

## **RSK - EMPFEHLUNG**

### **Anforderungen an die Nachweisführung bei Kühlmittelverluststörfall-Analysen**

20./21.07.2005 (385. Sitzung)

#### **1 Beratungsauftrag**

In ihrer 363. Sitzung am 04./05.06.2003 wurde die RSK von der GRS im Rahmen der Beratungen zu probabilistischen Methoden und Verfahren und deren Anwendung bei sicherheitstechnischen Fragestellungen in der Kerntechnik in Deutschland und im Ausland über die Aussagesicherheit von thermohydraulischen Rechenergebnissen informiert. Die RSK bat den Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK, dieses Thema zu beraten und vor dem Hintergrund des fortgeschrittenen Kenntnisstandes Empfehlungen für die Nachweismethoden zu erarbeiten.

#### **2 Beratungsgang**

Der Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK wurde in seiner 18. Sitzung am 23.05.2003 von der GRS im Rahmen seiner Beratungen zur Erhöhung der thermischen Reaktorleistung des Kernkraftwerkes Grafenrheinfeld (KKG) über die Behandlung der Unsicherheit von Rechenprogrammergebnissen zum Kühlmittelverluststörfall (KMV-Störfall) informiert [1]. Aufgrund der Ausführungen der GRS stellte der Ausschuss fest, dass die heute praktizierte Vorgehensweise mit realistischen („best estimate“) Rechenprogrammen und konservativen Anfangs- und Randbedingungen, jedoch ohne Berücksichtigung der Modellunsicherheiten, bei KMV-Störfallanalysen nicht zwangsläufig zu konservativen Ergebnissen führen müsse. Er verwies auf den Entwurf der KTA-Basisregel 6, in der bei Verwendung von „best-estimate“ Rechnungen die Bestimmung der Unsicherheiten vorgeschlagen worden sei.

In ihrer 363. Sitzung am 04./05.06.2003 hörte die RSK einen Bericht der GRS zur Bestimmung der Aussagesicherheit von thermohydraulischen Rechenergebnissen an [2]. Die RSK stellte fest, dass nach ihrer Meinung die Unsicherheiten der Modelle der Rechenprogramme quantifiziert werden sollten. Die weitere Diskussion sollte im RSK-Ausschuss ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK stattfinden, der dieses Thema in seiner 23. Sitzung am 18.12.2003 beriet und diesbezügliche Berichte des Herstellers [3] und der GRS [4] anhörte. Der Ausschuss bereitete den Entwurf dieser Stellungnahme in seiner 24., 25., 28. 30. und 31. Sitzung am 05.02.2004, am 30.03.2004, am 08.09.2004, am 09.12.2004 und am 03.02.2005 vor und verabschiedete ihn in seiner 32. Sitzung am 30.03.2005.

### **3 Bewertungsmaßstäbe**

Zweck von KMV-Störfallanalysen ist der Nachweis der diesbezüglich erforderlichen Schadensvorsorge. Die erforderliche Schadensvorsorge gilt als nachgewiesen, wenn die im kerntechnischen Regelwerk definierten Nachweiskriterien (22.1.1 in den RSK-Leitlinien [7]) eingehalten werden.

Bewertungsmaßstab für eine Analyse ist die Einhaltung der Nachweiskriterien mit einer hohen Sicherheit. Der Stand von Wissenschaft und Technik wird dabei auch durch die internationale Vorgehensweise, z. B. in den USA [10,11,12] und in Veröffentlichungen der IAEA [8,9] bestimmt.

### **4 Anforderungen an die Durchführung von KMV-Analysen (Notkühlanalysen)**

#### **4.1 Hintergrund**

Die in den RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren [7] im Abschnitt 22.1.3 aufgelisteten konservativen „Annahmen für die Kernnotkühlrechnungen“ werden zunehmend weniger verwendet, da inzwischen die in den RSK-Leitlinien empfohlene Verwendung experimentell abgesicherter Modelle fortgeschritten ist. In KMV-Analysen werden seit Jahren realistische ("best-estimate") Rechenprogramme für die Beschreibung der physikalischen Prozesse verwendet. Diese Rechenprogramme wurden und werden weiterhin verbessert und anhand von umfangreichen Experimenten validiert. Das Ziel der Verwendung dieser Rechenprogramme ist es, physikalisch möglichst realistische Ergebnisse zu erhalten.

Trotz Validierung der Rechenmodelle verbleibt ein Unsicherheitsband aufgrund von Modellunsicherheiten sowie der Unsicherheiten der Anlagen- und Brennstabparameter, z. B. Streuungen von Messwerten, Vereinfachungen in der Modellierung sowie aufgrund von Variation und ungenauer Kenntnis der Anfangs- und Randbedingungen, sowie auch deshalb, weil Modelle unter Berücksichtigung von Experimenten entwickelt werden, mit denen das komplexe Verhalten einer Reaktoranlage im Störfall nur näherungsweise ermittelt wird. Es ist daher bei diesem Rechenverfahren nicht ersichtlich, mit welcher Wahrscheinlichkeit und statistischen Sicherheit das Ergebnis unterhalb des Nachweiskriteriums liegt.

Weiterhin wurde davon ausgegangen, dass die Unsicherheiten der Analysen durch konservative Randbedingungen und Annahmen abgedeckt werden. Ein quantitativer Nachweis dafür fehlt jedoch, so lange nicht durch Unsicherheitsanalysen diese Abdeckung nachgewiesen wird. Eine von der GRS durchgeführte Unsicherheitsanalyse [1,2] zum großen doppelendigen Bruch in der kaltseitigen Hauptkühlmittelleitung eines Druckwasserreaktors hat Hinweise darauf gegeben, dass Rechenergebnisse mit einem oberen Unschärfband von 95 % Wahrscheinlichkeit (Quantil) und 95 % statistischer Sicherheit nicht zwangsläufig mit einer Rechnung abgedeckt werden, bei der die konservativen Anfangs- und Randbedingungen des Regelwerkes zu Grunde gelegt werden. Dies sei im Wesentlichen damit begründet, dass die konservativen Anfangs- und Randbedingungen für die Kernnotkühlrechnungen nicht die mit den verwendeten Modellen verbundenen Unsicherheiten abdecken.

Ein Nachweis auf Basis von best-estimate-Analysen erfordert aus Sicht der RSK daher eine Quantifizierung der Modellunsicherheiten sowie der Datenunsicherheiten der Anlagen- und Brennstabparameter.

In den folgenden Abschnitten werden Anforderungen an die Durchführung von KMV-Störfallanalysen formuliert (Notkühlanalysen zum Nachweis der Wirksamkeit der Notkühlsysteme). Unterschieden wird zwischen einer Nachweisführung mit einem realistischen Vorgehen mit Unsicherheitsanalyse und einer Nachweisführung mit einem demgegenüber vereinfachten Vorgehen. Im ersten Fall werden bei der Nachweisführung die mit der Ergebnisermittlung verbundenen Unsicherheiten explizit ausgewiesen und in der Ergebnisbewertung berücksichtigt. Im zweiten Fall sind diese Unsicherheiten durch ein vereinfachtes Vorgehen konservativ im Hinblick auf das Nachweisziel abzudecken.

## 4.2 Deterministische Vorgaben

Im Folgenden werden Postulate zum Szenario deterministisch vorgegeben, mit denen die Wirksamkeit des Notkühlsystems nachzuweisen ist und die sich hinsichtlich der Einhaltung der Nachweiskriterien konservativ auswirken.

Im Rahmen einer Notkühlanalyse werden z. B. Ausfälle von Systemen nicht probabilistisch behandelt. 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 auszugehen, die im bestimmungsgemäßen Betrieb unter Berücksichtigung der Begrenzungseinrichtungen in der integralen Leistung und in der Leistungsdichte auftreten können. Mess- und Kalibrierfehler können statistisch berücksichtigt werden.) und
- dem Zykluszeitpunkt.

Gegebenenfalls sind Sensitivitätsanalysen für die Bestimmung der ungünstigsten Bedingungen erforderlich. Weitere relevante Annahmen der RSK-Leitlinien, Abschnitt 22.1.3 [7], die nicht durch experimentell abgesicherte Modelle im Rechenprogramm berücksichtigt werden, sind der Analyse entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik zu Grunde zu legen. Diese sind Ziffer (1) 8. (Pumpenverhalten), (1) 10. (Durchsatzreduktion) sowie Ziffer (2) (langfristige Vermeidung der Dampfabgabe aus der Druckführenden Umschließung) und (3) (Zulaufhöhe der Nachkühlpumpen nach Umschaltung auf Sumpfbetrieb).

### **4.3 „Best-estimate“-Vorgehen**

Eine Analyse unter Berücksichtigung des „best-estimate“-Vorgehens ist mit einem „best-estimate“-Rechenprogramm durchzuführen. Zudem erfordert eine solche Nachweisführung, die Unsicherheit des Rechenergebnisses, d. h. die Aussagesicherheit der Rechenergebnisse zu quantifizieren.

Die für die Durchführung einer KMV-Störfallanalyse benötigten Anfangs- und Randbedingungen und Parameterwerte sind im Hinblick auf die Art und Weise ihrer Festlegung zu unterscheiden in Bedingungen, die deterministisch vorgegeben werden (siehe Abschnitt 4.2) und solche, die statistisch behandelt werden können.

#### **4.3.1 Rechenprogramme**

Ein „best-estimate“-Rechenmodell muss die relevanten physikalischen Prozesse während der zu untersuchenden KMV-Störfälle realitätsnah beschreiben können. Dies ist im Wesentlichen im Rahmen der Validierung des Rechenprogramms anhand von relevanten Experimenten und von Kenntnissen über das Verhalten der Reaktoranlage nachzuweisen.

Validierung ist ein Prozess, in dem ein Vergleich von Ergebnissen von Rechenprogrammen (mit den darin enthaltenen Modellen) mit experimentellen Messergebnissen durchgeführt und dokumentiert wird. Experimente, die bereits für die Entwicklung der Rechenmodelle verwendet wurden, sollen für die Validierung nicht herangezogen werden. Die Eignung eines Rechenprogramms muss in einer ausreichenden Zahl von Experimenten für den Anwendungsbereich gezeigt worden sein. Dabei müssen auch Skalierungseffekte berücksichtigt werden, die dadurch entstehen, dass die meisten experimentellen Daten, die im Rahmen der Validierung verwendet werden, an kleineren Experimentalanlagen als die Reaktoranlage gemessen wurden. Der Validierungsprozess muss nachvollziehbar dokumentiert sein.

#### **4.3.2 „best-estimate“-Analyse und Behandlung unsicherer Parameter**

Eine „best-estimate“-Analyse soll

- „best-estimate“-Rechenprogramme verwenden, in denen möglichst realistische Annahmen für Modellparameter enthalten sind,

und muss

- die im Abschnitt 4.2 dargestellten Vorgaben und Randbedingungen berücksichtigen sowie
- die Unsicherheit des Rechenergebnisses quantifizieren.

Für eine best-estimate-Analyse sind die relevanten Unsicherheiten der Modelle und der Eingabedaten zu identifizieren und zu quantifizieren.

Die Bezeichnung “Unsicherheit” oder “Aussagesicherheit” von best-estimate-Rechnenergebnissen umfasst verschiedene Beiträge, die zur gesamten Unsicherheit eines Rechenergebnisses beitragen.

Die Unsicherheitsanalyse soll dabei folgende Unsicherheiten erfassen, die durch ungenaue Kenntnis von Eingangsparametern bedingt sind:

- Unsicherheiten einzelner Rechenmodelle: Unsicherheiten der einzelnen Modelle des Rechenprogramms sind auf der Basis experimenteller Ergebnisse zu bestimmen.
- Ungenaue Kenntnis der Anlagenzustände: Statistisch zu berücksichtigen sind z. B. Anfangswerte für Drücke, Temperaturen, Massenströme, Brennstabeigenschaften, die Nachzerfallswärme sowie Mess- und Kalibrierfehler. Parameter, für die Punktwerte festgelegt werden können, die gesichert zu konservativen Ergebnissen führen, können mit dem jeweiligen Punktwert in der Rechnung berücksichtigt werden.

Weitere Modellunsicherheiten können zudem durch die Simulation dreidimensionaler Effekte mit eindimensionalen Rechenmodellen bedingt sein. Diese Unsicherheiten sind durch statistische Unsicherheitsanalysen nicht zu erfassen und können nur durch fortschreitende Weiterentwicklung der Modelle (Übergang zu 3D-Modellen) reduziert werden.

Wahrscheinlichkeitsverteilungen bzw. deren Bandbreite basieren auf experimentellen Daten, der Erfahrung der Experten und durchgeführten Sensitivitätsanalysen. Ihre Bestimmung erfolgt aufgrund von Ergebnissen im Rahmen der Rechenprogramm-Validierung bzw. anhand von Anlagen- und Brennstabdaten, wobei die für die Verteilung berücksichtigten experimentellen oder Messdaten für die analysierte Anlage repräsentativ sein sollen.

Der Streubereich der experimentellen Daten wird in der statistischen Unsicherheitsanalyse insoweit erfasst, als er in die Festlegung der statistischen Verteilung der unsicheren Parameter eingeht. Die Umsetzung dieser Erkenntnisse muss nachvollziehbar erfolgen.

Bei der Analyse werden Parameterwerte entsprechend den jeweiligen Wahrscheinlichkeitsverteilungen stichprobenartig ausgewählt. Diese Auswahl muss mögliche Abhängigkeiten der Parameter untereinander berücksichtigen. Die Abhängigkeiten verschiedener Parameter voneinander können deterministisch durch funktionelle Beziehungen oder durch verschiedene statistische Zusammenhangsmaße und bedingte Verteilungen ausgedrückt werden. Die Werte der identifizierten Parameter sind zu variieren. Mit jedem der erhaltenen Wertesätze für die verschiedenen Parameter ist eine Rechnung mit dem Rechenprogramm durchzuführen.

### **4.3.3 Bestimmung der Gesamtunsicherheit der Rechenergebnisse**

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.

### **4.4 Vereinfachtes Vorgehen**

Eine KMV-Störfallanalyse nach einem vereinfachten Vorgehen ohne Quantifizierung der Ergebnisunsicherheiten ist zulässig, wenn Einflussparameter identifiziert worden sind, mit denen ein konservatives Ergebnis erzielt werden kann, d. h. die Toleranzgrenzen der Unsicherheitsanalyse nach Abschnitt 4.3.3 werden abgedeckt.

Für diesen Nachweis kann auf übertragbare generische Untersuchungen zurückgegriffen werden.

## **5 Schlussfolgerung und Empfehlung**

In dieser Empfehlung werden Anforderungen an die Nachweisführung für die Analyse von Kühlmittelverluststörfällen mit einem „best-estimate“-Vorgehen mit Unsicherheitsanalyse und eine Nachweisführung mit einem demgegenüber vereinfachten Vorgehen gestellt. In beiden Vorgehensweisen werden „best-estimate“-Rechenprogramme eingesetzt. Unterschiede bestehen in der Behandlung unsicherer Modell- und Anlagenparameter. Beim „best-estimate“-Vorgehen werden die hierdurch bedingten Unsicherheiten des Berechnungsergebnisses explizit quantifiziert, beim vereinfachten Vorgehen werden diese Unsicherheiten durch die Wahl konservativer Werte für sensitive Einflussparameter abgedeckt. Die RSK empfiehlt, dass für zukünftige KMV-Analysen unter Verwendung von „best-estimate“-Rechenprogrammen entsprechend dieser Empfehlung vorgegangen wird.

## **Beratungsunterlagen und weiterführende Literatur**

- [1] Bestimmung der Aussagesicherheit von thermohydraulischen Rechenergebnissen  
H. Glaeser, GRS, Folienkopien, 18. AST-Sitzung am 23.05.2003
  
- [2] Bestimmung der Aussagesicherheit von thermohydraulischen Rechenergebnissen  
H. Glaeser, GRS, 363. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission, Köln,  
04. und 05. Juni 2003, Folienkopien
  
- [3] Anwendung realistischer Methoden für Störfallanalysen  
U. Stoll, 18.12.2003, Framatome ANP, Folienkopien
  
- [4] Anforderungen an realistische („best-estimate“) Störfallanalysen für LWR  
H. Glaeser, GRS, 18. Dezember 2003, Folienkopien
  
- [5] S.S. Wilks  
Determination of sample sizes for setting tolerance limits;  
Ann. Math. Statist.; 12 (1941), pp. 91-96
  
- [6] S.S. Wilks  
Statistical prediction with special reference to the problem of tolerance limits;  
Ann. Math. Statist., 13 (1942), pp. 400-409
  
- [7] RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren, 3. Ausgabe, Oktober 1981 mit Änderungen  
vom 15.11.1996
  
- [8] Safety margins of operating reactors, Analysis of uncertainties and implications for  
decision making;  
IAEA-TECDOC-1332, January 2003
  
- [9] Safety Report Series No. 23: Accident Analysis for Nuclear Power Plants; International  
Atomic Energy Agency, Vienna, 2002

- [10] Regulatory Guide 1.157: Best Estimate Calculations of Emergency Core Cooling System Performance, U.S. Nuclear Regulatory Commission, May 1989
- [11] B.E. Boyack, et al.  
Quantifying Reactor Safety Margins. Nuclear Engineering and Design 119 (1990) 1-117
- [12] Muftuoglu, K., Ohkawa, K., Frepoli, C., Nissley, M.  
Comparison of Realistic Large Break LOCA Analyses of a 3-Loop Westinghouse Plant Using Response Surface and Statistical Sampling Techniques. Proceedings of ICONE12, April 25-29, 2004, Arlington, Virginia, USA.