 vom 10.10.2016
- [17] Ergebnisvermerk der 2. Sitzung der Ad-hoc-AG BE-Verbiegung am 14.02.2018: Bericht der
Betreiber/Telefonkonferenz mit AREVA

A1 Anhang 1: Empfehlungen der RSK zu „Verformungen von Brennelementen in deutschen Druckwasserreaktoren“ vom 18.03.15 [2]

Empfehlung 1:

Der Einfluss von BE-Verformungen auf die maximale Leistungsdichte im Reaktorkern ist zu ermitteln. Sofern sich zeigt, dass eine relevante Erhöhung der maximalen lokalen Leistungsdichte nicht ausgeschlossen werden kann, muss dieser Effekt bei der Zyklusvorausrechnung und bei der Ermittlung der tatsächlichen maximalen Leistungsdichte aus den Messwerten berücksichtigt werden. Auf dieser Basis sind Vorgaben zu entwickeln, mit denen die Einhaltung der maximal zulässigen lokalen Leistungsdichte im Betrieb über die gesamte Zyklusdauer sichergestellt werden kann.

Empfehlung 2:

Die möglichen Einflüsse von BE-Verformungen auf die Leistungsdichteverteilung des Reaktorkerns sollten hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Nachweisführung zur

- Brennstabauslegung sowie die
- Heißstab- und Schadensumfanganalyse für KMV-Störfälle

bewertet werden.

Hierbei kann die räumliche Verteilung möglicher Leistungsdichteänderungen berücksichtigt werden. Sofern nicht aufgezeigt werden kann, dass die Einflüsse unbedeutend sind oder die Nachweise ausreichende Vorhalte enthalten, um neben anderen Unsicherheiten in der Analyse auch die Effekte von BE-Verformungen abzudecken, sind diese bei der Nachweisführung zu berücksichtigen.

Empfehlung 3:

Zur Absicherung der vorliegenden exemplarischen Erkenntnisse zum Einfluss von BE-Verformungen auf das kernweit minimale DNB-Verhältnis $DNBR_{min}$ sollten zusätzliche Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Hierbei sollten die Einflüsse von Spaltvergrößerungen selektiv für Brennelemente, die hinsichtlich des DNBR führend sind, ermittelt werden. Dabei sollten für deutsche Anlagen typische BE-interne Verteilungen der DNBR-Werte herangezogen werden.

Sofern Einflüsse auf $DNBR_{min}$ nicht ausgeschlossen werden können, sollte dies im Rahmen des Nachweiskonzepts entsprechend berücksichtigt werden.

Empfehlung 4:

Es muss gezeigt werden, dass die Auslegungsreserven die möglichen Effekte der BE-Verformungen auf die Spannungs- und Stabilitätsanalyse abdecken.

Empfehlung 5:

Auf der Basis der routinemäßigen Fallzeitmessungen zu Zyklusbeginn und -ende sollten bei Steuerelementen mit erkennbarem Trend zu höheren Fallzeiten weitergehende Messungen, wie zusätzliche Fallzeitmessungen

mit Aufzeichnung des Weg-Zeitverlaufs und/oder Laufzeitoszillogramme während des Zyklus durchgeführt werden. Entsprechende Vorgaben sollten in die betrieblichen Regelungen aufgenommen werden.

Empfehlung 6:

Bei Hinweisen auf relevante Verformungen, z. B. durch Schwergängigkeit beim Entladen der BE, sollten im Zuge der BE-Inspektionsprogramme beim BE-Wechsel stichprobenweise Geradheitsmessungen durchgeführt werden. Liefert die Stichprobe Hinweise auf eine relevante Anzahl an erhöhten BE-Verformungen, sollten diese Messungen bis auf 100 % der BE der betroffenen BE-Typen des vorangegangenen Zyklus ausgedehnt werden.

Empfehlung 7:

Die Betriebsanweisungen für die Durchführung des Brennelementwechsels sollten Kriterien enthalten, unter welchen Bedingungen besondere Maßnahmen bzgl. des Umgangs und der Überwachung bei der Handhabung von verformten Brennelementen zu treffen sind. Für Fälle, in denen eine erhöhte Gefahr für die Beschädigung von Brennelementen besteht, sollten geeignete Handhabungswerkzeuge zum Einsatz kommen, die das Risiko für das Auftreten von BE-Schädigungen beim Umgang mit verformten Brennelementen minimieren.

Empfehlung 8:

Zur Bewertung der konstruktiven Eigenschaften der Brennelemente hinsichtlich von BE-Verformungen sind ergänzende Bewertungsgrößen für relevante konstruktive Eigenschaften wie z. B. Steifigkeit von BE und BE-Struktur, Kriechverhalten der BE-Struktur in der Auslegung zu berücksichtigen und die gewählte Konstruktion im Rahmen der Auslegung und vor Einsatz in den Reaktorkern unter Berücksichtigung dieser Größen hinsichtlich der Verformung zu bewerten.

Empfehlung 9:

Die RSK empfiehlt eine Fortsetzung der Ursachenklärung im Rahmen von Forschungsvorhaben insbesondere bezüglich der Größe und Ursachen von Einflüssen, die zu einer Relativbewegung der Brennelemente gegenüber den Kühlmittelstrahlen führen können.