

Verformungen von Brennelementen in deutschen Druckwasserreaktoren (DWR)

1 Veranlassung

Brennelemente (BE) bilden zusammen mit den weiteren Kernbauteilen den Reaktorkern. Das einzelne Brennelement eines Druckwasserreaktors besteht aus der BE-Struktur (Fuß, Kopf, Abstandshalter, Führungsrohre) sowie aus einem Bündel von Brennstäben, in denen der Kernbrennstoff in Form von Pellets eingeschlossen ist. Das Brennstabhüllrohr ist Teil des gestaffelten Barrierenkonzepts zur Rückhaltung der radioaktiven Stoffe (Schutzziel „Einschluss der radioaktiven Stoffe“). Die Brennelemente enthalten neben den Brennstäben eine Anzahl von Steuerstabführungsrohren. Diese dienen dazu, die Steuerelemente so zu führen, dass diese im Betrieb sowie bei den zu unterstellenden Ereignissen in den Reaktorkern einfahren bzw. einfallen, um die Leistung des Reaktors abzusenken bzw. diesen in kurzer Zeit abzuschalten. Die Struktur des BE muss den vollständigen Einfall der Steuerelemente sicherstellen (Schutzziel „Kontrolle der Reaktivität“).

Schäden und Verformungen (z. B. Verbiegungen, Verdrehungen) an Brennelementen sowie deren mögliche Auswirkungen auf die Neutronenphysik und Thermohydraulik des Reaktorkerns (Schutzziele „Kühlung der Brennelemente“ und „Kontrolle der Reaktivität“) sind angesichts ihrer möglichen Einflüsse auf die Einhaltung der Schutzziele eines Reaktors immer auf mögliche negative Auswirkungen auf eines der genannten Schutzziele hin zu bewerten. Ggf. sind Abhilfemaßnahmen zu ergreifen, die eine Einhaltung der Schutzziele sicherstellen.

Etwa ab dem Jahr 2000 beginnend wurde in deutschen DWR-Anlagen eine Zunahme von bleibenden Brennelementverformungen im Laufe des Reaktorbetriebs verzeichnet; diese Verformungen führten zuerst zu BE-Handhabungsproblemen und in einzelnen Fällen auch zu erhöhten Einfallzeiten oder zum Nichterreichen der unteren Endstellung beim Steuerelementeinfall. Die Entwicklung der Brennelementverformungen wurde deshalb ab 2009 seitens des RSK-Ausschusses Reaktorbetrieb regelmäßig verfolgt. Das BMU hat mit [1] die RSK gebeten, zu den mit diesem und anderen Phänomenen (z. B. den zunehmenden Neutronenflussschwankungen und zu Schäden an Kernbauteilen im Bereich des Reaktorkerns) einhergehenden sicherheitstechnischen Fragestellungen Stellung zu nehmen.

Die vorliegende Stellungnahme beschränkt sich auf Phänomene, bei denen ein ursächlicher Zusammenhang mit Brennelementverformungen gesehen wird oder ein solcher nicht auszuschließen ist. Die anderen – in [1] angesprochenen Schäden – an Kernbauteilen wie Brennelementzentrierstiften, Niederhaltefedern oder Drosselkörpern und die damit zusammenhängenden Fragen der Qualitätssicherung werden in einer separaten Stellungnahme behandelt. Soweit sich aus den Beratungen zu Brennelementverformungen Hinweise ergeben haben, dass Brennelementverformungen als beitragender Faktor zu Schäden an Kernbauteilen nicht ausgeschlossen werden können, enthält die vorliegende Stellungnahme entsprechende Hinweise. Die Beantwortung der in [1] gestellten Fragen wird nach Fertigstellung der separaten Stellungnahme erfolgen.

Zusammenfassung des Ergebnisses

Die seit 2000 beobachtete Zunahme von BE-Verformungen in deutschen DWR-Anlagen war bereits mehrfach Gegenstand von RSK-Beratungen. Die RSK nimmt mit der vorliegenden Stellungnahme auftragsgemäß eine über die bisherigen Diskussionen zu einzelnen Aspekten des Brennelementverhaltens und von Brennelementverformungen hinausgehende Gesamtbetrachtung aller diesbezüglich in den letzten Jahren bekannt gewordenen einschlägigen Phänomene und deren sicherheitstechnische Bewertung vor. Schwerpunktmäßig werden dabei mit den Brennelementverformungen einhergehende Fragen der sicherheitstechnischen Nachweise behandelt. Ein weiterer Fokus liegt in der Identifizierung geeigneter Maßnahmen, die sicherstellen sollen, dass Brennelementverformungen auf sicherheitstechnisch nicht relevante Verformungen begrenzt bleiben.

Die RSK stellt fest, dass Betreiber und Hersteller bereits eine Reihe von Maßnahmen zur Verringerung der Brennelementverbiegungen vorgenommen haben, die aufgrund neuerer Daten aus den deutschen DWR-Anlagen [12] eine relative Verbesserung der Situation erkennen und eine weitere Verbesserung erwarten lassen.

Ungeachtet dessen kommt die RSK zum Ergebnis, dass Brennelementverformungen von sicherheitstechnischer Bedeutung sein können. Mit Priorität ist deshalb Vorsorge zu treffen, dass Verformungen künftig durch geeignete Konstruktion, Werkstoffwahl und Betriebsweisen begrenzt werden.

Da Verformungen trotzdem nicht gänzlich ausgeschlossen werden können, sind die daraus resultierenden Auswirkungen auf die sicherheitstechnischen Nachweise für die Auslegung und den Betrieb des Reaktorkerns zu berücksichtigen. Hiervon betroffen sind die Schutzziele „Kühlung der Brennelemente“ und „Kontrolle der Reaktivität“. Der Umgang mit stärker verformten Brennelementen erfordert des Weiteren besondere Vorsichtsmaßnahmen zur Vermeidung von mechanisch verursachten Schäden an Brennstäben (Schutzziel „Einschluss radioaktiver Stoffe“).

Die RSK hat im Ergebnis der Beratungen Empfehlungen ausgesprochen, die sicherstellen sollen, dass

- die Eintrittswahrscheinlichkeit für unzulässige BE-Verformungen reduziert wird,
- die sicherheitstechnischen 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 erwartet in ca. einem Jahr einen Bericht der Betreiber ob und in welcher Weise die Empfehlungen umgesetzt wurden.

2 Beratungsgang

Die Mitglieder der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Brennelemente (RSK-AG BE) wurden in der 452. Sitzung der RSK am 18.10.2012 bestimmt; die Zuordnung der Arbeitsgruppe zur RSK wurde in der 455. Sitzung der RSK am 21.02.2013 festgelegt.

Die Arbeitsgruppe hörte Berichte:

- der Fa. AREVA zu Grundlagen der mechanischen Auslegung von DWR-Brennelementen,
- der Fa. AREVA zum derzeitigen Erkenntnisstand der Ursachenforschung und Modellierung zur Brennelement-Verformung,
- der Fa. AREVA zum Einfluss von Brennelementverformungen auf die Filmsiedesicherheit,
- des KTA-Arbeitsgremiums zur Überarbeitung der KTA 3101.3 „Auslegung der Reaktorkerne von DWR- und SWR, Teil 3: Mechanische und thermische Auslegung“,
- des VGB über die Auswirkungen der Brennelement-Verformungen auf das Betriebsverhalten von Brennelementen und Steuerelementen im Jahr 2012,
- des TÜV SÜD Energietechnik über die Beteiligung des Gutachters bei mechanischer BE-Auslegung und Qualitätssicherung,
- der GRS über eine Literaturstudie zur Betriebserfahrung mit Brennelement-Verformungen,
- der Fa. Westinghouse zu Erfahrungen mit Brennelementverformungen und
- des Kernkraftwerks Emsland (KKE) zum Status der Brennelementverbiegung im KKE

und besichtigte Versuchsstände der Fa. AREVA.

Die Arbeitsgruppe führte darüber hinaus vertiefende Fachgespräche mit der Fa. AREVA und der Fa. Westinghouse zur mechanischen und physikalischen Brennelementauslegung. Die RSK verabschiedete die Stellungnahme in ihrer 474. Sitzung am 18.03.2015.

3 Bewertungsmaßstäbe

Die übergeordneten sicherheitstechnischen Anforderungen sowie die sicherheitstechnischen und radiologischen Nachweisziele und Nachweiskriterien für die neutronenphysikalische und thermohydraulische Kernauslegung sowie die thermomechanische BE-Auslegung leiten sich aus den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ (SiAnf) [3] und den Interpretationen I-1 zu den SiAnf [4] ab.

Die SiAnf enthalten in Nr. 3.2 (2) die Anforderung, dass der Reaktorkern, die relevanten Einrichtungen zur Überwachung, Regelung und Begrenzung der Reaktorleistung und zur Abschaltung des Reaktors so auszulegen, herzustellen und in einem solchen Zustand zu halten sind, dass im Zusammenwirken mit den Kühlsystemen für den Reaktorkern die jeweiligen Auslegungsgrenzen der Sicherheitsebenen 1 bis 4a eingehalten werden.

Die Interpretation I-1 [4] fordert in Nr. 2 (1), dass auf den Sicherheitsebenen 1 bis 4a, bei Einwirkungen von innen oder außen sowie bei Notstandsfällen keine Verformungen an den Brennstäben, der Brennelement-

Struktur oder den Steuerelementen entstehen dürfen, die die mechanische Abschaltbarkeit (bei einem großen Leck innerhalb des Sicherheitsbehälters beim DWR die dauerhafte Abschaltbarkeit) in Frage stellen. Weiterhin sind gemäß Nr. 2 (2) in [4] im Rahmen der mechanischen Auslegung des Reaktorkerns für die Bedingungen des bestimmungsgemäßen Betriebs Auslegungsgrenzen so festzulegen, dass bei Einhaltung der Auslegungsgrenzen Defekte an den Brennstäben, Brennelement-Strukturen oder Steuerelementen sowie der zugehörigen Strukturteile nicht zu unterstellen sind.

Konkretisierende Anforderungen an die neutronenphysikalische und thermohydraulische Kernauslegung sind in den KTA Regeln 3101.1 [5] und 3101.2 [6] enthalten. Die KTA 3101.1 enthält u.a. die Anforderung, dass Modellunsicherheiten sowie betriebliche Variationsbreiten und Unsicherheiten der in die sicherheitstechnischen Nachweise eingehenden Parameter zu berücksichtigen sind (Nr. 3.1 (5)). In der KTA 3101.2 wird in Nr. 5.1 eine Begrenzung der Leistungsdichte derart gefordert, dass die sicherheitstechnisch relevanten Randbedingungen für die mechanische Auslegung der Brennstäbe zum bestimmungsgemäßen Betrieb eingehalten werden. Darüber hinaus sind im Normalbetrieb die durch sicherheitstechnische Analysen als zulässig nachgewiesenen Ausgangswerte der Leistungsdichte für Ereignisse des anomalen Betriebs und für Störfälle einzuhalten.

Eine KTA-Regel, welche speziell die Anforderungen an die thermomechanische Auslegung der Brennelemente angibt, liegt mit dem Regelentwurf 3101.3 „Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren Teil 3: Mechanische und thermische Auslegung“ [7] vor.

Zur Orientierung werden in der Praxis weiterhin, soweit anwendbar, andere KTA-Regeln (KTA 3103, KTA 3201.2, KTA 3204, KTA 3905), sowie internationale Regelwerke, wie z. B.

- ANSI / ANS-57.5 - Light Water Reactors Fuel Assembly Mechanical Design Evaluation [2],
- NRC Regulations, Title 10, Code of Federal Regulations (10 CFR) und
- Nureg-0800 - US NRC Standard Review Plan (Section 4.2 – Fuel System Design)

herangezogen.

Zusätzlich wird der VdTÜV Beschluss 153 [8] (Sachverständigentätigkeit bei der Prüfung der thermomechanischen Auslegung, der Konstruktion, der Herstellung und dem Betrieb von Kernbauteilen) herangezogen, welcher Angaben zum konkreten Vorgehen bei der Nachweisführung für Folgezyklen, bei der Vorprüfung, bei der Herstellungsüberwachung, etc. enthält.

Anlagenspezifische Anforderungen an die Kern- und Brennelementauslegung sind in den „Sicherheitstechnischen Rahmenbedingungen“ niedergelegt, die in deutschen Kernkraftwerksanlagen in der Regel Bestandteil der Betriebsgenehmigung sind. In den „Sicherheitstechnischen Rahmenbedingungen“ werden hinsichtlich der neutronenphysikalischen und thermohydraulischen Kernauslegung sowie der thermomechanischen BE-Auslegung sicherheitstechnisch relevante Auslegungsparameter benannt und mit quantitativen Kriterien belegt. Der Nachweis der Einhaltung dieser Kriterien erfolgt im Voraus für jeden Beladezyklus.

Die Sicherheitstechnischen Rahmenbedingungen enthalten keine Kriterien bzgl. zulässiger Verformungen von Brennelementen und keine Anforderungen im Hinblick auf eine Berücksichtigung von Brennelementverformungen in den neutronenphysikalischen und thermohydraulischen Nachweisen zur Kernausslegung.

Die RSK leitet aus den vorgenannten Anforderungen zur Kern- und Brennelementauslegung folgende Maßstäbe für ihre sicherheitstechnische Bewertung ab:

Verformungen von Brennelementen

- (1) dürfen die Steuerelementbewegung unter allen Betriebs- und Störfallzuständen hinsichtlich der Einfallzeiten nicht unzulässig beeinträchtigen,
- (2) dürfen nicht zu Änderungen in der Leistungsdichteverteilung im Reaktorkern führen, die die Gültigkeit von Nachweisen zur Kernausslegung und Ereignisbeherrschung in Frage stellen; ggf. sind entsprechende Einflüsse in der Nachweisführung zu berücksichtigen,
- (3) dürfen nicht systematisch zu Beschädigungen einzelner Brennelementkomponenten (wie z.B. Eckbrennstäbe, Abstandshalter), des gesamten Brennelementes oder der angrenzenden Komponenten (wie z. B. Brennelementzentrierstifte) im Betrieb führen, so dass deren Funktionsfähigkeit nicht mehr gegeben ist, und
- (4) dürfen nicht zur Beeinträchtigung der Integrität der Brennelemente bei der Handhabung und Lagerung der Brennelemente führen.

4 Sachstand und Ursachen von BE-Verformungen, ergriffene Maßnahmen

4.1 Sachstand

Ab ca. dem Jahr 2000 wurden in deutschen Kernkraftwerken mit DWR Auffälligkeiten beim Einsetzen der Brennelemente festgestellt, die auf eine zunehmende Verformung der BE schließen ließen. Sowohl das Maß der Verformung als auch die Häufigkeit des Auftretens nahm im Laufe der Jahre zu. Zum Ende des Jahrzehntes traten vermehrt meldepflichtige Ereignisse mit Bezug zu Brennelement-Verformungen auf. Die einzelnen Kraftwerke waren unterschiedlich stark betroffen.

In einem Fall (KKI-2, ME 08/058) wurde festgestellt, dass ein Steuerelement bei einer ereignisbedingten Leistungsreduktion die untere Endstellung nicht erreicht hatte. 2010 und 2011 kam es in einer weiteren DWR-Anlage zur Verletzung der spezifizierten Fallzeiten für das Erreichen der unteren Endlage bei drei Steuerelementen (KBR, ME 02/2011). Allerdings betrafen die Verzögerungen den für die Wirksamkeit der Abschaltreaktivität nicht sensitiven Bereich ab Eintritt in den Dämpfer. In einigen weiteren Fällen wurden erhöhte Einfallzeiten festgestellt, die jedoch noch innerhalb der zulässigen Werte lagen.

Des Weiteren wurde in mehreren Kraftwerken Reibkorrosion an Abstandshalterecken mit unterschiedlichem Schädigungsgrad, beginnend mit leichten Anlagespuren bis hin zu durchgetrennten Abstandshalterecken, in einigen Fällen mit Beschädigung des dahinterliegenden Eckbrennstabs, beobachtet.

Messungen von Brennelementverformungen außerhalb des Reaktorkerns wurden in mehreren Kraftwerken durchgeführt. Dabei wurden Brennelement-Durchbiegungen bis zu ca. 25 mm (bei C-förmiger Verbiegung) gemessen und unterschiedliche Biegemuster (C-förmig, S-förmig, sowie Überlagerung der beiden lateralen Dimensionen) festgestellt.

Die Anlage KKE – eine von drei baugleichen KONVOI-Anlagen – ist bislang im Hinblick auf BE-Verformungen und Schäden an Kernbauteilen kaum betroffen. Der Grad der BE-Verformungen ist deutlich geringer, die Stabfallzeiten waren bislang unauffällig, die Be- und Entladezeiten des Reaktorkerns (Indiz für Handhabungsschwierigkeiten infolge Verformungen) sind im üblichen Bereich und Neutronenflussschwankungen nach Aussage des Betreibers weniger ausgeprägt als in anderen vergleichbaren Anlagen.

4.2 Ursachen

Brennelementverformungen ergeben sich als Folge von Kriechverformungen während des Reaktoreinsatzes unter der Einwirkung von äußeren Belastungen auf das Brennelement in Abhängigkeit von dessen Abtragverhalten.

Als äußere Belastungen wirken die von der Auslegung vorgegebenen axialen und lateralen Strömungskräfte, der Auftrieb, die Schwerkraft und solche Belastungen, die aus dem axialen Wachstum der Führungsrohre und den seitlichen Wechselwirkungskräften aus dem Kontakt zu Nachbar-Brennelementen resultieren sowie die von den Niederhaltefedern bestimmte Niederhaltekraft. Die strömungsinduzierten lateralen Kräfte werden verursacht durch globale vom Anlagendesign bestimmte Strömungsverteilungen (Unterschiede z. B. durch Siebtonne oder Schemel am Kerneintritt) und lokale Effekte, nämlich mischkernbedingte und verformungsbedingte Druckdifferenz-Unterschiede zwischen den Kühlkanälen. Die äußeren durch die Kraftwerksauslegung vorgegebenen Kräfte sind nur in engen Grenzen, z. B. durch Variation der Brennelement-Niederhaltekraft veränderbar.

Das Kraftabtragverhalten wird bestimmt von der konstruktiven Ausführung und der Steifigkeit des Brennelementes sowie der Festigkeit und dem Kriechverhalten der verwendeten Materialien. Die Kraftabtragung erfolgt dabei sowohl über die BE-Struktur, d. h. das Skelett bestehend aus Abstandshaltern und Führungsrohren, als auch über die in den Abstandshaltern federnd eingespannten Brennstäbe.

Durch die auf das Brennelement einwirkenden Kräfte ergibt sich eine zunächst elastische seitliche Auslenkung des Brennelementes. Diese ist bei gleicher äußerer Last umso stärker ausgeprägt, je geringer die Steifigkeit des Brennelementes ist. Wesentliche Parameter für die Steifigkeit der BE-Struktur (des Brennelement-Skelettes) sind der Trägheitsquerschnitt, die Anzahl und die Festigkeit (E-Modul) der Führungsrohre sowie die Steifigkeit der Verbindungen Abstandhalter/Führungsrohr.

Die Steifigkeit des gesamten Brennelementes wird zudem noch von der Stützwirkung durch die Brennstäbe mitbestimmt. Da die Steifigkeit der Brennstablagerung neben der konstruktiven Ausführung der Einspannung vor allem von der Relaxation der Abstandshalterfedern abhängt, verringert sich die Steifigkeits-Stützwirkung durch die Brennstäbe mit der Relaxation der Abstandshalterfedern über die Brennelement-Einsatzzeit. Hier

führt vor allem die Verwendung von Zirkonium-Basismaterialien als Federwerkstoff im Vergleich zu Inconel-Materialien zu einer signifikanten Verringerung der Steifigkeits-Stützwirkung durch die Brennstäbe schon nach relativ geringer Brennelement-Einsatzzeit.

Die sich bei der vorhandenen Brennelement-Steifigkeit zum jeweiligen Zeitpunkt einstellende elastische Brennelementverformung wird während des Reaktorbetriebes durch Kriechen der Führungsrohre zu einem großen Teil in einen nach dem Reaktoreinsatz messbaren bleibenden Verformungsanteil umgesetzt. Für das Ausmaß dieser Kriechverformung ist die Kriechfestigkeit des Führungsrohrmaterials maßgeblich. Es können sich BE-Verformungen in beide laterale Dimensionen mit möglicherweise unterschiedlichen Biegemodi (C-förmig, S-förmig, W-förmig) ergeben. Letztere wurden bislang in Deutschland noch nicht beobachtet.

Die maximal mögliche Verformung der einzelnen Brennelemente wird begrenzt durch das maximal zur Verfügung stehende, über die Brennelement-Reihe kumulierte Spaltmaß zwischen den Brennelementen (Nominalwert des Wasserspalts zwischen zwei BE beträgt bei Zirkaloy-Abstandshaltern im heißen Zustand ca. 1,6 mm). Falls eine Brennelement-Reihe ausschließlich aus frischen Brennelementen gebildet würde, entspräche dieses maximale Spaltmaß der Summe der nominalen Spalte. Dies wären bei den derzeit noch in Betrieb befindlichen Anlagen Werte bis zu 26 mm. Auf Grund des lateralen Abstandshalterwachstums während der Einsatzzeit ist der sich einstellende Spalt jedoch immer kleiner als der nominelle Spalt. Die Verwendung von Abstandshalterwerkstoffen, die auf ein geringes Wachstum optimiert sind, wie sie in den letzten Jahren vorzugsweise Verwendung fanden, hat jedoch dazu geführt, dass die Spaltverringern durch Abstandshalterwachstum geringer ausfällt als in der Vergangenheit.

4.3 Bislang ergriffene Maßnahmen

Von den Betreibern wurden in den letzten Jahren in verschiedenen Anlagen in unterschiedlichem Umfang die folgenden Modifizierungsmaßnahmen zur Begrenzung der Verformung und zur Berücksichtigung von Verformungen bei der Beladepanung und BE-Handhabung eingeführt:

- Reduktion der Spannungen als treibende Kraft der Kriechverformung:
 - Reduktion der BE-Niederhaltekräfte, z. B. acht Federbeine mit optimiertem Design (Stufen-NH) oder Reduktion von acht auf vier Federbeine,
 - Einsatz von dickwandigeren Führungsrohren, z. B. in AREVA HTP-BE, Westinghouse (WSE)-BE und
 - Reduzierung des hydraulischen Widerstandes der Brennelemente.
- Erhöhung der Kriechfestigkeit:
 - Kriechoptimierte Werkstoffe für Führungsrohre und Abstandshalter, z. B. in HTP-BE Q12, Westinghouse Low-Tin-ZIRLO oder der Einsatz von Stahlführungsrohren.
- Erhöhung der lateralen BE-Steifigkeit (steifere Brennelementskelette verringern die elastische Verformung und damit die Kriechverformung und somit die Gesamtverformung des BE) durch:
 - dickwandigere Führungsrohre,
 - steifere Abstandshalter-Führungsrohr-Verbindung und

-
- verbesserte Brennstab-Lagerung im Abstandhalter wie monometallische Abstandhalter aus kriechfesterem Material, z. B. Q12 und Low-Tin-ZIRLO.
 - Beladepläne:
 - Berücksichtigung der gemessenen BE-Verformungen,
 - Vorausberechnung der Verformung zur Berücksichtigung bei der Beladestrategie,
 - Einsatz einer erhöhten Anzahl von Brennelementen mit erhöhter Quersteifigkeit,
 - Brennelemente mit starken Verformungen nicht auf Steuerelemente(SE)-Positionen,
 - Brennelemente mit starken Verformungen schachbrettartig in der Kernmitte bzw. am Kernrand,
 - Reihen mit unterschiedlichen Brennelementtypen und
 - Drehen der Brennelemente oder Umsetzen in den Diagonalquadranten.
 - Maßnahmen zur Vermeidung von Handhabungsschäden bei Be- und Entladung:
 - Optimierung der Schrittfolge unter Berücksichtigung der ermittelten BE-Verformungen,
 - Aufzeichnung der Lastmessung bei der Handhabung mit der Lademaschine,
 - Einsatz von Hilfsmitteln (Dummy-BE, BE-Positionier-System „FUPSY“) zum Beladen,
 - versetztes Anfahren der Beladepositionen (HELIX) und
 - Reduzierung von Abstandhalter-Eckenfretting durch Änderung der Abstandshaltereckenkonturen.

5 Auswirkungen von Brennelement-Verformungen und deren Bewertung

Verformungen von Brennelementen während des Betriebes sind grundsätzlich nicht vermeidbar und tolerabel, solange sicherheitstechnische Funktionen nicht beeinträchtigt und die sicherheitstechnischen Schutzziele nicht verletzt werden.

5.1 Auswirkungen von BE-Verformungen auf die Kernausslegung und die Betriebsüberwachung des Reaktorkerns

Brennelementverformungen haben aufgrund der dadurch bedingten Veränderung der Spaltweite zwischen benachbarten Brennelementen Einfluss auf

- die lokale Brennstableistung infolge veränderter Moderation und
- die Wärmeübertragung vom Brennstab an das Kühlmittel infolge veränderter Massenströme und Kühlmittelenthalpie in den spaltnahen Unterkanälen.

Zu bewerten sind diese Einflüsse auf sicherheitstechnisch relevante Nachweisführungen.

5.1.1 Einflüsse von Brennelement-Verformungen auf die Leistungsdichteverteilung

Von AREVA wurde berichtet, dass sie mit dem im Rahmen der nuklearen Auslegung von BE eingesetzten 2D Programm CASMO Untersuchungen durchgeführt hat bezüglich des Einflusses von Spaltvergrößerungen auf die lokale Leistungsdichte der benachbarten Brennstabreihen [9]. Demnach ergeben sich merkliche Einflüsse auf die erste (äußerste) und zweite Brennstabreihe von außen. Die von AREVA ermittelten Leistungsüberhöhungsfaktoren sind in der folgenden Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Leistungsüberhöhungsfaktoren in Abhängigkeit von Wasserspaltvergrößerungen

Zusatzwasserspalt \ Leistungs- Erhöhung	5 mm	10 mm	15 mm
Erste BS Reihe	1,06	1,15	1,23
Zweite BS Reihe	1,02	1,05	1,08

Diese Leistungserhöhung baut sich im Laufe des Zyklus durch den verstärkten Abbrand infolge der erhöhten Spaltrate wieder ab. Laut AREVA [9] würde sich eine anfängliche Leistungserhöhung um 15 % nach ca. 75 Tagen auf unter 10 % bei konstantem Wasserspalt reduzieren.

Von AREVA wurden für eine Vorkonvoi Anlage Analysen mit 300 verschiedenen gewürfelten, kernweiten Spaltverteilungen durchgeführt [9]¹. Diese Analysen deuten darauf hin (Folien 20 und 21 in [9]), dass sich durch Spaltvergrößerungen

- sowohl die maximale lokale Leistungsdichte im Überwachungsbereich einzelner LVD als auch
- der kernweite Maximalwert der lokalen Leistungsdichte

erhöhen können. Für eine Quantifizierung der jeweiligen Effekte liegen der RSK derzeit keine ausreichenden Informationen vor.

¹ Die 300 unterschiedlichen kernweiten Spaltweitenverteilungen wurden auf Basis von vorhandenen Messdaten zu Biegemustern von Brennelementen und eines von AREVA entwickelten mechanistischen Modells zur Prognose von BE Verformungen unter Beachtung des im Kern insgesamt zur Verfügung stehenden Summenspaltes mit einem statistischen Ansatz ermittelt.

Detektion von Erhöhungen der lokalen Leistungsdichte infolge von BE-Verformungen durch die Kernüberwachung

Das Überwachungskonzept für den Reaktorkern basiert auf dem Kugelmesssystem und den Leistungsverteilungsdetektoren (LVD-System) [15]. Eine Erfassung der Einflüsse von BE-Verformungen im Rahmen der Kernüberwachung wäre dann möglich, wenn sich die Kugelmesspositionen an den Positionen befinden würden, die von den Änderungen der lokalen Leistungsdichte betroffen sind. Die räumlich verteilten Kugelmesspositionen befinden sich jedoch in der Regel nicht an BE-Positionen mit der höchsten Leistungsdichte und in den BE's selbst auch nicht an den spaltnahen Brennstabpositionen, sondern sind in der dritten BS Reihe von außen angeordnet. Dort sind die Effekte der Spaltänderungen auf die Stablängenleistung der Brennstäbe bereits so weit abgeklungen, dass sie mit den vorhandenen Messeinrichtungen nicht mehr erfasst werden können.

Spalterweiterungsbedingte lokale Leistungsdichteerhöhungen in BE-Randstäben können im existierenden Leistungsdichteüberwachungsprogramm somit nicht erfasst und wegen der fehlenden Kenntnis der realen Spaltweitenverteilung auch nicht abgebildet werden.

Hieraus ergibt sich die folgende Empfehlung:

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.

5.1.2 Auswirkungen von lokalen Leistungsdichteänderungen auf die Nachweisführung

Die Nachweisführung geht von Leistungsdichten aus, die nominalen Spaltweiten entsprechen. Für BE-Randstäbe können sich in Abhängigkeit von der Wasserspaltverteilung höhere lokale Stablängenleistungen einstellen als bei nomineller Spaltgröße. Daraus ergeben sich hinsichtlich der Nachweisführung die folgenden Auswirkungen, die die in Abschnitt 3 genannten Anforderungen zur Kernauslegung in [3], [4], [5], [6] betreffen:

- Brennstabauslegung, bestimmungsgemäßer Betrieb: Da höhere lokale Stablängenleistungen von BE-Randstäben auch längere Zeit anstehen können, ergeben sich Änderungen in den Leistungsgeschichten der betroffenen Brennstäbe. Diese können Auswirkungen auf folgende Auslegungsgrößen haben:
 - Sicherheitsebene 1: Brennstabinnendruck, plastische Hüllrohrdehnung, Hüllrohrkorrosion und H₂-Aufnahme,
 - Sicherheitsebene 2: Transiente Tangentialdehnung und Brennstoffzentraltemperatur.

-
- Heißstabanalyse KMV-Störfälle: Sofern sich durch BE-Verformungen das kernweite Maximum der lokalen Leistungsdichte erhöhen kann, wäre dessen Überwachung mit der PEAK-RELEB mit einem zusätzlichen Fehler behaftet, der durch den in der Heißstabanalyse angesetzten Fehlervorhalt möglicherweise nicht abgedeckt ist². Im Rahmen der zyklusspezifischen Nachweise auf Basis der für einzelne Abbrandklassen angesetzten maximalen lokalen Leistungsdichten werden ggf. vorhandene Einflüsse auf die Ermittlung der axialen Transformationsfunktion und der stabweisen Leistungsdichteverteilung für die Bestimmung der „konservativen Grenzverteilung“ der Leistungsdichte derzeit nicht explizit berücksichtigt.
 - Schadensumfanganalyse KMV-Störfälle: Im Rahmen zyklusspezifischer Nachweise zur Ermittlung des Dehn-Berst-Verhaltens der einzelnen Brennstäbe einer Kernbeladung werden ggf. vorhandene Einflüsse von BE-Verformungen auf die Ermittlung der „konservativen Grenzverteilung“ und die Einsatzgeschichte der Brennstäbe derzeit nicht explizit berücksichtigt.

Hieraus ergibt sich die folgende Empfehlung:

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.

5.1.3 Auswirkungen von BE-Verformungen auf die thermohydraulischen Eigenschaften des Reaktorkerns

Zur Quantifizierung der Auswirkungen von BE-Verformungen auf die thermohydraulische Kernausslegung, dabei insbesondere das DNB-Verhältnis, wurden von AREVA kernweite Unterkanalanalysen mit dem Programm COBRA-FLX durchgeführt [11]. Die Analysen waren Teil einer stationären Ganzkernrechnung

² Nach Kenntnis der RSK wird für Vor-Konvoi Anlagen im Rahmen von Nachweisen für KMV-Störfälle ein Fehler für die Überwachung der maximalen Stablängenleistung von 12 % des LOCA Ansprechwerts (475 W/cm) angesetzt. Demgegenüber werden für Nachweise zur Einhaltung des Grenzwertwerts für das DNB Verhältnis nur 8 % veranschlagt. Für Konvoi Anlagen liegt der bei KMV Nachweisen unterstellte Fehler bei > 13,5 % [10].

für eine Vorkonvoi-Anlage mit einer repräsentativen Kernbeladung. Die Biegemuster der Brennelemente im Kern wurden auf Basis von Messungen an freistehenden Brennelementen im Lagerbecken bestimmt, die mit einem bei AREVA entwickelten Modell zur Prognose des Biegeverhaltens auf die Verhältnisse im Kern zu BOC umgerechnet wurden.

Die Analysen ergaben einen nur marginalen Einfluss auf das kernweit minimale DNB-Verhältnis $DNBR_{min}$, obwohl für die spaltnahen BE-Randkanäle z. T. erhebliche Verminderungen des DNBR ermittelt wurden. Hierfür waren zwei Effekte ursächlich:

- Die Absenkung des DNBR um bis zu 10 % betraf Brennelemente, die hinsichtlich des DNBR nicht führend waren.
- Absenkungen des DNBR an Randkanälen von DNBR führenden Brennelementen traten zwar auf, waren aber nicht groß genug, um den minimalen DNBR-Wert des Brennelements abzusenken. Hintergrund ist, dass die Randkanäle deutlich höhere Werte für das DNBR aufweisen und durch die Spaltänderungen erst auf das Niveau im BE-Inneren reduziert werden müssten, um führend werden zu können. Auf Basis der Angaben in [11] lässt sich allerdings nicht beurteilen, ob das der Analyse zu Grunde liegende Biegemuster der Brennelemente im Kern zu einem deutlich vergrößerten Randspalt an einem hinsichtlich DNBR führenden Brennelement geführt hat. Somit ist derzeit nicht abschließend bewertbar, ob der dadurch verursachte Einfluss auf das DNBR durch die Ergebnisse in [11] abgedeckt ist.

Nach Aussage von AREVA, die von Westinghouse und der TÜV SÜD Energietechnik im Rahmen der Beratungen der RSK AG Brennelemente bestätigt worden ist, stellt sich das Minimum des DNBR bei nominaler Spaltgeometrie für die gegenwärtigen Kernbeladungen in den deutschen Anlagen jeweils im BE-Inneren nahe den Steuerstabführungsrohren ein. Da der RSK AG-BE derzeit aber keine abschließenden Erkenntnisse vorliegen, ob eine spaltveränderungsbedingte Verringerung des DNB-Verhältnisses an den äußeren Brennstäben Werte unterhalb des der Nachweisführung und der Überwachung zugrunde liegenden min. DNB-Verhältnisses im Inneren des BE erreichen kann, sollten ergänzende Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Hieraus ergibt sich die folgende Empfehlung:

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.

5.2 Auswirkungen von BE-Verformungen auf die Auslegung der Brennelement-Struktur

Bestimmungsgemäßer Betrieb

Die Auswirkungen möglicher Brennelement-Verformungen auf die im Rahmen der BE-Strukturauslegung zu berücksichtigenden Parameter lassen sich auf die Spannungs- und Stabilitäts-Analyse eingrenzen.

BE-Verformungen führen zur Veränderung des Beanspruchungszustandes in den Führungsrohren, die sich örtlich als Erhöhung der Biegespannungen auswirkt.

Hinsichtlich der Knickbeanspruchung (Stabilitätsanalyse) entwickelt sich das System mit zunehmender Vorverformung vom idealen Knickfall zu einer Beanspruchung mit Biegeverformung. Dabei nimmt die vom Brennelement abtragbare Kraft unter axialer Belastung (Knickkraft) bei einer Vergrößerung der Vorverformung an einem frei stehenden BE zwar ab, unter den im Kern vorhandenen Geometrieverhältnissen (eingeschränkter lateraler Freiraum) ergibt sich jedoch nur eine begrenzte Verformung der Führungsrohre und damit eine begrenzte Änderung der abtragbaren Kraft gegenüber dem Fall ohne BE-Vorverformung. Es ergibt sich eine Reduzierung der Reserven hinsichtlich der Knicksicherheit.

In Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad des Systems und dem Grad der BE-Verformung kann entweder die Spannungsbeanspruchung (einschließlich des Biegeanteils) oder die Knickbeanspruchung führend werden.

Mit den der RSK vorliegenden Kenntnissen lässt sich nicht ausschließen, dass die beobachteten BE-Verformungen einen relevanten Einfluss auf die vom Brennelement bzw. den Steuerstabführungsrohren, abtragbaren Lasten haben könnten.

Hieraus ergibt sich die folgende Empfehlung:

Empfehlung 4:

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

Störfälle, EVA und Notstandsfälle

Die Nachweise zur BE-Strukturauslegung haben das Ziel, zu zeigen, dass keine Verformungen an den BE auftreten, die den ungehinderten Steuerelementeinfall gefährden. Hierzu ist zu zeigen, dass

- bei Vertikalbelastungen die axiale Druckspannung in den Führungsrohren nicht zu einem Knicken der Führungsrohre führt und
- bei Horizontalbelastungen keine oder nur eine geringfügige laterale bleibende Verformung in den Abstandhalten auftritt.

Maßgeblich für die vertikale Beanspruchung ist der Lastfall „Kühlmittelverluststörfall“, für die horizontale Beanspruchung der Lastfall „Bemessungserdbeben“³.

Vertikalbelastungen:

Im Störfall wirken sich BE-Verformungen auf die Höhe der Vertikalbeanspruchung in gleicher Weise aus wie im bestimmungsgemäßen Betrieb. Es gelten daher die gleichen Schlussfolgerungen und dieselbe Empfehlung wie im Abschnitt zum bestimmungsgemäßen Betrieb dargelegt.

Horizontal-Belastungen:

Die maßgeblichen horizontalen Belastungen ergeben sich durch horizontale Stoßkräfte der Abstandshalter untereinander sowie zwischen Abstandshaltern und der Kernumfassung beim Lastfall Bemessungserdbeben.

Hinsichtlich der horizontalen Belastungen ergeben sich im Verlauf der Erdbebenanregung innerhalb der Kernumfassung unterschiedliche Spaltverteilungen im zur Verfügung stehenden Einbauraum, so dass die anfängliche Verteilung der Spalte zwischen den Brennelementen keinen sicherheitstechnisch relevanten Einfluss auf die mechanischen Beanspruchungen der Brennelemente hat.

5.3 Auswirkungen von BE-Verformungen auf den Steuerelementeinfall

Verstärkte BE-Verformungen können zu einer Vergrößerung der Reibkräfte zwischen den Steuerelementfingern und den Führungsrohren und folglich zu einer Verlängerung der SE-Fallzeiten führen. Insbesondere im Stoßdämpfer, d.h. dem unteren Bereich des Führungsrohres mit reduziertem Innendurchmesser, können die Reibkräfte so groß werden, dass das Steuerelement (SE) stecken bleibt und die untere Endstellung nicht erreicht.

Standardmäßig erfolgt der Nachweis der Einhaltung spezifizierter Einfallzeiten über eine Bewertung und Erprobung der Konstruktion ergänzt durch eine betriebliche Validierung im Rahmen der „Wiederkehrenden Prüfungen“:

- Bewertung der konstruktiven Gestaltung der Führungsrohre und deren Zusammenspiel mit den Steuerelementfingern,
- Erprobung der gewählten Konstruktion in Ex-Core-Versuchen,
- betriebliche Validierung anhand von „Wiederkehrenden Prüfungen“, die in den Betriebs- oder Prüfhandbüchern der Kraftwerksanlagen festgelegt sind.

³ Beim Lastfall Erdbeben treten sowohl horizontale als auch vertikale Beanspruchungen auf. Eine getrennte Behandlung der einzelnen Raumrichtungen ist ohne Einschränkungen nur bei linearem Strukturverhalten zulässig. Im Erdbebenfall liegt jedoch aufgrund der auftretenden Stoßbelastungen infolge des Kontakts zwischen einigen Abstandshaltern und – sofern anlagenspezifisch zulässig – des Stabilitätsversagens von Abstandshaltern ein nichtlineares Verhalten vor. Dennoch ist es nach Kenntnis der RSK in der Praxis üblich, dass eine getrennte Behandlung der horizontalen und vertikalen Einwirkungen erfolgt. Hintergrund ist die Überlegung, dass die maßgeblichen Beanspruchungen richtungsabhängig von unterschiedlichen Bauteilen aufgenommen werden: in vertikaler Richtung von den Steuerstabführungsrohren, in horizontaler Richtung von den Abstandshalterstegen.

Der RSK-Ausschuss RB hatte auf der 194. Sitzung angeregt, dass, soweit noch nicht Praxis in allen deutschen Anlagen, die Fallzeiten der Steuerelemente zum Beginn und zum Ende des Zyklus gemessen werden sollten. Aus solchen Messungen resultierende Betriebserfahrungen zeigen, dass bereits leichte Veränderungen der Einfallzeiten erkennbar sind und diese ein Indiz für beginnende SE-Schwergängigkeiten infolge von BE Verformungen sein können. Messungen an Reaktorkernen mit starken BE-Verformungen haben weiterhin gezeigt, dass sich die SE-Fallzeiten über den Zykluszeitraum verändern können, in solchen Fällen sind deshalb ergänzende Fallzeitmessungen innerhalb eines laufenden Zyklus erforderlich.

Bei größeren Auffälligkeiten wurden vereinzelt Weg-Zeitverläufe des Stabeinfalls und / oder Laufzeitoszillogramme aufgenommen.

Zur Absicherung der Befundlage bei verzögerten SE-Einfallzeiten und zur Verbesserung der Prognose für den betroffenen bzw. den nachfolgenden Zyklus gibt die RSK die folgende Empfehlung:

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.

Neben den in Betriebs- oder Prüfhandbüchern festgelegten SE-Fallzeitmessungen wurden in mehreren Kraftwerksanlagen bei Feststellung oder Verdacht auf verstärkte BE-Verformung Geradheitsmessungen an einer Stichprobe von entladenen Brennelementen durchgeführt. Beim Vorliegen von relevanten Befunden wurde die Stichprobe auf bis zu 100 % der Brennelemente ausgedehnt. Die RSK sieht die Durchführung derartiger Messungen und die systematische Auswertung der sich dabei ergebenden Datenbasis als ein geeignetes Mittel an, Trends und Einflussgrößen im Verformungsverhalten der Brennelemente zu erkennen sowie die Wirksamkeit von Abhilfemaßnahmen zu bewerten und ggf. Maßnahmen bei stärker verformten BE zu ergreifen. Hieraus leitet sich folgende Empfehlung ab.

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.

5.4 Auswirkungen von BE-Verformungen auf die BE-Handhabung

Verformungen der BE können zu Handhabungsschwierigkeiten beim Be- und Entladen des Reaktorkerns führen. Neben dem erhöhten Zeitaufwand für diese Handhabungen – ein rein betrieblicher Aspekt – besteht auch eine erhöhte Gefahr von Beschädigungen der Brennelemente (Abstandshalterschäden, Hüllrohrschäden).

Die Betriebsanweisungen zur Handhabung von Brennelementen sollten für solche Fälle Hinweise für den Umgang mit solchen BE und die Überwachung der Handhabungsvorgänge enthalten.

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.

5.5 Bewertungsgrößen für die konstruktive Ausführung

Im Rahmen der Beratungen wurde ersichtlich, dass die Steifigkeit der BE (BE-Skelett und Brennstäbe) und das Kriechverhalten der verwendeten Werkstoffe entscheidende Einflussgrößen für das Ausmaß der BE-Verformungen sind. Diesbezüglich gibt es derzeit allerdings keine spezifizierten quantitativen Bewertungsgrößen zur Beurteilung der konstruktiven Ausführung. Auch gibt es keine quantitativen Kriterien für die zulässigen Verformungen von Brennelementen.

Die Hersteller sehen die Festlegung solcher Bewertungsgrößen wegen der Komplexizität der Einflussfaktoren als schwierig an. Die RSK sieht die Definition solcher Bewertungsgrößen allerdings als eine erforderliche Maßnahme an, um das Risiko unerwünschter BE-Verformungen bzw. deren Folgen in Zukunft zu 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.

5.6 Fretting der Abstandshalterecken

In den letzten Jahren wurden in mehreren Kraftwerken in zunehmendem Maße Brennelement-Schäden durch Abstandshalter-Reibkorrosion an diagonal gegenüberliegenden Abstandshalterecken (Eckenfretting) beobachtet. Dieses betrifft sowohl die Anzahl der Schäden als auch den Schädigungsgrad, der von leichten Oberflächenabträgen über teilweise oder ganze Durchtrennung der Abstandhalter-Ecken bis hin zu Beschädigung des Eckbrennstabs mit Spaltproduktfreisetzung durch Kontakt mit der Ecke des Nachbar-Brennelementes führte.

Eckenkontakt diagonal benachbarter Abstandshalter kann nur dann auftreten, wenn die Brennelemente sich in einer Abstandshalterebene aufgrund von BE-Verformungen wie in Abbildung 1 verschoben haben.

251661312251660288

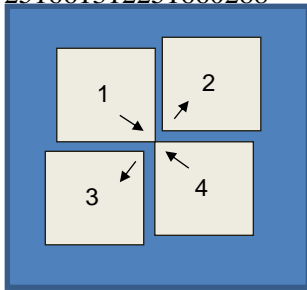


Abbildung 1: Gestörte Positionierung der BE und erhöhtes Risiko für Eckenfretting

Das Maß eines dabei möglicherweise auftretenden Reibabtrags hängt von dem Maß der Verschiebung sowie der konstruktiven Ausformung der Abstandshalterecke ab. Weiterhin ist eine Relativbewegung zwischen diagonal benachbarten Abstandshaltern, wie sie durch die BE-Schwingungen immer gegeben sind, erforderlich. Unter welchen evtl. noch zusätzlichen Bedingungen die Reibung zu einem erhöhten Abtrag führt, ist noch nicht geklärt.

Probleme mit Abstandshalter-Eckenfretting treten nicht ausschließlich in den Anlagen mit den größten Brennelement-Verformungen auf. Allerdings ist ein gewisses Maß an BE-Verformung immer erforderlich, um Eckenfretting auszulösen.

Eine Vorhersage bezüglich des Ausmaßes eventueller Eckenschäden und eine wirksame Prävention schließen zwar als Voraussetzung eine Bestimmung der BE-Verformung ein, darüber hinaus wären jedoch noch weitere Einflüsse zu quantifizieren. Der Kenntnisstand hierzu ist jedoch noch unvollständig. Allerdings können die einzelnen Einflussgrößen, die zur verstärkten BE-Verformung beitragen, auch hier – mit einer gewissen Unschärfe – als relevant angesehen werden und zur Verminderung des Schädigungsrisikos beitragen.

Entsprechend wurden von den Kraftwerksbetreibern mehrere Maßnahmen zur Vermeidung von Eckenfretting eingeführt, die die Verbesserung der Haupt-Einflussgrößen für die BE-Verformung zum Ziel haben.

Die Wirksamkeit der Einzelmaßnahmen ist aufgrund des Zusammenspiels mehrerer Faktoren schwierig zu beurteilen, zumal es mehrerer Nachladungen bedarf, bis die ausreichende Wirksamkeit eingeleiteter Maßnahmen bestätigt werden kann. Dennoch kann derzeit ein Trend dahingehend festgestellt werden, dass durch diese Maßnahmen das Ausmaß der Eckenschädigung vermindert wird.

Die derzeit betrieblich vorgesehenen Inspektionen, ggf. mit Erweiterung des Inspektionsumfangs bei Befunden, werden als geeignet angesehen, evtl. vorhandene BE-Beschädigungen sicher zu erkennen und für die betroffenen BE entsprechende Maßnahmen (z. B. Eckenaustausch, Brennstab austausch) einzuleiten.

Wiederholte Inspektionen an bereits vorgeschädigten, aber weiterbetriebenen BE haben ergeben, dass sich eine vorhandene Vorschädigung im Folgezyklus in der Regel nicht weiterentwickelt. Aufgrund der Umstellung der BE auf andere Kernpositionen mit anderen Nachbar-BE im Folgezyklus ergibt sich ein anderes globales Verformungsmuster im Kern, mit der Folge, dass nicht mehr die gleichen Ecken-Kontaktflächen aufeinandertreffen. Ein Weiterbetrieb von BE mit vorgeschädigten Abstandshalterecken unter Anwendung geeigneter Kernbeladungen kann für den Fall erwogen werden, dass trotz der vorliegenden Schädigungen noch eine sichere Brennstablagerung gewährleistet ist und ein Verhaken der Abstandshalterecke bei der Handhabung nicht zu befürchten ist.

6 Weitere Aspekte

Neutronenflussschwankungen

Die RSK hat sich mit dem Phänomen der erhöhten Neutronenflussschwankungen bei DWR Anlagen befasst und im Jahr 2013 eine Stellungnahme mit Empfehlungen veröffentlicht [13]. Im Zuge der Anhörungen zu den Ursachen und Auswirkungen von BE-Verformungen – insbesondere der Erfahrungen im Kernkraftwerk Emsland mit vergleichsweise niedrigen BE-Verbiegungen – ergaben sich Hinweise darauf, dass ein Zusammenhang zwischen der Höhe der Schwingungsamplituden der Neutronenflussschwankungen und dem Maß der Brennelementverbiegungen bestehen könnte. Auf der 232. Sitzung des RSK Ausschusses Reaktorbetrieb berichteten die Betreiber in ihrem jährlichen Sachstandsbericht zur Entwicklung und Ursachenklärung der Neutronenflussschwankungen.

Es wurde berichtet, dass eine zeitliche Korrelation zwischen den eingesetzten Brennelementtypen und ihrer Steifigkeit einerseits und der Zu- bzw. Abnahme der Neutronenflussschwankungen andererseits festgestellt werden konnte. Dies weist darauf hin, dass die Stärke der transportierten Reaktivitätsstörungen im Kern eine Funktion der Brennelementsteifigkeit ist. Gleichwohl besteht noch keine Klarheit darüber, auf welchen mechanischen/physikalischen Vorgängen im Kern die Neutronenflussschwankungen beruhen.

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.

Literatur

- [1] Schreiben BMU RS I 3 – 17018/1 vom 05.07.2012
Verformungen von Brennelementen, Schäden an Niederhaltefedern und Abstandshaltern
Neutronenflussschwankungen usw.
- [2] American Nuclear Society
Light Water Reactors Fuel Assembly Mechanical Design and Evaluation
ANS-57.5-1996
- [3] Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke
BMU 22. Nov. 2012
- [4] Interpretationen zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke
BMU 29. Nov. 2013 (BA nz AT 10.12.2013 B4)
- [5] KTA 3101.1
Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren
Teil 1: Grundsätze der thermohydraulischen Auslegung
- [6] KTA 3101.2
Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren
Teil 2: Neutronenphysikalische Anforderungen an Auslegung und Betrieb des Reaktorkerns und
der angrenzenden Systeme
- [7] KTA 3101.3 Entwurf
Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren
Teil 3: Mechanische und thermische Auslegung
- [8] VdTÜV Beschluss 153 für Sachverständigentätigkeiten bei der Prüfung der thermomechanischen
Auslegung, der Konstruktion, der Herstellung und dem Betrieb von Kernbauteilen
- [9] AREVA; Einfluss von Wasserspalten auf das Reaktivitätsverhalten von DWR Kernen; RSK
Ausschuss REAKTORBETRIEB, Bonn, 27. Oktober 2010
- [10] AREVA; Kernüberwachung/Kernschutz Siemens DWR - RSK AG-BE, 13. September 2013
- [11] Einfluss von BE-Verbiegungen auf die Filmsiedesicherheit (DNB-Verhältnisse); RSK-AG
Brennelemente, Erlangen, 6. Juni 2013
- [12] RSK/ESK-Geschäftsstelle, RSK-Information RB/Zusammenfassung, 10.12.2012
Beratungsergebnisse des RSK-Ausschusses REAKTORBETRIEB zum Thema „Stand und
Entwicklung von Brennelement-Verformungen, Niederhaltefedern etc.“
Beratungsunterlage zur 1. Sitzung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe BE am 10.01.2013

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