Inhaltlich überprüft und unverändert weiterhin gültig: 3/84, 6/89, 6/94, 6/99, 11/04, 11/09

KTA 3104

Ermittlung der Abschaltreaktivität

Die nachfolgend wiedergegebene Regel wurde im Auftrag des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) vom Normenausschuß Kerntechnik (NKe) vorbereitet. Der NKe beabsichtigt, diese Regel wortgleich als Norm DIN 25442 zu veröffentlichen.

Inhalt

Seite

1 Anwendungsbereich ... 2

2 Begriffe ... 2
2.1 Abschaltreaktivität ... 2
2.2 Reaktivitätsäquivalent ... 2
2.3 Reaktivitätsbilanz ... 2
2.4 Reaktivitätskoeffizient ... 2
2.5 Reaktivitätsmeßverfahren, inverskinetisches ... 2
2.6 Wirksamkeit von Reaktivitätsstellmitteln, differentielle ... 2
2.7 Wirksamkeit von Reaktivitätsstellmitteln, integrale ... 2

3 Verfahren zur Ermittlung der Abschaltreaktivität ... 2

4 Berechnung der Abschaltreaktivität und von Reaktivitätsäquivalenten ... 2

5 Kinetische Verfahren zur Reaktivitätsmessung ... 3
5.1 Physikalische Grundlagen ... 3
5.2 Anwendungen ... 3
5.3 Meß- und Auswerteverfahren ... 4

6 Verfahren zur Messung von Reaktivitätskoeffizienten und Reaktivitätsäquivalenten ... 4
6.1 Inverskinetische Verfahren ... 4
6.2 Substitutionsverfahren ... 4
6.3 Normierung gerechneter Reaktivitätsäquivalente durch gemessene Reaktivitätskoeffizienten ... 5
6.4 Fehlerquellen ... 5

7 Bestimmung der Abschaltreaktivität als äquivalente Zustandsänderung ... 5

8 Dokumentation ... 5

Anhang A Verwiesene Literatur ... 5

Anhang B Ausführungen zu den Begriffen Reaktorzustand, Zustandsänderung, Reaktivitätskoeffizient, -äquivalent, -integral und -bilanz ... 6

Anhang C Beispiel zur Reaktivitätsbilanz beim Druckwasserreaktor ... 7

Anhang D Beispiel zur Reaktivitätsbilanz beim Siedewasserreaktor ... 9

1 Anwendungsbereich

Diese Regel 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 Regel 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.

H i n w e i s :
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, inverskinetisches

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.

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,
- nach Abschnitt 6.1 gemessene Reaktivitätsäquivalente,
- aus äquivalenten Zustandsänderungen bestimmte Reaktivitätsäquivalente nach Abschnitt 6.2,
- 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.

H i n w e i s :
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 z. B. 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 zugrundeliegenden 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.

H i n w e i s :
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.

H i n w e i s :
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.

H i n w e i s :
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 ($\beta^j_{i,eff}$).
- Zerfallskonstanten (λ^j_i) der zur Gruppe i gehörenden und vom Nuklid j stammenden Verzögerten-Vorläufer.

  H i n w e i s :
  In Leichtwasserreaktoren ohne merkliche (γ,n)-Neutronenproduktion reicht eine Einteilung in sechs Gruppen aus: i = l, 2, ... 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

  H i n w e i s :
  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 $\beta^j_{i,eff}$ 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.

H i n w e i s :
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.

H i n w e i s :
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 um so 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 Reaktivitäts-

änderung zeitlich konstant bleibt, nicht mit der erforderlichen Näherung eingehalten wird.

H i n w e i s :
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.

H i n w e i s :
Maßnahmen in dieser Richtung sind: γ-Kompensation, Abschirmung des Detektors oder Wechselstromverfahren (Campbell-Verfahren).

Der Meßkanal muß einen so großen Aussteuerungsbereich haben, daß Linearitätsfehler im ganzen Amplitudenbereich des Meßsignals klein gehalten werden. Der Detektor soll so placiert sein, daß er von Änderungen der Formfunktion während der Messung wenig beeinflußt wird. Im Fall der Periodenmessung nach Abschnitt 5.2.1 kann die Detektorposition beliebig sein. Die einwandfreie Funktion von Meßkanal und Auswerteverfahren soll an einem einfachen Testfall, zum Beispiel einer stabilen Periode, überprüft werden.

5.3.2 Variationsbereich der Reaktorleistung

Damit die rückkopplungs- und quellfreie Nulleistungskinetik gültig bleibt, muß der Variationsbereich der Reaktorleistung während der Messung beschränkt bleiben. Er wird nach oben durch beginnende Temperaturänderungen mit ihren Rückwirkungen auf die Reaktivität begrenzt. Für diese obere Grenze gilt der Richtwert $\leq$ 1 % der Nennleistung. Die untere Grenze ist durch mögliche Einflüsse von Neutronenquellen gegeben. Die Anwendbarkeit der quellfreien und rückkopplungsfreien Nullleistungskinetik soll experimentell überprüft werden, zum Beispiel durch eine Periodenmessung über den ganzen vorgesehenen Bereich des Detektorsignals.

6 Verfahren zur Messung von Reaktivitätskoeffizienten und Reaktivitätsäquivalenten

6.1 Inverskinetische Verfahren

6.1.1 Versuchsdurchführung bei Messungen ohne Reaktivitätskompensation

Der Zustandsparameter p wird um Δp geändert. Die dadurch bewirkte Reaktivitätsänderung $\Delta\rho$ wird nach einer der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Methoden gemessen; sie ist gleich dem Reaktivitätsäquivalent $\Delta\rho_p$ von Δp (siehe Anhang B).

H i n w e i s :
Diese Anwendung der inverskinetischen Meßverfahren ist die einfachste Art. Typische Anwendungsfälle sind die Messungen von :

- Reaktivitätskoeffizienten $\Gamma_p = \Delta\rho_p/\Delta p$,
- differentiellen Wirksamkeiten von Stellstäben,
- integralen Wirksamkeiten von Stellstäben nach der Stabfallmethode.

Der Anwendungsbereich wird bezüglich der Größe der meßbaren Reaktivitätsäquivalente dadurch begrenzt, daß mit zunehmendem Betrag der Reaktivität ρ das Detektorsignal die Grenzen seines zulässigen Variationsbereichs immer schneller erreicht, so daß die Zeitspanne zu kurz wird, die für die Durchführung der Zustandsänderung Δp und gegebenenfalls für das Abwarten eines stabilen asymptotischen Zustands zur Verfügung steht. Für die Grenzen des Anwendungsbereichs gelten die Richtwerte von ca. - 0,5 % bis + 0,3 % für kontinuierliche Reaktivitätsmeter und Periodenmessung.

6.1.2 Versuchsdurchführung bei Messungen mit Reaktivitätskompensation

Wird die Messung mit Reaktivitätskompensation durchgeführt, so entfällt die Beschränkung des Anwendungsbereichs der inverskinetischen Messung ohne Reaktivitätskompensation.

Zwei Zustandsparameter p und q werden, ausgehend von einem kritischen Zustand p_1, q_1 alternierend um δp und δq geändert. Die Schritte δp und δq werden so gewählt, daß sie sich näherungsweise kompensieren, so daß der Reaktor sich nicht allzu weit vom kritischen Zustand entfernt. Der Zustandspunkt des Reaktors bewegt sich dabei in der (p, q)-Zustandsebene in der Umgebung des kritischen Weges vom Anfangszustand p_1, q_1 zum Endzustand p_2, q_2.

Gemessen werden die von den einzelnen Schritten $[\delta\rho]_i$, i = 1,2, ..., verursachten Reaktivitätsänderungen $[\delta\rho]_i$ nach der inverskinetischen Methode. Die Schrittweiten und die Schrittfolge sind so zu wählen, daß weder der Aussteuerungsbereich des Meßsystems überschritten wird, noch allzu schnelle Änderungen der Formfunktion auftreten.

Das Ergebnis der Messung ist die Summe der Reaktivitätsänderungen $\Sigma_i\ [\delta\rho]_i$. Im Grenzfall verschwindend kleiner Schrittweiten geht diese Summe über in das Reaktivitätsintegral $(\Delta\rho)_p$, gebildet längs des kritischen Weges von p_1, q_1 nach p_2, q_2.

Da der Zustandsweg des Reaktors zwei kritische Zustände verbindet, ist $\Delta\rho = 0$ und es gilt

$$(\Delta\rho)_p = -(\Delta\rho)_q \qquad (6.1)$$

das heißt, die Messung liefert außer dem Reaktivitätsintegral $(\Delta\rho)_p$ gleichzeitig auch das Reaktivitätsintegral $(\Delta\rho)_q$.

H i n w e i s :
Beispiele für Variablenpaare, die sich bei derartigen Messungen gegenseitig kompensieren können, sind:
Stabstellung - Borkonzentration,
Stellung Stabgruppe A - Stellung Stabgruppe B,
Stabstellung - Temperatur
Borkonzentration - Xe-Konzentration.

Beim Druckwasserreaktor ist diese Methode das meistangewandte kinetische Meßverfahren zur Bestimmung von Reaktivitätsäquivalenten von > 0,3 %, insbesondere von Stabwirksamkeiten.

Für den Übergang von den gemessenen Reaktivitätsintegralen $(\Delta\rho)_p$ und $(\Delta\rho)_q$ auf die entsprechenden Reaktivitätsäquivalente $\Delta\rho_p$ und $\Delta\rho_q$ der einfachen Zustandsänderungen

$$\Delta p = p_2 - p_1 \qquad (6.2)$$

und

$$\Delta q = q_2 - q_1 \qquad (6.3)$$

sind zusätzlich theoretische oder experimentelle Untersuchungen erforderlich.

H i n w e i s :
Besonders einfach werden die Verhältnisse, wenn die Variablen p und q innerhalb des betrachteten Variationsbereichs entkoppelt sind. In diesem Falle sind die Reaktivitätsintegrale gleich den Reaktivitätsäquivalenten.

6.2 Substitutionsverfahren

Das Substitutionsverfahren liefert äquivalente Zustandsänderungen. Ausgehend von einem kritischen Zustand p_1, q_1 wird

ein erster Parameter p um einen meßbaren Betrag Δp geändert.

Die dadurch bewirkte Reaktivitätsänderung wird durch die äquivalente Änderung Δq eines zweiten Parameters q derart kompensiert, daß der Reaktor im kritischen Zustand bleibt oder wieder in diesen einläuft. Außer p und q dürfen sich keine anderen Zustandsparameter ändern.

Die Reaktivitätsäquivalente $\Delta\rho_p$ und $\Delta\rho_q$ der Zustandsänderungen Δp und Δq sind einander dem Betrag nach gleich. Ein unbekanntes Reaktivitätsäquivalent $\Delta\rho_q$ läßt sich somit aus einem bekannten Äquivalent $\Delta\rho_p$ bestimmen.

H i n w e i s :
Eine häufige Anwendung dieses Verfahrens ist die sogenannte Absorber-Substitution zur Bestimmung größerer Reaktivitätsäquivalente beim Druckwasserreaktor. Dabei wird die durch eine Zustandsänderung hervorgerufene Reaktivitätsänderung durch eine entgegengesetzt wirkende Änderung der Konzentration der im Kühlmittel gelösten Borsäure kompensiert. Die der Zustandsänderung äquivalente Änderung der Borkonzentration ist das Boräquivalent der Zustandsänderung.

6.3 Normierung gerechneter Reaktivitätsäquivalente durch gemessene Reaktivitätskoeffizienten

Reaktivitätsäquivalente können durch eine Kombination von Rechnung und Messung folgendermaßen bestimmt werden:

1. Berechnung des dem gesuchten Reaktivitätsäquivalent zugeordneten Reaktivitätskoeffizienten Γ^{theor}_p als Funktion des Zustandsparameters p und anschließende Integration nach Gleichung A 2.4.
2. Messung des Reaktivitätskoeffizienten Γ_p für einen bestimmten Wert p_0 des Zustandsparameters p (vorzugsweise in der Nähe des kritischen Zustands).
3. Multiplikation des berechneten Reaktivitätsäquivalents mit einem Normierungsfaktor, der gegeben ist durch das Verhältnis des gemessenen Reaktivitätskoeffizienten $\Gamma^{exp}_p(p_0)$ zu dem für $p = p_0$ gerechneten Reaktivitätskoeffizienten $\Gamma^{theor}_p(p_0)$.

   H i n w e i s :
   Das Verfahren findet Anwendung bei der Bestimmung der Netto-Abschaltreaktivität von Siedewasserreaktoren. Dort bedeutet p die Stellung und Γ_p die differentielle Wirksamkeit eines einzelnen Stellstabs, $\Gamma_p(p)$ die differentielle Kennlinie des Stellstabs.

6.4 Fehlerquellen

Mögliche Fehlerquellen bei der experimentellen Bestimmung von Reaktivitätskoeffizienten und Reaktivitätsäquivalenten sind

- die Unsicherheiten der kinetischen Parameter,
- systematische Änderungen der Formfunktion während der Messung,
- die Meßfehler der variierten Zustandsparameter,
- Schwankungen von konstant zu haltenden Zustandsparametern,
- Folgewirkungen des vorangegangenen Leistungsbetriebs des Reaktors, zum Beispiel instationäre Xenon-Vergiftung.

7 Bestimmung der Abschaltreaktivität als äquivalente Zustandsänderung

Zur Betriebsüberwachung kann als Maß für die Abschaltreaktivität auch eine äquivalente Zustandsänderung ermittelt werden. Die der Abschaltreaktivität äquivalente Zustandsänderung ist diejenige Änderung eines Zustandsparameters, die den stationären unterkritischen Reaktor gerade kritisch machen würde. Die Häufigkeit derartiger Messungen ist Abschnitt 3 zu entnehmen.

H i n w e i s :
Die Ermittlung der Abschaltreaktivität als äquivalente Zustandsänderung ist beim experimentellen Nachweis ausreichender Unterkritikalität von Bedeutung.

Sie findet Anwendung bei

- Siedewasserreaktor: Die Feststellung, daß der abgeschaltete Reaktor durch vollständiges Ziehen des wirksamsten Stabs und teilweises Ziehen eines Nachbarstabs kritisch wird, ergibt für die Abschaltreaktivität die individuelle Größe "größer oder gleich einer vollen und einer partiellen Stabfahrlänge".

- Druckwasserreaktor: Der Nachweis, daß eine Verminderung der Borkonzentration um ΔC den Reaktor gerade kritisch werden läßt, ergibt als individuelle Größe für die Abschaltreaktivität deren Boräquivalent ΔC.

- Beladen: Die Überwachung der Unterkritikalität beim klassischen "Beladeexperiment" durch Extrapolation einer gemessenen 1/Z-Kurve (Z = Zählrate) auf 0 liefert als Abstand zum kritischen Zustand ebenfalls eine äquivalente Zustandsänderung, zum Beispiel die "mindestens noch zuzuladende Brennstoffmenge bis zum Erreichen der Kritikalität".

8 Dokumentation

Zum Nachweis der Abschaltreaktivität sind vom Genehmigungsinhaber Protokolle und Berichte zu erstellen. Bei Rechnungen sind Eingabewerte, Rechenergebnisse und eine Beschreibung der Methode oder des Programms anzugeben. Bei Messungen sind Ergebnisse und verwendete Meßverfahren anzugeben.

Die Überprüfung der Abschaltreaktivität im Rahmen des Genehmigungs- und Aufsichtsverfahrens erfolgt nach Maßgabe der Genehmigungsbehörde durch Sachverständige (nach § 20 des Atomgesetzes). Die Ergebnisse und die obengenannten Unterlagen sind mindestens für eine Zeit von vier Jahren, wenigstens jedoch vier Betriebsperioden, siehe Abschnitt 3 (Hinweis), aufzubewahren.

Anhang A
Verwiesene Literatur

[1] Kerndatensammlung ENDF/B (1974), Evaluated Nuclear Data File, B format, Version IV, released 1974 by National Neutron Cross Section Center, BNL
Für OECD-Mitgliedsländer zu beziehen bei:
CCDN, NEA Neutron Data Compilation Centre, B.P. 9, 91190 GIF SUR YVETTE, France

[2] Keepin (1965), G.R. Keepin, Physics of Nuclear Kinetics, Addison Wesly 1965

Anhang B
Ausführungen zu den Begriffen Reaktorzustand, Zustandsänderung, Reaktivitätskoeffizient, -äquivalent, -integral und -bilanz

Reaktorzustand und Zustandsänderung

Der physikalische Zustand des Reaktors wird durch Zustandsparameter p, q, r, ... beschrieben.

Zustandsparameter sind zum Beispiel:

Mittlere Dichte,
mittlere Temperatur,
mittlerer Blasengehalt,
Druck
} von Moderator und Kühlmittel,

mittlere Temperatur des Brennstoffs,

Stellung der Stellstäbe,

Konzentration eines in Moderator oder Kühlmittel gelösten Neutronenabsorbers,

Abbrandzustand fester Neutronenabsorber,

mittlere Konzentration von Spalt- und Folgeprodukten,

mittlere Konzentration von spaltbaren Nukliden (Abbrand des Brennstoffs).

Die Reaktivität ρ ist eine Funktion des durch die Zustandsparameter beschriebenen physikalischen Zustands des Reaktors:

$$\rho = \rho\,(p, q, r, ...) \qquad \text{(A 2.1)}$$

Die Zustandsparameter bilden einen *Zustandsraum*, dessen Dimension sich nach der Anzahl der im Einzelfall zu erfassenden Zustandsparameter richtet. Jede *Zustandsänderung* kann als Weg des Zustandspunktes durch den Zustandsraum beschrieben werden. Ein ausgezeichneter Weg ist der *kritische* Weg, für den gilt

$$\rho\,(p, q, r, ...) = 0 \qquad \text{(A 2.2)}$$

Zustandsänderungen, die nur einen Zustandsparameter betreffen, werden als *einfache Zustandsänderungen* bezeichnet. Sie verlaufen parallel zu den Koordinatenachsen des Zustandsraums.

Reaktivitätskoeffizient

Der Reaktivitätskoeffizient Γ_p des Zustandsparameters p ist definiert durch

$$\Gamma_p(p,q,r,...) = \frac{\partial\rho(p,q,r,...)}{\partial p} \qquad \text{(A 2.3)}$$

q, r, ... = const

Reaktivitätsäquivalent

Reaktivitätsintegral

Das Reaktivitätsäquivalent $\Delta\rho_p$ einer einfachen Zustandsänderung $p_1 \rightarrow p_2$, bei der die übrigen Zustandsparameter q, r, ... konstant gehalten werden, ist definiert durch

$$\Delta\rho_p = \int_{p_1}^{p_2} \Gamma_p(p, q_1, r_1, ...)\,dT_u \qquad \text{(A 2.4)}$$

$q = q_1 = \text{const}$
$r = r_1 = \text{const}$
. . .
. . .

Eine beliebige, zusammengesetzte Zustandsänderung von p_1, q_1, r_1, ... nach p_2, q_2, r_2, ... führt zu einer Reaktivitätsänderung

$$\Delta\rho = \int_1^2 d\rho = \int_{p_1 q_1 r_1 ...}^{p_2 q_2 r_2 ...} \Gamma_p(p,q,r,...)dp + \int_{p_1 q_1 r_1 ...}^{p_2 q_2 r_2 ...} \Gamma_q(p,q,r,...)dq + \qquad \text{(A 2.5)}$$
$$+ ...$$

$$= (\Delta\rho_p) + (\Delta\rho_q) + ... \qquad \text{(A 2.6)}$$

$\Delta\rho$ ist das Reaktivitätsäquivalent der betrachteten Zustandsänderung; es ist nur abhängig vom Anfangs- und Endzustand und nicht vom Verlauf des Zustandswegs zwischen diesen beiden Punkten im Zustandsraum.

Längs eines kritischen Weges ist definitionsgemäß $\Delta\rho = 0$.

Die Größen $(\Delta\rho)_p$, $(\Delta\rho)_q$, ... sind die zu dieser Zustandsänderung gehörenden Reaktivitätsintegrale der Zustandsparameter p, q, ...

Sie sind im allgemeinen vom Verlauf des Zustandswegs abhängig.

Die Reaktivitätsintegrale $(\Delta\rho)_p$, $(\Delta\rho)_q$, ... nach Gleichung (A 2.5) werden identisch mit den Reaktivitätsäquivalenten $\Delta\rho_p$, $\Delta\rho_q$, ... nach Gleichung (A 2.4), wenn die Variablen p, q, ... entkoppelt sind, das heißt, wenn die Reaktivität in der Form

$$\rho(p,q,...) = \rho_p(p) + \rho_q(q) + ... \qquad \text{(A 2.7)}$$

darstellbar ist.

Reaktivitätsbilanz

Die Gleichung (A 2.5) ist die allgemeine Definition einer Reaktivitätsbilanz. Da das Ergebnis $\Delta\rho$ der Bilanz vom Verlauf des Zustandsweges unabhängig ist, kann man bei der theoretischen Aufstellung der Bilanz einen beliebigen Weg wählen.

Besonders übersichtlich wird die Darstellung, wenn man den Zustandsweg aus einfachen Zustandsänderungen zusammensetzt. In diesem Fall gilt

$$\Delta\rho = \int_1^2 d\rho = \int_{p_1}^{p_2} \Gamma_p(p,q_1,r_1,s_1,...)dp + \int_{q_1}^{q_2} \Gamma_q(p_2,q,r_1,s_1,...)dq + \int_{r_1}^{r_2} \Gamma_r(p_2,q_2,r,s_1,...)dr + \qquad \text{(A 2.8)}$$
$$+ ...$$

$$= \Delta\rho_p + \Delta\rho_q + \Delta\rho_r + ... \qquad \text{(A 2.9)}$$

Dies ist die gebräuchliche Form der Reaktivitätsbilanz. Die Posten dieser Bilanz sind die Reaktivitätsäquivalente der einfachen Zustandsänderungen $p_1 \rightarrow p_2$, $q_1 \rightarrow q_2$, ... gemäß der Gleichung (A 2.4). Es ist zu beachten, daß diese Reaktivitätsäquivalente jeweils für eine ganz bestimmte Kombination der konstant gehaltenen übrigen Zustandsparameter gebildet werden müssen.

Anhang C
Beispiel zur Reaktivitätsbilanz beim Druckwasserreaktor

Ermittlung der Abschaltreaktivität nach dem Störfall "Frischdampfleitungsbruch"

Für die Aufstellung der Reaktivitätsbilanz wird als Ausgangszustand stationärer Betrieb angenommen. Zur Charakterisierung des reaktivsten Zustands, für den die Reaktivitätsbilanz aufgestellt werden soll, wird der Ablauf des Störfalls kurz beschrieben : Der auf den Bruch der Frischdampfleitung folgende schnelle Abfall des Frischdampfdrucks löst Schnellabschaltung und Isolation des betroffenen Dampferzeugers aus. Die Reaktorleistung sinkt innerhalb weniger Sekunden auf die Nachzerfallsleistung ab, während die Brennstofftemperatur von ihrem Ausgangswert nahezu auf den Wert der Kühlmitteltemperatur absinkt. Der aus dem betroffenen Dampferzeuger ausströmende Dampf entzieht den Primärkreislauf Wärme, so daß dem Übergang in den Nullastzustand eine Abkühlung überlagert ist. Im Verlauf des Ausdampfens des Dampferzeugers erreicht die Kühlmitteltemperatur ein Minimum. Dieses Minimum kennzeichnet den reaktivsten Zustand, der als Folge des Störfalls auftritt.

Die Abschaltreaktivität in diesem reaktivsten Zustand wird unter der Voraussetzung ermittelt, daß der wirksamste Stab nicht an der Abschaltung teilnimmt.

Bei der Aufstellung der Reaktivitätsbilanz sind als Zustandsparameter zu betrachten:

a) Variable Parameter:

mittlere Brennstofftemperatur T_u,

mittlere Kühlmitteltemperatur T_k,

Stabstellung s,

Kühlmitteldruck p

(kann vernachlässigt werden, solange das Kühlmittel unterkühlt ist, d.h. keine Dampfblasen im Reaktorkern auftreten).

Ebenfalls variabel ist die Reaktorleistung P. Sie bestimmt indirekt die Brennstofftemperatur und den thermohydraulischen Zustand des Kühlmittels (Mittelwert und Verteilung der Kühlmitteltemperatur, Kühlmitteldruck). Da jedoch die Reaktivität nicht explizit von der Reaktorleistung abhängt, wird sie hier nicht als unabhängiger Zustandsparameter geführt.

b) Konstante Parameter:

Borkonzentration (Massenkonzentration) C,

Xe-Konzentration X,

Abbrand A.

Ausgangszustand

Der Ausgangszustand ist ein stationärer Betriebszustand mit der Reaktorleistung $P = P_0$; er ist gleichzeitig der Referenzzustand bekannter Reaktivität:

$T_u = T_{u0}$ $\quad C = C_0$

$T_k = T_{k0}$ $\quad X = X_0$

$s = s_0$ $\quad A = A_0$

$\rho_{ref} = 0$

Für die Reaktivitätsbilanz wird die zusammengesetzte Zustandsänderung in eine Folge von einfachen Zustandsänderungen zerlegt. Diese Zerlegung ist willkürlich. Eine Möglichkeit ist die hier beschriebene:

1. Schritt: Übergang auf Nullast

Reaktorleistung P: $P_0 \rightarrow 0$

Brennstofftemperatur T_u: $T_{u0} \rightarrow T_{k0}$

Konstant bleiben: $T_k = T_{k0}$, $s = s_0$

Das Reaktivitätsäquivalent dieser Zustandsänderung ist:

$$\Delta\rho_D = \int_{T_{u0}}^{T_{k0}} \Gamma_u(T_u, T_{k0}, s_0)\,dT_u \qquad \text{(A 3.1)}$$

mit

$$\Gamma_u = \frac{\partial\rho}{\partial T_u} \qquad \text{(A 3.2)}$$

Reaktivitätskoeffizient der Brennstofftemperatur im Zustand T_{k0}, s_0, C_0, X_0, A_0

Der Brennstofftemperaturkoeffizient Γ_u beschreibt hier

a) den direkten Einfluß der Brennstofftemperatur T_u auf die Reaktivität, insbesondere den sogenannten Dopplereffekt;

b) den Einfluß der mit T_u zwangsläufig veränderlichen Verteilung der Kühlmitteltemperatur (bei festgehaltenem Mittelwert T_{k0}).

Entsprechend diesen beiden Einflüssen wird der Übergang auf Nullast gelegentlich auch in zwei Teilschritte 1.1 und 1.2 unterteilt:

1.1 $T_{u0} \rightarrow T_{k0}$ bei festgehaltener Verteilung der Kühlmitteltemperatur; das zugeordnete Reaktivitätsäquivalent wird als "Doppler-Reaktivität" bezeichnet.

1.2 Ausgangsverteilung der Kühlmitteltemperatur $\rightarrow$ Nullastverteilung der Kühlmitteltemperatur bei festgehaltenem Mittelwert T_{k0}. Besonders ausgeprägt ist die Umverteilung der Kühlmitteltemperatur in axialer Richtung (Verschwinden der Aufwärmespanne). Das diesem Übergang zugeordnete Reaktivitätsäquivalent wird als "Reaktivität der Umverteilung" bezeichnet.

2. Schritt: Abkühlung auf T_{kmin}

Kühlmitteltemperatur T_k: $T_{k0} \rightarrow T_{kmin}$

Brennstofftemperatur T_u: $T_{u0} \rightarrow T_{kmin}$

Konstant bleiben: $P = 0$, $s = s_0$

Das Reaktivitätsäquivalent dieser Zustandsänderung ist:

$$\Delta\rho_T = \int_{T_{k0}}^{T_{k\,min}} \Gamma_T(T, s_0)\,dT \qquad \text{(A 3.3)}$$

mit

$$\Gamma_T = \frac{\partial\rho}{\partial T} = \Gamma_k + \Gamma_u \qquad \text{(A 3.4)}$$

Reaktivitätskoeffizient der Temperatur im Zustand Nullast, s_0, C_0, X_0, A_0

$$\Gamma_k = \frac{\partial\rho}{\partial T_k} \qquad \text{(A 3.5)}$$

Reaktivitätskoeffizient der Kühlmitteltemperatur

$$\Gamma_u = \frac{\partial\rho}{\partial T_u} \qquad \text{(A 3.6)}$$

Reaktivitätskoeffizient der Brennstofftemperatur

$$T = T_k = T_u \qquad \text{(A 3.7)}$$

Temperatur des (isothermen) Reaktors bei Nullast

3. Schritt: Reguläre Abschaltung (alle Stäbe fallen)

Stabstellung s (Bank): $s_0 \rightarrow s_{max}$

Konstant bleiben: $P = 0$, $T_u = T_k = T = T_{kmin}$

Das Reaktivitätsäquivalent dieser Zustandsänderung ist die Wirksamkeit aller Stäbe, gerechnet von der Stellung s_0 aus, für den Zustand Nullast, T_{kmin}, C_0 ,X_0 ,A_0:

$$\Delta\rho_s = \int_{s_0}^{s_{max}} \Gamma_s(s, T_{k\,min})\,ds \qquad \text{(A 3.8)}$$

mit

$$\Gamma_s = \frac{\partial\rho}{\partial s} \qquad \text{(A 3.9)}$$

Differentielle Stabwirksamkeit

4. Schritt: Ausfahren des wirksamsten Stabs (Stuck-Rod)

Stabstellung s (Stuck-Rod): $s_{max} \rightarrow s_0$

Konstant bleiben alle übrigen Zustandsgrößen.

Das Reaktivitätsäquivalent dieser Zustandsänderung ist der Stuck-Rod-Wert $\Delta\rho_{StR}$, gerechnet zwischen s_{max} und s_0 für den Zustand Nullast, T_{kmin}, C_0, X_0, A_0.

Endzustand

$P = 0$

$T_u = T_{kmin}$ $\quad C = C_0$

$T_k = T_{kmin}$ $\quad X = X_0$

$s(\text{Bank}) = s_{max}$ $\quad A = A_0$

$s(\text{Stuck-Rod}) = s_0$

Reaktivitätsbilanz

Die Netto-Abschaltreaktivität p im Endzustand ist:

$$\rho_N = \rho_{ref} + \Delta\rho_D + \Delta\rho_T + \Delta\rho_s + \Delta\rho_{StR} \qquad \text{(A 3.10)}$$

Anhang D
Beispiel zur Reaktivitätsbilanz beim Siedewasserreaktor

Ermittlung der minimalen Abschaltreaktivität

Der Zustand minimaler Abschaltreaktivität ist beim Siedewasserreaktor der kalte, xenonfreie Abschaltzustand bei einem bestimmten Abbrand des Reaktorkerns (reaktivster Zustand). Für Reaktorkerne ohne abbrennbare Neutronenabsorber ist der reaktivste Zustand am Zyklusanfang gegeben; für Reaktorkerne mit abbrennbaren Absorbern kann er - je nach Ausbrenncharakteristik des Absorbers - auch erst nach einer Abbrandzunahme ΔA_r des Reaktorkerns im Zyklus auftreten.

Der Nachweis ausreichender Abschaltreaktivität ist somit für den regulär abgeschalteten Reaktor zu erbringen, wobei vorausgesetzt wird, daß der wirksamste Stellstab nicht an der Abschaltung teilgenommen hat (Netto-Abschaltreaktivität).

Referenzzustand

Da der Nachweis üblicherweise am Zyklusanfang erbracht wird, bietet sich der folgende Referenzzustand bekannter Reaktivität an:

a) Kalt, xenonfrei, nur wirksamster Stab gezogen;

b) Abbrandfrei, zusätzlich Nachbarstab des wirksamsten Stabs bis zur Kritikalitätsstellung s_{krit}, gezogen.

Reaktivität $\rho_{ref} = 0$.

Ausgehend von diesem Referenzzustand wird eine Reaktivitätsbilanz auf den reaktivsten Zustand hin erstellt. Dabei bleiben die unter a) erfaßten Zustandsgrößen unverändert, während die unter b) erfaßten variabel sind und in zwei Schritten nacheinander verändert werden.

1. Schritt: Herstellung des "stuck-rod"-Stabbildes, das heißt vollständiges Einfahren des Nachbarstabs

Stabstellung s (Nachbarstab) : $s_{krit} \rightarrow s_{ein}$

Alle anderen Zustandsgrößen: wie beim Referenzzustand

Das Reaktivitätsäquivalent dieser einfachen Zustandsänderung ist die Wirksamkeit des Nachbarstabs $\Delta\rho_{NS}$ zwischen s_{krit} und s_{ein} bei gezogenem wirksamsten Steuerstab und kaltem, xenonfreiem, abbrandfreiem Reaktor.

Dieses Reaktivitätsäquivalent kann bis zu einer Größenordnung von - 0,3 % durch Bestimmung einer negativen Periode direkt gemessen werden. Zur Bestimmung größerer Stabwirksamkeiten werden gemessene differentielle Stabwirksamkeiten häufig mit berechneten Wirksamkeitsverläufen kombiniert.

2. Schritt: Erhöhung des Kernabbrands um ΔA_r

Abbrand A: $A_0 \rightarrow A_0 + \Delta A_r$

Alle anderen Zustandsgrößen: wie nach Schritt 1

Das Reaktivitätsäquivalent dieser einfachen Zustandsänderung ist der maximale Reaktivitätsgewinn $\Delta\rho_A$ unter "stuck-rod" "-Bedingungen durch voreilenden Abbrand des abbrennbaren Absorbers. Er wird rechnerisch bestimmt.

Endzustand des Reaktors

a) Kalt, xenonfrei, nur wirksamster Stab gezogen;

b) Zyklusabbrand = ΔA_r , alle übrigen Stellstäbe eingefahren.

Damit ist der reaktivste Zustand des Reaktors eingestellt.

Reaktivitätsbilanz

Die Netto-Abschaltreaktivität ρ_N des Reaktors für diesen reaktivsten Zustand folgt aus der Reaktivitätsbilanz:

$$\rho_N = \rho_{ref} + \Delta\rho_{NS} + \Delta\rho_A \qquad \text{(A 4.1)}$$