

Ermittlung der Abschaltreaktivität

Sicherheitstechnische Anforderungen

DIN
25 442

Evaluation of the shutdown reactivity

Diese Norm ist wortgleich mit der KTA-Regel 3104. Die KTA-Regel wurde im Auftrag des Kerntechnischen Ausschusses vom Normenausschuß Kerntechnik vorbereitet.

Inhalt

	Seite		Seite
1 Anwendungsbereich	1	6.3 Normierung gerechneter Reaktivitätsäquivalente	
2 Begriffe	1	durch gemessene Reaktivitätskoeffizienten	5
3 Verfahren zur Ermittlung der Abschaltreaktivität	2	6.4 Fehlerquellen	5
4 Berechnung der Abschaltreaktivität und von Reaktivitätsäquivalenten	2	7 Bestimmung der Abschaltreaktivität als äquivalente Zustandsänderung	5
5 Kinetische Verfahren zur Reaktivitätsmessung	2	8 Dokumentation	5
5.1 Physikalische Grundlagen	2	Anhang A: Verwiesene Literatur	5
5.2 Anwendungen	3	Anhang B: Ausführungen zu den Begriffen Reaktorzustand, Zustandsänderung, Reaktivitätskoeffizient, -äquivalent, -integral und -bilanz	6
5.3 Meß- und Auswerteverfahren	3	Anhang C: Beispiel zur Reaktivitätsbilanz beim Druckwasserreaktor	7
6 Verfahren zur Messung von Reaktivitätskoeffizienten und Reaktivitätsäquivalenten	4	Anhang D: Beispiel zur Reaktivitätsbilanz beim Siedewasserreaktor	8
6.1 Inverskinetische Verfahren	4		
6.2 Substitutionsverfahren	4		

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren. Sie ist anzuwenden für die Ermittlung der Abschaltreaktivität von Reaktorkernen für Zustände nach Abschaltung aus bestimmungsgemäßem Betrieb und für Zustände im Verlauf von Störfällen ohne Kühlmittelverlust. Nicht Gegenstand dieser Norm ist die Festlegung von Zahlenwerten für die erforderliche Abschaltreaktivität.

2 Begriffe**2.1 Abschaltreaktivität**

Die Abschaltreaktivität ist die Reaktivität des durch Abschaltung mit den hierfür vorgesehenen Einrichtungen in den unterkritischen Zustand gebrachten Reaktors.

Hinweis: Sie ist eine Funktion des Reaktorzustands nach der Abschaltung.

2.2 Reaktivitätsäquivalent

Das Reaktivitätsäquivalent einer Zustandsänderung ist die durch diese Zustandsänderung hervorgerufene Reaktivitätsänderung.

2.3 Reaktivitätsbilanz

Die Reaktivitätsbilanz ist die Darstellung einer Reaktivitätsdifferenz zwischen zwei Zuständen als Summe von Reaktivitätsäquivalenten einfacher oder zusammengesetzter Zustandsänderungen.

2.4 Reaktivitätskoeffizient

Der Reaktivitätskoeffizient eines Zustandsparameters ist der partielle Differentialquotient, der die Änderung der Reaktivität in Abhängigkeit von diesem Zustandsparameter beschreibt.

2.5 Reaktivitätsmeßverfahren, inverskinetische

Das inverskinetische Reaktivitätsmeßverfahren ist ein Verfahren, bei dem die Reaktivität aus dem zeitlichen Verlauf eines Neutronenflußsignals bestimmt wird.

2.6 Wirksamkeit von Reaktivitätsstellmitteln, differentielle

Die differentielle Wirksamkeit von Reaktivitätsstellmitteln ist der einem Stellmittel zugeordnete Reaktivitätskoeffizient.

Fortsetzung Seite 2 bis 8
Erläuterungen Seite 9

Normenausschuß Kerntechnik (NKe) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, gestattet.

2.7 Wirksamkeit von Reaktivitätsstellmitteln, integrale

Die integrale Wirksamkeit von Reaktivitätsstellmitteln ist das einem Stellmittel zugeordnete Reaktivitätsäquivalent.

3 Verfahren zur Ermittlung der Abschaltreaktivität

Zur Ermittlung der Abschaltreaktivität stehen folgende Verfahren zur Verfügung:

- (1) Aus einer Berechnung des effektiven Multiplikationsfaktors k_{eff} für den abgeschalteten Reaktor nach Abschnitt 4.
- (2) Aus einer Reaktivitätsbilanz für den Übergang von einem Referenzzustand bekannter Reaktivität in den abgeschalteten Zustand. In dieser Reaktivitätsbilanz können verwendet werden:
 - Nach Abschnitt 4 gerechnete Reaktivitätsäquivalente oder
 - nach Abschnitt 6.1 gemessene Reaktivitätsäquivalente oder
 - aus äquivalenten Zustandsänderungen bestimmte Reaktivitätsäquivalente nach Abschnitt 6.2 oder
 - gerechnete, durch differentielle Messungen normierte Reaktivitätsäquivalente nach Abschnitt 6.3 oder
 - eine Kombination aus gerechneten und gemessenen Reaktivitätsäquivalenten.
- (3) Als äquivalente Zustandsänderung nach Abschnitt 7. Die Abschaltreaktivität ist mindestens für jede Betriebsperiode zu ermitteln. Ergebnisse experimenteller Nachweise sind entweder durch ergänzende Rechnungen oder aufgrund allgemein gültiger physikalischer Gesetzmäßigkeiten auf die ganze Betriebsperiode zu extrapolieren.

Hinweis: Unter Betriebsperiode wird der Zeitraum verstanden, in dem die reaktivitätsbestimmende Konfiguration des Reaktorkerns ungeändert bleibt und sich die nukleare Zusammensetzung des Reaktorkerns nur durch den fortschreitenden Abbrand ändert. Eine Betriebsperiode ist zum Beispiel der Zeitraum zwischen zwei Brennelementwechseln (Abbrandzyklus), während dessen der Abbrand beispielsweise durch Änderung der Steuerstabstellung oder der Borkonzentration kompensiert wird.

Soweit es die jeweils anzuwendenden sicherheitstechnischen Kriterien verlangen, ist zu unterstellen, daß die Abschalteinrichtungen nicht voll verfügbar sind, zum Beispiel infolge Steckenbleibens des wirksamsten Steuerstabs.

4 Berechnung der Abschaltreaktivität und von Reaktivitätsäquivalenten

Zur Berechnung der Abschaltreaktivität und von Reaktivitätsäquivalenten sind Verfahren der stationären Kernberechnung zu verwenden, die für den jeweiligen Anwendungsbereich verifiziert sind.

In den Rechenverfahren sollen physikalische Sachverhalte durch mathematische Modelle dargestellt werden, die auf den diesen Sachverhalten zugrunde liegenden physikalischen Gesetzen aufbauen. Es ist auch zulässig, zur Beschreibung von einzelnen physikalischen Teilaspekten innerhalb eines Rechenverfahrens Korrelationen zu verwenden, die aus Experimenten abgeleitet wurden, sofern diese Experimente für den vorgesehenen Anwendungsbereich der Korrelation repräsentativ sind.

Ein Rechenverfahren einschließlich der zugehörigen Datensätze gilt als verifiziert, wenn seine Anwendbarkeit und Genauigkeit an Referenzfällen nachgewiesen wurde. Ein Rechenverfahren gilt auch dann als verifiziert, wenn seine Ergebnisse eine bekannte, systematische Abweichung gegenüber den Vergleichswerten zeigen, so daß sie durch eine bekannte Korrektur mit den Vergleichswerten in Übereinstimmung gebracht werden können.

Die Verifikation eines Rechenverfahrens ist nur in dem Umfang erforderlich, wie seine Ergebnisse in den Nachweis der Abschaltreaktivität eingehen.

Hinweis: Beispiel (a)

Ein Rechenverfahren, das mit einem bestimmten Satz von Eingangsdaten dazu verwendet werden soll, die Wirksamkeit von Stellstäben nachzuweisen, kann verifiziert werden durch Nachrechnung von

- gemessenen oder
- mit einem bereits verifizierten Verfahren berechneten
- kritischen Stellstab-Konfigurationen oder
- integralen Wirksamkeiten von Stellstäben oder
- differentiellen Wirksamkeiten von Stellstäben.

Beispiel (b)

Wenn dasselbe Rechenverfahren mit einem entsprechend variierten Satz von Eingangsdaten für den Nachweis von Temperaturkoeffizienten verwendet werden soll, so muß es für diesen Anwendungsbereich verifiziert werden durch Nachrechnung von

- gemessenen oder
- mit einem bereits verifizierten Verfahren berechneten
- Temperaturkoeffizienten oder
- kritischen Zuständen mit unterschiedlicher Temperatur.

Als Referenzfälle sollen

- Messungen an Reaktoren oder kritischen Anordnungen oder
- Ergebnisse von bereits verifizierten, nach Möglichkeit genaueren Rechenprogrammen

verwendet werden. Die Referenzfälle müssen für den vorgesehenen Anwendungsbereich repräsentativ sein.

Hinweis: Für den Vergleich eignen sich folgende Größen:

- kritische Zustände,
- äquivalente Zustandsänderungen,
- unterkritische Zustände bekannter Reaktivität,
- Reaktivitätsäquivalente,
- Reaktivitätskoeffizienten.

Beim Einsatz zweidimensionaler Rechenverfahren ist der Einfluß von Änderungen der Zustandsparameter auf die Neutronenflußverteilung in der dritten Dimension zu beachten.

5 Kinetische Verfahren zur Reaktivitätsmessung

5.1 Physikalische Grundlagen

5.1.1 Inverse Kinetik

Die zuverlässigste und direkteste kinetische Methode zur Bestimmung von Reaktivitäten ist die inverse Punktkinetik. Sie ist bevorzugt anzuwenden.

Hinweis: Die inverse Punktkinetik ist insbesondere dann anwendbar, wenn die zeitabhängige Verteilung der Neutronenflußdichte während der Messung

mit der erforderlichen Näherung in eine nur vom Ort und der Energie abhängige Formfunktion und eine nur von der Zeit abhängige Amplitudenfunktion separierbar ist (wie im asymptotischen Zustand).

Die Anwendbarkeit der Punktkinetik kann vorausgesetzt werden, wenn es sich um räumlich homogene oder quasihomogene Zustandsänderungen handelt, zum Beispiel um Änderungen der Temperatur oder der Konzentration eines gelösten Neutronenabsorbers. Ist hingegen die Zustandsänderung inhomogen verteilt, zum Beispiel bei Stellstabbewegungen, muß die Anwendbarkeit der Punktkinetik geprüft werden. Ein meßtechnisches Kriterium für die Anwendbarkeit ist (bei physikalisch stationärem Reaktorzustand) die Konstanz der Periode oder der nach der Punktkinetik berechneten Reaktivität.

Maßnahmen, die bei Anwendung der Punktkinetik beachtet werden sollen, sind:

- Messung so durchführen, daß die Formfunktion sich langsam ändert (Messung mit Reaktivitätskompensation); wenn möglich asymptotisches Zeitverhalten abwarten (Periodenmessung).
- Detektorposition so wählen, daß Änderungen der Formfunktion einen geringen Einfluß auf das Signal haben.

Falls die Bedingungen für die Anwendbarkeit der Punktkinetik nicht einzuhalten sind, kann auch ein ortsabhängiges Kinetikmodell verwendet werden. Die Notwendigkeit hierfür kann sich vor allem bei der Stabfallmethode nach Abschnitt 5.2.2 ergeben.

5.1.2 Punktkinetische Parameter

In die punktkinetischen Gleichungen gehen als Parameter ein:

- Effektiver Bruchteil der nach einer Spaltung des Nuklids j in der Gruppe i verzögert emittierten Neutronen ($\beta_{i, \text{eff}}^j$).
- Zerfallskonstanten (λ_j) der zur Gruppe i gehörenden und vom Nuklid j stammenden Verzögerten-Vorläufer.

Hinweis: In Leichtwasserreaktoren ohne merkliche (γ, n)-Neutronenproduktion reicht eine Einteilung in sechs Gruppen aus: $i = 1, 2, \dots, 6$.

Da sich die Zerfallskonstanten für die Nuklide j nur wenig voneinander unterscheiden, können sie auch durch einen einheitlichen, von j unabhängigen Sechs-Gruppen-Satz λ_i dargestellt werden.

- Generationsdauer Λ

Hinweis: Die Generationsdauer braucht bei den meisten Anwendungen der inversen Punktkinetik nur näherungsweise bekannt zu sein, da ihre Größe das Ergebnis nur wenig beeinflußt.

Die Berechnungsvorschriften für die effektiven Bruchteile der verzögerten Neutronen und für die Generationsdauer sollen aus der Korrespondenz zwischen der vollständigen, orts- und energieabhängigen Beschreibung des Reaktors nach der Transport- oder Diffusionstheorie einerseits und dem punktkinetischen Formalismus andererseits abgeleitet werden. Danach ergibt sich $\beta_{i, \text{eff}}^j$ aus einem gewichteten Integral über die orts- und energieabhängige Produktion verzögerter Neutronen durch das Nuklid j mit der adjungierten Lösung des stationären Eigenwertproblems als Gewichtsfunktion dividiert durch das gewichtete Integral über die Gesamtproduktion.

Zahl und Einteilung der Energiegruppen müssen mit den vorherrschenden Spektralbereichen der prompten und verzögerten Spaltneutronen konsistent sein. Es ist eine Darstellung in mindestens drei Energiegruppen erforderlich.

Für die prompten und verzögerten Spaltausbeuten und deren Energieabhängigkeit sollen die in der Kerndatensammlung ENDF/B (1974) [1] enthaltenen Werte verwendet werden. Für die relativen Anteile der verzögerten Neutronengruppen und für die Zerfallskonstanten sollen die in Keepin (1965) [2] angegebenen Werte verwendet werden.

Zu den Ergebnissen inverskinetischer Reaktivitätsmessungen gehört stets auch die Angabe der kinetischen Parameter, die für die Auswertung verwendet wurden.

5.2 Anwendungen

5.2.1 Periodenmessung

Die Reaktivität ist nach einer zur Messung herbeigeführten Zustandsänderung, zum Beispiel einer Stellungsänderung der Stellstäbe, konstant zu halten. Nach einer Übergangszeit stellen sich eine asymptotische Neutronenverteilung und eine stabile Periode ein. Die Reaktivität ist aus der gemessenen stabilen Periode nach der Inhour-Gleichung zu berechnen.

Hinweis: Die Periodenmessung wird vorzugsweise bei der Messung von Stabwirksamkeiten am Siedewasserreaktor nach Abschnitt 6.3 angewendet. Ihr Anwendungsbereich erstreckt sich bis zu Reaktivitäten von $\pm 0,3\%$.

5.2.2 Stabfallmethode

Ausgehend von einem stationären kritischen Zustand werden Stellstäbe eingeworfen oder eingeschossen. Das Detektorsignal ist als Funktion der Zeit zu registrieren. Aus dem Verlauf des Detektorsignals während und nach dem Stabfall ist die (negative) Reaktivität zu ermitteln.

Hinweis: Bei der Interpretation punktkinetisch ausgewerteter Stabfallmessungen ist zu beachten, daß diese Messungen in besonderem Maße störenden Einflüssen durch Änderungen der Formfunktion ausgesetzt sind. Der systematische Fehler wird umso größer, je größer die Reaktivitätsänderung ist. Die Zunahme dieses Fehlers setzt die praktische Grenze für den Anwendungsbereich.

5.2.3 Allgemeine Anwendung der inversen Punktkinetik

Die Reaktivität muß als inverse Lösung der punktkinetischen Gleichungen aus dem zeitlichen Verlauf des Neutronenflußsignals bestimmt werden, wenn die Bedingung, daß die Reaktivität nach einer anfänglich vorgenommenen Reaktivitätsänderung zeitlich konstant bleibt, nicht mit der erforderlichen Näherung eingehalten wird.

Hinweis: Dies kann mit analogen oder digitalen Rechenmethoden erfolgen. Für zeitsparende Messungen an Leistungsreaktoren haben sich mitrechnende Reaktivitätsmeßgeräte bewährt (Reaktivitätsmeter), die die Reaktivität kontinuierlich aus einem Detektorsignal berechnen und anzeigen.

5.3 Meß- und Auswerteverfahren

5.3.1 Anforderungen an das Meßsystem

Der Neutronenmeßkanal muß ein Signal liefern, dessen nicht der Spaltleistung proportionale Komponente genügend klein ist.

Hinweis: Maßnahmen in dieser Richtung sind: γ -Kompensation, Abschirmung des Detektors oder Wechselstromverfahren (Campbell-Verfahren).