

Anforderungen an die statistische Nachweisführung bei Kühlmittelverluststörfall-Analysen

1 Anlass der Beratung

Gemäß der Empfehlung der RSK vom 20./21.7.2005 (385. RSK Sitzung) [1] ist auch bei einem sogenannten „best-estimate“-Vorgehen in der Nachweisführung (mit expliziter Berücksichtigung von Unsicherheiten) im Hinblick auf die Ausgangsleistung im Kern zum Zeitpunkt des Störfalleintritts von ungünstigsten Werten auszugehen (bis auf die statistische Berücksichtigung von Mess- und Kalibrierfehlern), die im bestimmungsgemäßen Betrieb unter Berücksichtigung der Begrenzungseinrichtungen in der integralen Leistung und in der Leistungsdichte auftreten können.

Diese Festsetzung führt in der Anwendung dazu, dass bei einer „best-estimate“-Nachweisführung Kombinationen von Maximalwerten für die integrale Leistung und lokale Leistungsdichte zugrunde gelegt werden, die nur theoretisch erreichbar sind.

Weiterhin ist festzustellen, dass die Mischung von deterministisch-konservativer und statistischer Vorgehensweise es erschwert, den Einfluss einzelner Parameter zu bewerten. Eine statistische Behandlung weiterer Parameter, hier integrale Leistung und Leistungsdichte, erlaubt dagegen eine genauere Beurteilung.

Auf Grundlage der Beratungen im RSK-Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK (AST) (92. Sitzung) regte das BMUB an, die Empfehlung der RSK aus ihrer 385. Sitzung diesbezüglich auf den Bedarf für eine Aktualisierung zu überprüfen.

2 Beratungsgang

Der Ausschuss AST hatte in seiner 93. Sitzung am 24.10.2013 eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe zum Thema „Statistische LOCA-Analyse¹“ eingesetzt, die klären sollte, welche Anfangs- und Randbedingungen bei einer statistischen LOCA-Analyse konservativ gesetzt werden sollten und welche statistisch behandelt werden können. Dabei sollte in erster Linie die Frage der Aktualisierung der Empfehlung der RSK zu Anforderungen an die Nachweisführung bei Kühlmittelverluststörfall-Analysen (Anlage 1 zum Ergebnisprotokoll der 385. RSK-Sitzung am 20/21.07.2005) geklärt werden.

Die Ad-hoc-AG hat sich u. a. mit der Frage befasst, ob bzw. mit welchen Anforderungen man bei einer „best-estimate“-Nachweisführung von der in [1] festgelegten konservativen Setzung derart abweichen kann, dass

¹ In dieser Stellungnahme wird unter statistischer LOCA-Analyse eine best-estimate-Analyse mit statistischer Behandlung von Unsicherheiten verstanden, bei der einzelne Parameter konservativ gesetzt sein können.

die integrale Leistung und die maximale lokale Leistungsdichte bei der Nachweisführung unter Heranziehung statistischer Methoden über die Mess- und Kalibrierfehler hinaus durch Ermittlung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung behandelt werden können.

Die Arbeitsgruppe tagte am 07.11.2013 und am 17.12.2013 und bereitete den Entwurf einer Stellungnahme zu Anforderungen an die statistische Nachweisführung bei Kühlmittelverluststörfall-Analysen vor. Nach zwischenzeitlichen Beratungen der Stellungnahme in der 96., 97. und 98. Sitzung des Ausschusses AST am 28.03.2014, am 08./09.05.2014 und am 17.07.2014 setzte die Arbeitsgruppe ihre Beratungen am 23. Und 24.07.2014 fort. In ihrer 4. Sitzung am 17.10.2014 schloss sie ihre Beratungen ab. Die vorbereitete Unterlage wurde vom Ausschuss AST in seiner 101. Sitzung am 23.10.2014 beraten und verabschiedet. Die RSK verabschiedete die Stellungnahme in ihrer 475. Sitzung am 15.04.2015.

3 Bewertungsmaßstab

Gemäß der RSK-Empfehlung aus der 385. Sitzung [1] gilt als übergeordneter Bewertungsmaßstab für eine Störfallanalyse, dass die Einhaltung der Nachweiskriterien mit einer hohen Aussagesicherheit nachgewiesen wird. In Bezug auf die Nachweisführung bei Kühlmittelverluststörfällen (KMV Störfällen) wird in [1] ausgeführt:

„In Anlehnung an das internationale Vorgehen stellt die RSK fest, dass im Rahmen einer best-estimate-Analyse nachzuweisen ist, dass die quantitativen Nachweiskriterien mit hoher Sicherheit eingehalten werden. Eine hohe Aussagesicherheit ist gegeben, wenn das mit mindestens 95 % Wahrscheinlichkeit und 95 % statistischer Sicherheit ermittelte Ergebnis unterhalb der Nachweiskriterien liegt.

Mit den deterministischen Vorgaben (Abschnitt 4.2.) und durch die Quantifizierung der Unsicherheiten von Rechenergebnissen mit diesen Toleranzgrenzen wird nach Ansicht der RSK der Nachweis bei einem KMV Störfall mit hinreichender Aussagesicherheit gewährleistet.“

Dieser Ansatz ist in die „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ [2] eingeflossen, dort in Anhang 5, Nr. 3.3 (3)² sowie im Hinblick auf „deterministische Vorgaben“ bei der Nachweisführung zu Kühlmittelverluststörfällen in die Anlage 1 des Anhang 5, Nr. A1 (1).

Neben dem Einsatz einer für statistische Analysen geeigneten Methodik sind entsprechend dem oben dargestellten Grundgedanken der RSK-Stellungnahme

- sowohl Verteilungen von Eingangsparametern zur Quantifizierung von Unsicherheiten zu ermitteln, soweit dies auf der Grundlage einer ausreichenden Datenbasis oder durch nachvollziehbare Annahmen und Grenzbetrachtungen möglich ist,

² Zitat aus [2]:

„Werden bei der Ermittlung der Gesamtunsicherheit statistische Verfahren angewandt, ist die in Richtung des Nachweiskriteriums gehende einseitige Toleranzgrenze zu ermitteln, wobei für die Einhaltung des Nachweiskriteriums eine Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % mit einer statistischen Sicherheit von mindestens 95 % nachzuweisen ist.“

-
- als auch Setzungen zu Parametern, die nicht mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung versehen werden, so vorzunehmen, dass der Nachweis zur Einhaltung der Nachweiskriterien mit einer hohen Aussage-sicherheit gemäß [1] gegeben ist.

Zu den in [1] aufgeführten „deterministischen Vorgaben (Abschnitt 4.2)“ gehören auch anzusetzende Werte für die integrale Leistung des Reaktorkerns und die maximale lokale Leistungsdichte zum Zeitpunkt des Stör-falleintritts (im folgenden Zitat durch Unterstreichung markiert):

„Im Folgenden werden Postulate zum Szenario deterministisch vorgegeben, mit denen die Wirk-samkeit des Notkühlsystems nachzuweisen ist und die sich hinsichtlich der Einhaltung der Nach-weiskriterien konservativ auswirken.

Im Rahmen einer Notkühlanalyse werden z. B. Ausfälle von Systemen nicht probabilistisch behan-delt. Für die Analysen wird deshalb definiert die ungünstigste Kombination aus:

- *einem zu unterstellenden Einzelfehler,*
- *einem Ausfall infolge Instandhaltung,*
- *der Bruchlage,*
- *der Bruchgröße und dem Bruchtyp,*
 - *Doppelendiger Bruch von 1F bis 2F,*
 - *kleines Leck,*
- *dem Notstromfall,*
- *der Ausgangsleistung im Kern (Bei Störfalleintritt ist von den ungünstigsten Werten auszuge-hen, die im bestimmungsgemäßen Betrieb unter Berücksichtigung der Begrenzungseinrichtun-gen in der integralen Leistung und in der Leistungsdichte auftreten können. Mess- und Kalib-rierfehler können statistisch berücksichtigt werden.) und*
- *dem Zykluszeitpunkt.“*

(siehe entsprechend auch in [2], dort in Anlage 1 des Anhang 5, Nr. A1 (1)).

Bei der Frage, ob in der Nachweisführung zum Kühlmittelverluststörfall

- über die Mess- und Kalibrierfehler hinaus die anzusetzende integrale Leistung und die maximale lokale Leistungsdichte unter Heranziehung statistischer Methoden entsprechend ihren Häufigkeitsverteilun-gen behandelt werden können,

ist aus Sicht der RSK daher zu prüfen und zu bewerten,

- unter welchen Anforderungen der KMV-Nachweis auch ohne die „deterministischen Vorgaben“ zur integralen Leistung und Leistungsdichte gemäß [1], Abschnitt 4.2, bzw. gemäß [2], Anhang 5, Anla-ge 1, geführt werden kann.

4 Beratungsergebnisse

Aus Sicht der RSK kann bei einer statistischen Nachweisführung von der in [1] bzw. [2] (siehe auch in den RSK LL aus 1981, Abschnitt 22.1.3 (1) Nr. 12) festgelegten Vorgabe, wonach bei Störfalleintritt im Hinblick auf die Ausgangsleistung im Reaktorkern von den ungünstigsten Werten auszugehen ist, die im bestimmungsgemäßen Betrieb unter Berücksichtigung der Begrenzungseinrichtungen in der integralen Leistung und in der Leistungsdichte auftreten können, unter folgenden Bedingungen abgewichen werden:

1 Aussage über die Gesamtheit der Brennstäbe:

Unabhängig davon, welche Methodik zur Nachweisführung gewählt wird, muss die gewonnene Aussage für die Gesamtheit der Brennstäbe (BS) gelten. Es ist also nicht ausreichend, wenn lediglich für den „ungünstigsten“ realen (ohne Pönalisierung) BS im Reaktorkern nachgewiesen wird, dass er mit mindestens 95 % Wahrscheinlichkeit und 95 % statistischer Sicherheit das Nachweiskriterium einhält. Da es in Reaktorkernen einige tausend BS geben kann, die dem „ungünstigsten“ Brennstab relativ nahe kommen, könnte es trotz des Nachweises für den „ungünstigsten“ BS sein, dass mit nennenswerter Wahrscheinlichkeit mehrere BS das Kriterium nicht einhalten. Deshalb ist bei einer Nachweisführung mit statistischer Behandlung von Unsicherheiten das Kriterium so anzuwenden, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % bei einer statistischen Sicherheit von mindestens 95 % höchstens ein BS das Nachweiskriterium überschreitet.

Eine Nachweisführung gemäß [1] kann in der Praxis dazu führen, dass für die Analyse ein Einzelstabansatz derart herangezogen wird, dass ein fiktiver Brennstab mit vorgegebenen Randbedingungen (insbesondere hinsichtlich der lokalen Leistungsdichte, der Leistung des umgebenden Brennelements und der axialen Leistungsverteilung) konstruiert und pönalisiert wird („Heißstab Einzelstabansatz“). Wenn für diesen Heißstab gezeigt wird, dass er mit mindestens 95 % Wahrscheinlichkeit und 95 % statistischer Sicherheit das Nachweiskriterium einhält, war in [1] aufgrund der Pönalisierung davon ausgegangen worden, dass für die Gesamtheit der realen BS einer Kernbeladung das Kriterium eingehalten wird³ (Beitrag aller realen BS zur Überschreitenswahrscheinlichkeit des Nachweiskriteriums im Vergleich zum konstruierten BS vernachlässigbar).

Aus Sicht der RSK ist auch jeder andere Einzelstabansatz, der andere Festlegungen zu den o. g. Parametern oder ihrer Wahrscheinlichkeitsverteilungen vornimmt, als geeignet anzusehen, sofern die Anforderungen des Ganzkernansatzes erfüllt werden (siehe 1. Absatz dieses Abschnitts).

Aus Sicht der RSK kann ebenso ein Verfahren herangezogen werden, das eine Aussage über die Gesamtheit der Brennstäbe gewinnt, indem nicht ein einzelner fiktiver BS, sondern eine hinreichend großen Menge der ungünstigen realen BS im Kern analysiert wird⁴.

³ In der Praxis ist es heute nicht mehr möglich, einen einzelnen Brennstab für alle Abbrandzustände zu verwenden, sondern es wird jeweils ein Brennstab für einen Abbrandbereich betrachtet, da sich Abbrandeffekte nicht durch Leistungszuschläge abdecken lassen.

⁴ Dazu kann aus der Gesamtzahl der BS im Reaktorkern oder der Gesamtzahl der Rechenfälle eine Vorauswahl z.B. aufgrund von Rechenergebnissen für den Brennstabzustand vor LOCA oder ingenieurmäßigen Bewertungen getroffen werden, um die Anzahl der erforderlichen thermohydraulischen Rechnungen auf einen handhabbaren Umfang zu beschränken.

2 Wahl der Wahrscheinlichkeitsverteilungen:

Sofern in der Analyse die integrale Leistung und die maximale lokale Leistungsdichte statistisch behandelt werden, ist darzulegen, dass die verwendeten Wahrscheinlichkeitsverteilungen im zu betrachtenden Zyklus (oder gegebenenfalls Zyklus-übergreifend) hinreichend zuverlässig eingehalten werden. Dies gilt im Übrigen für alle weiteren derart in der Analyse angesetzten Parameter.

Für die Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen ist abdeckend von Volllastzuständen auszugehen. 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. In die in der Analyse berücksichtigten Verteilungen sind die Ansprechwerte der entsprechenden Begrenzungen einzubeziehen. Bei der maximalen Leistungsdichte sind zusätzlich die Auswirkungen von Brennelementverbiegungen zu bewerten und ggf. zu berücksichtigen (siehe [3]).

Bei der Auswahl der Parameterkombinationen im Rahmen der statistischen Nachweisführung sollte darauf geachtet werden, dass die Kombinationen physikalisch konsistente Datensätze darstellen, unter Beachtung ggf. bestehender Abhängigkeiten wie z. B. vom Abbrand.

3 Weitere Bedingungen

Die deterministischen Vorgaben aus [1] für die integrale Leistung des Reaktorkerns und die maximale lokale Leistungsdichte zum Zeitpunkt des Störfalleintritts führen im Vergleich zu einer Analyse, bei der auch diese beiden Einflussgrößen statistisch behandelt werden, tendenziell zu ungünstigeren Analyseergebnissen, da es sich bei diesen Größen um sensitive Eingabeparameter handelt.

Hauptziel der Anwendung der statistischen LOCA-Analyse mit statistischer Behandlung von Leistung und Leistungsdichte ist es, die Auswirkungen von Effekten und ihren Kombinationen sowie von deterministischen Setzungen auf die Analyseergebnisse klarer zu quantifizieren und damit besser bewerten zu können. Die Ergebnisse solcher Analysen sollten jedoch nicht genutzt werden, um Ansprechwerte in den Begrenzungssystemen für Leistung und Leistungsdichte gegenüber dem aktuellen Genehmigungsstand zu erhöhen.

Bei einer Weiterentwicklung des Kenntnisstandes zu relevanten Effekten in der Analyse des Kühlmittelverluststörfalls ist jeder Effekt, der in der Analyse bisher nicht oder nicht ausreichend erfasst ist, hinsichtlich seiner Auswirkungen auf das Analyseergebnis zu bewerten und ggf. zu berücksichtigen.

Erläuterungen zur Anwendung

Statistische und konservativ-deterministische Nachweisführungen sind nach [2] gleichermaßen zulässig. Bei den bisherigen, den Genehmigungen zugrundeliegenden konservativ-deterministischen Nachweisführungen ist zu beachten, dass sie durch konservative Setzungen in der Analyse in einem gewis-

sen Umfang auch Margen für nicht berücksichtigte Effekte enthalten. Wenn sich aufgrund neuerer Kenntnisse zu Effekten für eine konservativ-deterministische Nachweisführung die Frage stellt, ob diese Effekte durch diese Margen weiterhin abgedeckt sind, kann dies auch durch eine statistische Nachweisführung überprüft werden, in der der aktuelle Kenntnisstand zu den Effekten quantitativ berücksichtigt ist.

Wenn das Ergebnis der unveränderten konservativ-deterministischen Nachweisführung einen geringeren Abstand vom Nachweiskriterium hat als das Ergebnis der statistischen Nachweisführung unter Berücksichtigung des gesamten aktuellen Kenntnisstandes zu den Effekten⁵, kann die konservativ-deterministische Nachweisführung weiterhin verwendet werden. Andernfalls ist die konservativ-deterministische Nachweisführung – falls sie weiterhin genutzt werden soll – so zu ergänzen, dass sie das Ergebnis der statistischen Nachweisführung abdeckt. Bei hinsichtlich der überprüften Effekte relevanten Änderungen der Kernaussage oder der Betriebsweise des Reaktors ist die weitere Gültigkeit des Überprüfungsergebnisses zu bewerten.

Ohne Nutzung der statistischen Nachweisführung kann eine ausreichende Marge der konservativ-deterministischen Nachweisführung alternativ auch durch einen angemessenen Zuschlag bei einem Eingangsparameter oder durch einen Zuschlag auf das konservativ-deterministische Rechenergebnis zur Berücksichtigung nicht modellierter Effekte abgesichert werden (siehe auch [2] Anhang 5, Abschnitt 3.4), vorzugsweise jedoch durch eine konservative Modellierung der bislang nicht berücksichtigten Effekte.

5 Quellen

- [1] RSK-Empfehlung „Anforderungen an die Nachweisführung bei Kühlmittelverluststörfall-Analysen“, Anlage 1 zum Ergebnisprotokoll der 385. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 20./21.07.2005
- [2] Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke
3. März 2015, BAnz AT 30.03.2015 B2
- [3] RSK-Empfehlung „Verformungen von Brennelementen in deutschen Druckwasserreaktoren (DWR)“, Anlage zum Ergebnisprotokoll der 474. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 18.03.2015

⁵ Für die Überprüfung des Ergebnisses der konservativ-deterministischen Nachweisführung ist der Wert aus der Menge an Monte-Carlo-Rechenläufen (z. B. im Hinblick auf die maximale Hüllrohrtemperatur) zu verwenden, der die Einhaltung der statistischen Nachweiskriterien gemäß Einzelstab- oder Gesamtkernansatz sicherstellt. Wird beispielsweise ein Verfahren nach Wilks in niedrigster Ordnung angewendet (d. h. die Mindestzahl an Monte-Carlo-Rechenläufen durchgeführt), ist dies der Maximalwert (z. B. der maximalen Hüllrohrtemperatur) aller Rechenläufe.