

KTA 3101.2

Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren

Teil 2: Neutronenphysikalische Anforderungen an Auslegung und Betrieb des Reaktorkerns und der angrenzenden Systeme

Veröffentlicht im Bundesanzeiger 44a vom 04.03.1988

Inhalt

	Seite
Grundlagen	2
1 Anwendungsbereich.....	3
2 Begriffe.....	3
3 Sicherheitstechnische Bedingungen für Auslegung und Betrieb	4
3.1 Sicherheitstechnische Kenngrößen	4
3.2 Anforderungen und Maßnahmen	4
4 Überwachung und Begrenzung der Leistungsdichte.....	5
4.1 Begrenzung der Leistungsdichte.....	5
4.2 Instrumentierung des Reaktorkerns.....	5
4.3 Erfassung des thermohydraulischen Betriebszustands	6
4.4 Einrichtungen und Maßnahmen zur Leistungsdichtebegrenzung	7
4.5 Ermittlung von Grenzwerten.....	7
4.6 Meß- und Ansprechfehler.....	7
5 Systeme zur Reaktivitätssteuerung und Abschaltung.....	7
5.1 Allgemeine Anforderungen.....	7
5.2 Schnellabschaltsystem.....	7
5.3 Vergiftungssysteme.....	8
6 Anforderungen an nukleare Berechnungssysteme	9
6.1 Allgemeine Anforderungen.....	9
6.2 Einflußgrößen und Randbedingungen	9
6.3 Überprüfung der Gültigkeit und Genauigkeit.....	10
6.4 Anforderungen an die Dokumentation	10
Anhang A Empfohlene und zulässige Vorgehensweise bei der Durchführung der neutronen- physikalischen Berechnung.....	12
Anhang B Bestimmungen, auf die in dieser Regel verwiesen wird	14
Stichwortverzeichnis.....	15

Grundlagen

(1) Die Regeln des Kerntechnischen Ausschusses haben die Aufgabe, sicherheitstechnische Anforderungen anzugeben, bei deren Einhaltung die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist (§ 7 Abs. 2 Nr. 3 Atomgesetz), um die im Atomgesetz und in der Strahlenschutzverordnung festgelegten sowie in den "Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke" und den "Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren gegen Störfälle im Sinne des § 28 Abs. 3 Strahlenschutzverordnung (Störfall-Leitlinien)" weiter konkretisierten Schutzziele zu erreichen.

(2) Zur Erfüllung dieser Schutzziele wird eine Reaktoranlage so ausgelegt und betrieben, daß für den Reaktorkern vorgegebene, übergeordnete sicherheitstechnische Anforderungen erfüllt werden können. Solche sind die Abschaltfähigkeit, die Nachkühlfähigkeit und die Aktivitätsrückhaltung.

(3) Der Nachweis, daß diese übergeordneten Anforderungen erfüllt werden, wird u. a. durch sicherheitstechnische Analysen erbracht. Diese Analysen beziehen sich auf stationäre Zustände des Normalbetriebs, auf angenommene Ereignisabläufe des bestimmungsgemäßen Betriebs und auf Störfälle; sie werden üblicherweise verschiedenen Analysebereichen zugeordnet, wie zum Beispiel der nuklearen Kernausslegung, der thermohydraulischen Kernausslegung und der Brennstabauslegung. Die vorliegende Regel behandelt die nukleare Kernausslegung.

(4) Die Analysebereiche sind zum Teil miteinander verknüpft in dem Sinn, daß Ergebnisse einer vorgeschalteten Analyse als Eingangsdaten in eine nachgeschaltete Analyse

eingehen; siehe **Bild G-1**, hier sind typische Verknüpfungen und beispielhaft sicherheitstechnische Kenngrößen angegeben. Jeder einzelnen Analyse sind spezifische Anforderungen zugeordnet; damit sie erfüllt werden, müssen die Analysenergebnisse spezifizierten Bedingungen (Kriterien) genügen.

(5) Die Ergebnisse der nuklearen Kernberechnung sind zum Teil Eingangsgrößen für nachgeschaltete Ereignisablaufanalysen. Die transferierten Daten beschreiben physikalische Sachverhalte, hängen im einzelnen aber von den in den Analysen verwendeten mathematischen Modellen und Rechenprogrammen ab. Unabhängig jedoch von den verwendeten Modellen lassen sich die zugrunde liegenden physikalischen Sachverhalte durch eine begrenzte Zahl von sicherheitstechnischen Kenngrößen des Reaktorkerns beschreiben. Sie repräsentieren die sicherheitstechnisch relevanten Eigenschaften des Reaktorkerns.

(6) Die Art der sicherheitstechnischen Kenngrößen hängt ab vom Reaktortyp, von den der Auslegung der Gesamtanlage zugrunde zu legenden repräsentativen Ereignisabläufen und der angewandten Analysenmethodik. Die **Tabelle G-1** enthält sicherheitstechnische Kenngrößen aus den Analysebereichen Neutronenphysik und Thermohydraulik, die für Leichtwasserreaktoren heutiger Auslegung repräsentativ sind.

(7) Die sicherheitstechnischen Kenngrößen werden mit Hilfe der nuklearen Berechnungssysteme ermittelt. Die in dieser Regel behandelten Anforderungen an die Berechnung von Reaktorkernen werden durch stationäre oder quasistationäre Methoden erfüllt. Diese Methoden sind geeignet zur Ermittlung von:

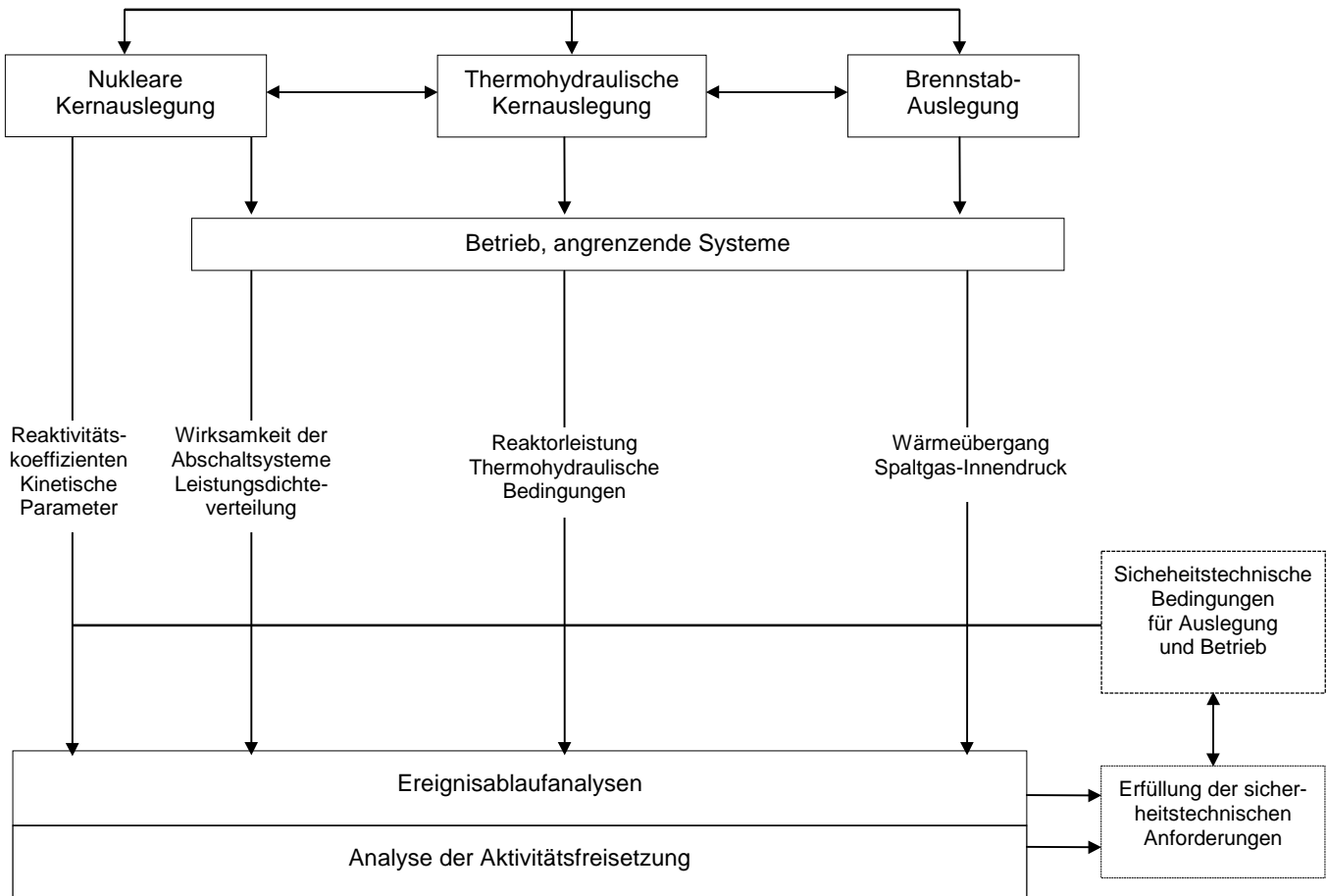


Bild G-1: Verknüpfung von Analysebereichen

- a) Multiplikationsfaktor, Reaktivität,
- b) Neutronenflußdichte,
- c) Neutronenstromdichte,
- d) Gammaflußdichte im Reaktorkern,
- e) Reaktionsraten für Neutroneneinfang, Neutronenstreuung und Spaltung,
- f) Freisetzungsrates der thermischen Energie (Leistungsdichte),
- g) Abbrandverteilung,
- h) Änderung von Nuklidichten.

SICHERHEITSTECHNISCHE KENNGRÖSSE
Reaktorleistung
Leistungsdichteverteilung, Leistungsdichte
Abstand zu kritischen Siedezuständen
Wirksamkeit der Steuerstäbe
Abschaltgeschwindigkeit der Schnellabschaltung
Maximale Reaktivitätsrate beim Fahren der Steuerstäbe
Wirksamkeit der Vergiftungssysteme
Reaktivitätsrate beim Vergiften
Abschaltreaktivität
Mittlerer Kernabbrand, Brennstababbrand, lokaler Abbrand
Reaktivitätskoeffizienten der - Kühlmitteltemperatur, - Kühlmitteldichte (Void), - Brennstofftemperatur (Doppler), - Konzentration von Neutronengiften
Bruchteil der verzögerten Neutronen, Lebensdauer der Neutronen

Tabelle G-1: Beispiel für sicherheitstechnische Kenngrößen

(8) Ein Berechnungssystem wird gebildet durch Kombination von Rechenmethode und Datensatz. Beide sind stets mit Näherungsannahmen behaftet und bestimmen die Genauigkeit der Rechenergebnisse gemeinsam. Hierbei bedeuten:

- a) Rechenmethode: Mathematische Modelle zur Lösung der Transportgleichung innerhalb eines Gebiets mit definierter Materialzusammensetzung, ergänzt durch die mathematische Beschreibung der Nuklidumwandlungen.
- b) Datensatz: Vom speziellen Anwendungsfall unabhängige, für einen größeren Analysenbereich unverändert gültige Eingangsdaten, wie zum Beispiel
 - ba) eine Sammlung kernphysikalischer Konstanten, die den Bereich der für die Reaktortechnik wichtigen Nuklide und Kernreaktionen umfaßt.
Hierzu gehören:
 - Wirkungsquerschnitte,
 - Energieverteilung der Spaltneutronen und primären Gammastrahlung
 - Zerfallskonstanten,
 - Spaltproduktausbeuten,
 - Neutronen- und Gammaausbeuten,
 - Energiefreisetzung von Kernreaktionen.
 - bb) Stoffwerte, wie zum Beispiel die Zustandsgrößen von Wasser,
 - bc) Konstanten der Atomphysik.

(9) Die Werte der sicherheitstechnischen Kenngrößen des Reaktorkerns hängen ab von der Auslegung, dem Abbrandzustand des Reaktorkerns und vom aktuellen Betriebszustand des Reaktorkerns. Die Erfüllung der Anforderungen läßt sich daher nicht allein durch die Kernausslegung gewährleisten; sie stellt vielmehr auch Anforderungen an angrenzende Systeme und den Betrieb.

(10) Diese Regel enthält daher auch Anforderungen an angrenzende Systeme, soweit sie von der Auslegung und dem Betrieb des Reaktorkerns gestellt werden müssen. Diejenigen Eigenschaften der angrenzenden Systeme, die wesentlichen Einfluß auf das Ergebnis sicherheitstechnischer Analysen haben, werden als sicherheitstechnische Kenngrößen der angrenzenden Systeme bezeichnet. Ihre aktuellen Werte hängen von der Auslegung und vom aktuellen Betriebszustand dieser Systeme ab.

1 Anwendungsbereich

(1) Diese Regel gilt für ortsfeste Kernkraftwerke mit leichtwassermodierten Druck- oder Siedewasserreaktoren. Sie enthält Anforderungen an die nukleare Auslegung und an den Betrieb des Reaktorkerns. Anforderungen an angrenzende Systeme werden insoweit behandelt, als sie aufgrund der Auslegung und des Betriebs des Reaktorkerns gestellt werden müssen.

(2) Zu den in Absatz 1 angeführten angrenzenden Systemen gehören

- a) Systeme zur Überwachung und Begrenzung der Reaktorleistung und der Leistungsdichte,
- b) Systeme die zur Reaktivitätssteuerung, zur Abschaltung sowie zur Überwachung und Aufrechterhaltung der Unterkritikalität im bestimmungsgemäßen Betrieb benötigt werden (zum Beispiel Steuerstäbe, Vergiftungssysteme, Kühlmittelumwälzpumpen beim SWR, Nachwärmeabfuhrsysteme beim DWR).
- c) Systeme die zur Aufrechterhaltung der Unterkritikalität nach Störfällen benötigt werden (zum Beispiel Vergiftungssysteme, Nachwärmeabfuhrsysteme beim DWR).

2 Begriffe

(1) Abschaltgeschwindigkeit des Schnellabschaltsystems

Die Abschaltgeschwindigkeit des Schnellabschaltsystems ist die durch die einfahrenden oder einfallenden Steuerstäbe bewirkte zeitliche Änderung der Reaktivität nach der Auslösung der Schnellabschaltung.

(2) Abschaltgeschwindigkeit des Vergiftungssystems

Die Abschaltgeschwindigkeit des Vergiftungssystems ist die durch die Zunahme der Giftkonzentration im Reaktorkern bewirkte zeitliche Abnahme der Reaktivität nach der Auslösung der Gifteinspeisung.

(3) Kalibrierfehler eines Leistungsdichte-Überwachungssignals

Der Kalibrierfehler eines Leistungsdichte-Überwachungssignals ist die relative Abweichung des Signalwertes von seinem Sollwert bei ungestörter Leistungsverteilung.

Hinweis:

Der Kalibrierfehler eines Leistungsdichte-Überwachungssignals kann verursacht werden durch

- a) Änderungen
 - des Verhältnisses der Meßgröße zur Leistungsdichte,
 - der ungestörten Leistungsverteilung mit dem Abbrand und der betrieblichen Steuerabstellung,
 - des Detektorabbrands gegenüber der letzten Kalibrierung,
- b) Toleranzen der Kalibriereinrichtungen und der Instrumentierung (z. B. Einstellgenauigkeit).

(4) Kernüberwachungszone

Eine Kernüberwachungszone ist ein Kernbereich, in dem die Leistungsdichte überwacht wird und in dem ein einheitlicher Wert für die maximal dort zulässige Leistungsdichte gilt.

(5) Leistungsdichte-Überwachungssignal

Ein Leistungsdichte-Überwachungssignal ist ein Signal, das aus den Anzeigen der inneren oder äußeren Meßfühler der Kerninstrumentierung oder aus den Anzeigen beider gebildet wird und das repräsentativ ist für die maximale Leistungsdichte oder deren Änderung in der ihm zugeordneten Kernüberwachungszone.

(6) Nettowirksamkeit des Schnellabschaltsystems

Die Nettowirksamkeit des Schnellabschaltsystems ist die Wirksamkeit des Schnellabschaltsystems für den Fall, daß diejenige Komponente des Schnellabschaltsystems versagt, die zum größtmöglichen Wirksamkeitsverlust dieses Systems führt.

Hinweis:

Siehe hierzu Begriff "Wirksamkeit des Schnellabschaltsystems".

(7) Nettowirksamkeit eines Vergiftungssystems

Die Nettowirksamkeit eines Vergiftungssystems ist die Wirksamkeit eines Vergiftungssystems für den Fall, daß diejenige Komponente des Vergiftungssystems versagt, die zum größtmöglichen Wirksamkeitsverlust dieses Systems führt.

Hinweis:

Siehe hierzu Begriff "Wirksamkeit des Vergiftungssystems".

(8) Spurfehler eines Überwachungssignals

Der Spurfehler eines Überwachungssignals ist eine bei zu unterstellenden Störungen der Leistungsverteilung, die eine Erhöhung der Leistungsdichte in der zugehörigen Kernüberwachungszone zur Folge haben können, auftretende Abweichung des Überwachungssignals von seinem Sollwert.

Hinweis:

Der Spurfehler eines Überwachungssignals hängt ab von

- der Anzahl, Positionierung und Kalibrierung der Meßfühler,
- der Art, wie die einzelnen Detektorsignale zum Überwachungssignal geknüpft werden,
- der Art der zu unterstellenden Störung der Leistungsverteilung.

(9) Validierung

Die Validierung ist die Überprüfung der Gültigkeit und Genauigkeit der erzielbaren Ergebnisse durch Beispiele mit exakten analytischen Lösungen oder durch Experimente oder durch andere überprüfte Rechenprogramme.

(10) Wirksamkeit des Schnellabschaltsystems

Die Wirksamkeit des Schnellabschaltsystems ist das in eine Abschalt-Reaktivitätsbilanz für den Übergang von einem kritischen Ausgangszustand des Normalbetriebs (Steuerstäbe in ihrer betrieblichen Stellung) zu dem in der Bilanz betrachteten Endzustand (Steuerstäbe in ihrer Endstellung nach Schnellabschaltung) einzusetzende Reaktivitätsäquivalent.

Hinweis:

Der zu betrachtende Endzustand hängt vom analysierten Ereignisablauf ab.

Die Wirksamkeit des Schnellabschaltsystems hängt u. a. ab von der Ausgangsstellung der Steuerstäbe vor der Abschaltung.

(11) Wirksamkeit eines Vergiftungssystems

Die Wirksamkeit eines Vergiftungssystems ist das in eine Abschalt-Reaktivitätsbilanz einzusetzende Reaktivitätsäquivalent der Giftkonzentrationszunahme ausgehend vom Anfangszustand vor Anforderung des Vergiftungssystems bis zum betrachteten Endzustand.

3 Sicherheitstechnische Bedingungen für Auslegung und Betrieb**3.1 Sicherheitstechnische Kenngrößen**

(1) Die sicherheitstechnischen Kenngrößen sind für jeden Reaktor in Abhängigkeit vom Reaktortyp, der Auslegung der Gesamtanlage und der Analysenmethodik festzulegen.

(2) Die im Normalbetrieb zulässigen Wertebereiche der sicherheitstechnischen Kenngrößen sind durch repräsentative Analysen zu ermitteln. Kriterien für die zulässigen Wertebereiche sind:

- a) Einhaltung der von anderen Analysenbereichen vorgegebenen Belastungsgrenzen für Reaktorkernbauteile,
- b) Einhaltung der in den Analysen von Ereignisabläufen des anomalen Betriebs und von Störfällen angenommenen oder als zulässig erwiesenen Ausgangszustände des Reaktorkerns,
- c) Gewährleistung der inhärenten Sicherheit des Reaktorkerns,

Hinweis:

Unter der inhärenten Sicherheit von Reaktorkernen in Leichtwasserreaktoren versteht man die Eigenschaft, daß

- ein im Vergleich zu den Zeiten für Störfallerfassung und Schutzaktionen schneller, unkontrollierter Leistungsanstieg aufgrund prompter Rückkopplungseigenschaften des Reaktorkerns begrenzt wird und,
 - bei Störfällen mit Druckabfall und Dampfblasenbildung auch ohne Schutzaktionen eine Selbstabschaltung oder eine Begrenzung der Spaltleistung auf zulässige Werte erfolgt.
- d) Einhaltung der in den Analysen von Ereignisabläufen des anomalen Betriebs und von Störfällen angenommenen Ausgangszuständen und Wirksamkeiten der angrenzenden Systeme.

Hinweis:

Für einen angenommenen Ausgangszustand des Reaktorkerns und der angrenzenden Systeme hängen die als zulässig nachgewiesenen Wertebereiche ab von:

- der Art des analysierten Zustands oder Ereignisses (z. B. bestimmungsgemäßer Betrieb, Ereignisabläufe unterschiedlicher Eintrittshäufigkeit),
- den speziellen sicherheitstechnischen Anforderungen oder zulässigen Konsequenzen, die dem analysierten Zustand oder dem Ereignis zugeordnet sind,
- der Analysenmethode (konservative Annahmen oder erhöhte Nachweistiefe),
- den ermittelten Rechenunsicherheiten.

Der kleinste Wertebereich, der sich für eine gegebene Kenngröße aus allen relevanten Analysen ergibt, ist der für die Kenngröße zulässige Wertebereich.

(3) Die Analysen dürfen exemplarisch durchgeführt werden für einen Reaktorkern, der hinsichtlich seiner Beladung und seines Abbrandzustands repräsentativ ist für eine Reihe von Reaktorkernen und dessen Ausgangszustand für die zu betrachtenden Ereignisabläufe in konservativer Weise so gewählt ist, daß das Ergebnis der Analyse alle zu unterstellenden Ausgangszustände abdeckt.

3.2 Anforderungen und Maßnahmen

(1) Der Reaktorkern und die angrenzenden Systeme sind so auszulegen und zu betreiben, daß die sicherheitstechnischen Kenngrößen ihre als zulässig nachgewiesenen Wertebereiche im Normalbetrieb grundsätzlich einhalten. Das zeitlich begrenzte Verlassen von Wertebereichen, die Ausgangszustände für Analysen von Ereignisabläufen nach Abschnitt 3.1 Absatz 2 Aufzählung b festlegen, ist zulässig. Dabei ist der zulässige Zeitraum in Abhängigkeit von den betrachteten Ereignisabläufen anzugeben.

(2) Sicherheitstechnische Kenngrößen, die nicht allein von der Auslegung sondern auch vom Betriebszustand des Re-

aktorkerns und der angrenzenden Systeme bestimmt werden und die ihre zulässigen Wertebereiche während des Betriebs überschreiten können, sind während des Betriebs oder bei wiederkehrenden Prüfungen zu überwachen. Es ist eine Instrumentierung des Reaktorkerns und der angrenzenden Systeme vorzusehen, die geeignet ist, solche sicherheitstechnischen Kenngrößen selbst oder ihnen zugeordnete Meßgrößen zu erfassen. Eine Zuordnung möglicher Meßgrößen zu sicherheitstechnischen Kenngrößen ist in **Tabelle 3-1** angegeben.

(3) Als Maßnahmen zur Einhaltung der zulässigen Wertebereiche nach Absatz 2 sind vorzusehen:

- Handmaßnahmen in Verbindung mit Betriebsvorschriften (einschließlich wiederkehrenden Prüfungen),
- Automatische Regeleinrichtungen,
- Automatische Begrenzungseinrichtungen oder
- Schnellabschaltung.

(4) Handmaßnahmen als alleinige Maßnahmen nach Absatz 3 sind zulässig, wenn

- dem Operateur die Überschreitung der betreffenden Grenzwerte angezeigt wird und
- unter Berücksichtigung der jeweiligen Ereignisabläufe für die Einleitung von Gegenmaßnahmen genügend Zeit zur Verfügung steht.

(5) Die Art der Maßnahme sowie die zulässige Wartezeit bis zum Wirksamwerden von Gegenmaßnahmen ist anhand der jeweiligen Ereignisabläufe festzulegen.

4 Überwachung und Begrenzung der Leistungsdichte

4.1 Begrenzung der Leistungsdichte

Die Leistungsdichte ist so zu begrenzen, daß

- bei Ereignissen des anomalen Betriebs und bei Störfällen, die zu einer Erhöhung der Leistungsdichte oder einer Verschlechterung der Kühlung führen können, die als zulässig nachgewiesenen Brennstoff- und Hüllrohrzustände eingehalten werden und
- im bestimmungsgemäßen Betrieb die in KTA 3101.1 geforderten Grenzen eingehalten werden und
- im bestimmungsgemäßen Betrieb die sicherheitstechnisch relevanten Randbedingungen für die mechanische Auslegung der Brennstäbe eingehalten werden und
- im Normalbetrieb die durch sicherheitstechnische Analysen als zulässig nachgewiesenen Ausgangswerte der Leistungsdichte für Ereignisse des anomalen Betriebs und für Störfälle im Sinne von Abschnitt 3.2 Absatz 1 eingehalten werden.

Hinweis:

Zu unzulässigen Belastungen der Brennstäbe können führen:

- Erreichen der Brennstoffschmelztemperatur,
- Auftreten von kritischen Siedezuständen nach KTA 3101.1,
- Zu hohe Änderung und Änderungsraten der lokalen Leistungsdichte oberhalb bestimmter Grenzwerte der Leistungsdichte im Hinblick auf Wechselwirkungen zwischen Brennstoff und Hüllrohr.

Die Grenzwerte der lokalen Leistungsdichte können in verschiedenen Bereichen des Reaktorkerns verschieden sein und außerdem von den lokalen thermohydraulischen Bedingungen (Druck, Temperatur, Blasengehalt, Massenstromdichte des Kühlmittels) sowie vom Abbrand abhängen.

4.2 Instrumentierung des Reaktorkerns

4.2.1 Überprüfung der Leistungsdichteverteilung

(1) Soweit zur Erfüllung der Anforderungen nach Abschnitt 4.1 erforderlich, ist zur Überprüfung der Leistungsdichteverteilung eine kontinuierlich oder diskontinuierlich anzeigende Instrumentierung des Reaktorkerns vorzusehen.

Hinweis:

Beispiele für eine diskontinuierlich anzeigende Instrumentierung sind das Kugelmeßsystem und das Fahrkammersystem mit den zugehörigen Auswerteeinrichtungen.

(2) Anzahl und Positionen der Meßfühler müssen ausreichen, um signifikante Abweichungen der tatsächlichen Leistungsdichteverteilung von der erwarteten Form erkennen zu können. Insbesondere müssen azimutale Unsymmetrien der Leistungsdichteverteilung und lokal unterschiedliche axiale Leistungsdichteverteilungen durch das Meßsystem erkannt werden können.

4.2.2 Überwachung der Leistungsdichte

(1) Soweit zur Erfüllung der Anforderungen nach Abschnitt 4.1 erforderlich, ist zur Überwachung der lokalen Leistungsdichte eine kontinuierlich anzeigende Instrumentierung des Reaktorkerns und der Kühlkreisläufe vorzusehen.

Hinweis:

Als Meßfühler für die kontinuierliche Überwachung der Leistungsdichte kommen in Frage:

- Neutronen- oder Gammafluß-Detektoren innerhalb des Reaktorkerns (Kern-Inneninstrumentierung),
- Außeninstrumentierung),
- Temperatur-Meßfühler im Reaktorkern und in den Kühlkreisläufen.

(2) Anzahl und Positionen der Meßfühler, ihre Kalibrierung und die Art der Signalbildung sind so zu wählen, daß unzulässige Erhöhungen der lokalen Leistungsdichte im Sinne von Abschnitt 4.1 in den einzelnen Überwachungszonen des Reaktorkerns erfaßt werden können.

Hinweis:

Ursachen für unzulässige Erhöhungen der lokalen Leistungsdichte gegen über einem Referenzzustand können sein:

Änderung der Steuerstab-Stellungen, Änderungen der Xenonverteilung, Änderungen der Temperatur- und Dampfblasenverteilung.

(3) Die Signale dieser Meßfühler dürfen einzeln oder in Kombination miteinander zur Überwachung der Leistungsdichte herangezogen werden. Werden zur Ermittlung der ortsabhängigen Leistungsdichte die Anzeigen der Meßfühler durch rechnerisch ermittelte Informationen über das Verhalten der Leistungsdichteverteilung ergänzt, so gelten für diese Rechenverfahren die Anforderungen des Abschnitts 6. Diese Information darf aus vorausgegangenen exemplarischen Rechnungen oder aus einer mit laufenden Rechnung gewonnen werden.

(4) Der Auslegung der Systeme zur Leistungsdichte-Überwachung und -Begrenzung sind Leistungsdichte-Umverteilungen zugrunde zulegen, die aufgrund

- der Auslegung des Reaktorkerns,
- der Fahrweise der Anlage (Lastwechsel, Lastrampen),
- der anzunehmenden Ausfälle angrenzender Systeme (zum Beispiel Ausfall der Leistungs-Verteilungs-Regelung),
- der anzunehmenden Steuerstab-Fehlstellungen,

vorkommen können.

Hinweis:

Die Anforderungen der Absätze 1 bis 4 lassen sich z. B. erfüllen, wenn aus den Anzeigen der Meßfühler für jede Überwachungszone ein Überwachungssignal gebildet wird, das bei allen anzu-

nehmenden Leistungsdichte-Umverteilungen, die eine Erhöhung der Leistungsdichte in der betreffenden Überwachungszone zur Folge haben können, proportional ist

- entweder zur maximalen Leistungsdichte in der zugeordneten Überwachungszone
- oder zur Erhöhung der maximalen Leistungsdichte in der zugeordneten Überwachungszone über einen bekannten Referenzwert.

Abweichungen von der Proportionalität werden als Spurfehler bezeichnet.

(5) Bei der Festlegung der im anomalen Betrieb zu unterstellenden Steuerstab-Fehlstellungen sind zu berücksichtigen:

- a) Steuerstab-Fahrbegrenzungen und -Fahrverriegelungen,
- b) die Auslegung der Systeme zur Betätigung und Stellungüberwachung der Steuerstäbe.

(6) Anstiege der Leistungsdichte, die zu unzulässigen Werten führen können, müssen durch mehr als einen Meßfühler je Kernüberwachungszone erfaßt werden (Informationsredundanz).

4.3 Erfassung des thermohydraulischen Betriebszustands

Sofern die einzuhaltenden Grenzwerte der lokalen Leistungsdichte von den thermohydraulischen Kühlbedingungen abhängig sind, ist eine Instrumentierung des Reaktorkerns und der Kühlkreisläufe vorzusehen, die die Kühlbedingungen im Reaktorkern erfassen kann.

Hinweis:

Meßgrößen, die hierfür in Frage kommen, sind in KTA 3101.1, Abschnitt 4.6.2 angegeben.

Nr.	Zuordnung möglicher Meßgrößen		Sicherheitstechnische Kenngröße
	Druckwasserreaktor	Siedewasserreaktor	
1	Aufwärmspanne der Kühlkreisläufe, Wärmebilanz, Neutronenfluß, Gammafluß		Reaktorleistung
2	Neutronenflußverteilung außerhalb und innerhalb des Reaktorkerns, Kühlmitteltemperatur im Reaktorkern, Aufwärmspannen der Kühlkreisläufe, Gammaflußverteilung im Reaktorkern, Steuerstabstellungen	Neutronenflußverteilung im Reaktorkern,	Leistungsdichteverteilung, Leistungsdichte
3	wie bei Nr. 1 und 2 zusätzlich: Kühlmitteldruck, Kühlmitteltemperatur, Drehzahlen der Kühlmittelumwälzpumpen	Reaktordruck, Kerneintritsunterkühlung, Drehzahlen der Kühlmittelumwälzpumpen Druckdifferenz	Abstand zu kritischen Siedezuständen
4	Eintauchtiefe der Steuerstäbe	(ist durch Nr. 9 unter Berücksichtigung des Steuerstababbrands abgedeckt)	Wirksamkeit der Steuerstäbe
5	Fallzeit der Steuerstäbe	Einschleifzeit der Steuerstäbe	Abschaltgeschwindigkeit der Schnellabschaltung
6	Fahrgeschwindigkeit von Steuerstäben	Differentielle Steuerstabwirksamkeiten, Laständerungsgeschwindigkeit, Anzahl der gleichzeitig ausfahrbaren Steuerstäbe	Maximale Reaktivitätsrate beim Fahren der Steuerstäbe
7	Füllstand und Giftkonzentration in Vorratsbehältern		Wirksamkeit der Vergiftungssysteme
8	Förderleistung von Einspeisepumpen, Konzentration eingespeister Neutronengifte		Reaktivitätsrate beim Vergiften
9	Steuerstabstellung, Neutronenfluß Borkonzentration im Kühlmittel, Kühlmitteltemperatur	Kritische Steuerstabbilder für den kalten kritischen Reaktor	Abschaltreaktivität
10	Zeitintegral der Leistung		Mittler Kernabbrand, Brennstababbrand, lokaler Abbrand

Tabelle 3-1: Beispiel für eine Zuordnung möglicher Meßgrößen zu sicherheitstechnischen Kenngrößen für den Reaktorkern und angrenzende Systeme

4.4 Einrichtungen und Maßnahmen zur Leistungsdichtebegrenzung

(1) Der Reaktorkern ist so auszulegen und zu betreiben, daß die Leistungsdichte auf die nach den Anforderungen nach Abschnitt 4.1 zulässigen Werte begrenzt werden kann. Soweit erforderlich, sind dazu Einrichtungen und Maßnahmen zur Leistungsdichtebegrenzung vorzusehen, zum Beispiel

- a) Handmaßnahmen in Verbindung mit Betriebsvorschriften,
- b) automatische Regelungen,
- c) Steuerstab-Fahrbegrenzungen,
- d) automatisch wirkende Begrenzungen der integralen Leistung und der lokalen Leistungsdichte,
- e) Schnellabschaltung.

Hinweis:

Die erforderlichen Maßnahmen und Einrichtungen zur Begrenzung der Leistungsdichte hängen ab von

- der Größe und Auslegung des Reaktorkerns,
- der thermohydraulischen Auslegung der Kühlkreisläufe,
- dem vorgesehenen Lastfahrprogramm (Konstantlast, Lastwechsel, Lastrampen),
- dem Steuerstabfahrprogramm,
- dem Abstand der betrieblich möglichen Leistungsdichtewerte von den durch Analysen als zulässig nachgewiesenen Grenzwerten.

(2) Zur Erfüllung der Anforderungen nach Abschnitt 4.1 Aufzählungen b und d sind vorzugsweise automatisch wirkende Zustandsbegrenzungen nach KTA 3501 oder eine Schnellabschaltung vorzusehen. Diese dürfen ergänzt werden durch Handmaßnahmen in Verbindung mit Betriebsvorschriften.

(3) Zur Einhaltung der Anforderung nach Abschnitt 4.1 Aufzählung c sind bei hinreichend langsam ablaufenden Schädigungsmechanismen Handmaßnahmen in Verbindung mit Betriebsvorschriften zulässig.

(4) Zur Einhaltung der Anforderung nach Abschnitt 4.1 Aufzählung a sind automatisch wirkende Schutzbegrenzungen nach KTA 3501 oder eine Schnellabschaltung vorzusehen.

4.5 Ermittlung von Grenzwerten

(1) Die einzuhaltenden Grenzwerte der Leistungsdichte sind nach Abschnitt 3.1 aus Analysen repräsentativer Ereignisabläufe abzuleiten.

Hinweis:

Die einzuhaltenden Grenzwerte der Leistungsdichte zur Vermeidung einer unzulässigen Belastung der Brennelemente und zur Sicherstellung der in Störfallanalysen sich als zulässig erweisenden Ausgangswerte der lokalen Leistungsdichte ergeben sich aus den Anforderungen in Abschnitt 4.1.

(2) Der aus den Analysen für eine gegebene Überwachungszone folgende restriktivste Grenzwert ist der in dieser Überwachungszone einzuhaltende Grenzwert.

4.6 Meß- und Ansprechfehler

(1) Unsicherheiten in der Kalibrierung der Signale zur Erfassung der Leistungsdichte und des thermohydraulischen Betriebszustands sind anzugeben (Kalibrierfehler).

(2) Spurfehler, die bei den zu unterstellen den Leistungsdichte-Erhöhungen zu einer Unterschätzung der Leistungsdichte führen können, sind rechnerisch oder experimentell zu bestimmen. Für diese Nachweise genügen exemplarische Untersuchungen an einem repräsentativen Reaktorkern.

(3) Kalibrierfehler und Spurfehler sind zu einem resultierenden Ansprechfehler der Leistungsdichtebegrenzung zusammenzufassen und bei der Festlegung der Ansprechwerte zu berücksichtigen.

menzufassen und bei der Festlegung der Ansprechwerte zu berücksichtigen.

5 Systeme zur Reaktivitätssteuerung und Abschaltung

5.1 Allgemeine Anforderungen

(1) Es sind Systeme zur Reaktivitätssteuerung und Abschaltung vorzusehen; hierzu gehören Steuerstäbe und Vergiftungssysteme.

(2) Die Abschaltssysteme sind so auszulegen, daß der Reaktorkern durch Reaktivitätsbindung aus jedem Zustand des bestimmungsgemäßen Betriebs heraus in den unterkritischen Zustand überführt und jederzeit unterkritisch gehalten werden kann.

Hinweis:

Sicherheitstechnische Kenngrößen eines Abschaltsystems sind:

- seine Wirksamkeit und Netto-Wirksamkeit,
- seine Abschaltgeschwindigkeit,
- die größtmögliche positive Reaktivitätsrate, die durch fehlerhafte Betätigung von Reaktivitäts-Stellgliedern verursacht werden kann.

Die systemtechnischen Anforderungen an die Abschaltssysteme einschließlich der Anforderungen an wiederkehrende Prüfungen sind in KTA 3103 festgelegt.

Die reaktivitätsseitigen Anforderungen an diese Systeme werden durch folgende Eigenschaften der nuklearen Kernausslegung bedingt:

- Überschußreaktivität zur Gewährleistung eines vorgegebenen Zielabbrandes,
- Reaktivitätskoeffizienten der Leistung, der Kühlmitteltemperatur, der Brennstofftemperatur, des Dampfblasengehaltes,
- Wirksamkeit der Xenon-Vergiftung,
- Wirksamkeit von abbrennbaren Absorbieren.

Bei der Ermittlung der Abschaltreaktivität sind die Anforderungen aus KTA 3104 zu beachten.

(3) Soweit nach KTA 3103 in den Abschaltssystemen ein Einzelfehler zu unterstellen ist, ist dieser bei derjenigen Komponente der Abschaltssysteme anzunehmen, deren Versagen zur betragsmäßig kleinsten Abschaltreaktivität oder Abschaltgeschwindigkeit führt. Diese Komponente ist durch eine systembezogene Analyse zu ermitteln.

(4) Komponenten der Abschaltssysteme dürfen auch für betriebliche Regelungsaufgaben eingesetzt werden. In diesem Fall ist durch ihre Auslegung und durch entsprechende sicherheitstechnische Bedingungen für den Betrieb sicherzustellen, daß die für die Abschaltung benötigte Wirksamkeit dieser Komponente in jedem Betriebszustand erhalten bleibt.

5.2 Schnellabschaltssystem

5.2.1 Allgemeine Anforderungen

(1) Schnellabschaltungen sind automatisch durch das Reaktorschutzsystem auszulösen, wenn bei Ereignissen des bestimmungsgemäßen Betriebs und bei Störfällen eine oder mehrere Sicherheitsvariable vorgegebene Grenzwerte erreichen. Auslösung von Hand muß ebenfalls möglich sein.

(2) Aufgabe des Schnellabschaltsystems ist es, im Zusammenwirken mit den inhärenten Eigenschaften des Reaktorkerns und gegebenenfalls mit anderen Sicherheitseinrichtungen

- a) die den auslösenden Ereignissen zugeordneten sicherheitstechnischen Anforderungen zu gewährleisten, und

b) nach erfolgter Schnellabschaltung den Reaktor - gegebenenfalls im Zusammenwirken mit den Vergiftungssystemen - beliebig lange unterkritisch zu halten.

(3) Die für die Erfüllung dieser Aufgaben erforderlichen Wirksamkeiten und Geschwindigkeiten sind durch repräsentative Analysen von angenommenen Ereignisabläufen zu ermitteln. Die anzunehmenden Häufigkeiten der Ereignisse und die Versagensannahmen sollen aufeinander abgestimmt sein.

(4) Die durchzuführenden Analysen dürfen sich auf Ereignisabläufe beschränken, die die höchsten Anforderungen an Wirksamkeit und Abschaltgeschwindigkeit stellen, wie

- a) hinsichtlich der erforderlichen Wirksamkeit: Ereignisse mit Kernunterkühlung (DWR), Abfahren in den kalten, xenonfreien Zustand (SWR),
 - b) hinsichtlich der erforderlichen Abschaltgeschwindigkeit: der gleichzeitige Ausfall aller Kühlmittel-Umwälzpumpen (DWR), Ausfall der Hauptwärmesenke (SWR),
 - c) hinsichtlich der größtmöglichen durch Fehlfunktion verursachten Reaktivitätsrate: das durch einen Fehler in der Ansteuerung verursachte Ausfahren von Steuerstabbänken (Anfahrstörfall).
- (5) Werden Komponenten des Schnellabschaltsystems auch für betriebliche Regelungsaufgaben eingesetzt, so sind durch mögliche Fehlfunktionen verursachte Ereignisabläufe ebenfalls zu untersuchen.

5.2.2 Spezielle Anforderungen beim Druckwasserreaktor

(1) Das Schnellabschaltsystem und der Reaktorkern sind so auszulegen, daß nach Abschaltungen infolge von Ereignissen des bestimmungsgemäßen Betriebs bis zur Sicherstellung der Unterkritikalität durch das Vergiftungssystem der Betrag der Netto-Abschaltreaktivität den Wert von 0,3 % nicht unterschreitet.

(2) Bei rechnerischer Nachweisführung mit bewährten Auslegungsrechenverfahren ist ein rechnerischer Betrag der Netto-Abschaltreaktivität von 1 % ausreichend. Bei Verwendung anderer Auslegungsrechenverfahren ist mit der Methodik zur Validierung nach Abschnitt 6 ein entsprechender Wert nachzuweisen.

(3) Nach störfallbedingter Abschaltung ist ein vorübergehendes Wiederkritischwerden und vorübergehendes Wiederansteigen der Leistungsdichte zulässig, solange die allgemeinen Anforderungen des Abschnitts 5.2.1 erfüllt werden.

5.2.3 Spezielle Anforderungen beim Siedewasserreaktor

(1) Das Schnellabschaltsystem und der Reaktorkern sind so auszulegen, daß nach Abschaltung der Betrag der Netto-Abschaltreaktivität im Zustand Nulllast, kalt, xenonfrei, 0,3 % nicht unterschreitet.

(2) Bei rechnerischer Nachweisführung mit bewährten Auslegungsrechenverfahren ist ein rechnerischer Betrag der Netto-Abschaltreaktivität von 1 % ausreichend. Bei Verwendung anderer Auslegungsrechenverfahren ist mit der Methodik zur Validierung nach Abschnitt 6 ein entsprechender Wert nachzuweisen.

(3) Als Sicherung gegen unbeabsichtigtes Kritischwerden und unbeabsichtigte Leistungserhöhung sind Anfahr- und Beladeverriegelungen sowie Schnellabschaltanregungen vorzusehen.

5.2.4 Sicherheitstechnische Bedingungen für den Betrieb

Es ist zu gewährleisten, daß die durch Analysen nachgewiesenen zulässigen Wertebereiche der sicherheitstechnischen

Kenngrößen des Schnellabschaltsystems (siehe Abschnitt 5.1) im Betrieb eingehalten werden. Hierfür sind neben der Auslegung des Reaktorkerns und des Schnellabschaltsystems Maßnahmen vorzusehen, wie

- a) Begrenzung der zulässigen Eintauchtiefe von Steuerstäben durch Betriebsvorschriften oder automatische Begrenzungssysteme,
- b) Begrenzung der Ausfahrgeschwindigkeit von Steuerstabgruppen, Begrenzung der Zahl gleichzeitig ausfahrbarer Steuerstäbe.

5.3 Vergiftungssysteme

5.3.1 Aufgaben

(1) Wenn die Wirksamkeit des Schnellabschaltsystems nicht ausreicht, um den Reaktor in den kalten, xenonfreien, unterkritischen Zustand zu überführen, sind Vergiftungssysteme vorzusehen. Aufgabe solcher Vergiftungssysteme ist es, im Zusammenwirken mit den inhärenten Eigenschaften des Reaktorkerns und gegebenenfalls mit anderen Systemen den Reaktor auch im reaktivsten Zustand, der nach der Schnellabschaltung auftreten kann, unterkritisch zu halten (Fall A).

(2) Vergiftungssysteme, die die Funktion eines zweiten, vom Schnellabschaltsystem unabhängigen Abschaltsystems erfüllen sollen, müssen in der Lage sein, den Reaktor unabhängig vom Steuerstabsystem aus allen Zuständen des bestimmungsgemäßen Betriebs heraus, die keine schnellen Reaktivitätsänderungen erfordern, unterkritisch zu machen und auch im reaktivsten Zustand, der nach der Abschaltung auftreten kann, unterkritisch zu halten (Fall B).

5.3.2 Anforderungen

(1) Die erforderlichen Wirksamkeiten und Abschaltgeschwindigkeiten der Vergiftungssysteme sind aus Analysen der Ereignisabläufe zu ermitteln, die die höchsten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Vergiftungssysteme stellen. Dabei ist die Abhängigkeit von

- a) der Auslegung der Vergiftungssysteme hinsichtlich der Volumina von Vorratsbehältern, der Förderleistung des Einspeisesystems, der Entnahmerate durch das Volumenregelsystem beim DWR,
- b) den Strömungs- und Vermischungsbedingungen im Kühlkreislauf,
- c) dem Betriebszustand des Vergiftungssystems hinsichtlich der Menge der vorhandenen Vorratslösung, Giftkonzentration in der Vorratslösung,
- d) der Auslegung und dem Abbrandzustand des Reaktorkerns (Giftwirksamkeit),
- e) dem Betriebszustand des Reaktorkerns im Ausgangs- und im abgeschalteten Zustand,
- f) der Giftkonzentration im Ausgangszustand

zu beachten. Die anzunehmenden Häufigkeiten der Ereignisse und die Versagensannahmen innerhalb der Vergiftungssysteme sollen aufeinander abgestimmt sein.

(2) Die Wirksamkeit oder Netto-Wirksamkeit des je nach Anforderungsfall zum Einsatz kommenden Vergiftungssystems muß für den Fall A

- a) die Reaktivitätszufuhr beim Übergang vom Zustand Nulllast heiß in den Zustand Nulllast kalt,
- b) die Reaktivitätszufuhr beim Übergang in den xenonfreien Zustand, wobei von der je nach Anforderungsfall zu unterstellenden maximalen Xenon-Konzentration auszugehen ist,

- c) die störungsbedingte Reaktivitätszufuhr durch Deionateinspeisung beim DWR

mit der aufgrund der Ereignisablaufanalysen erforderlichen Geschwindigkeit soweit kompensieren können, daß der Reaktor unterkritisch bleibt und die erforderliche Abschaltreaktivität erreicht.

(3) Die erforderliche Netto-Abschaltreaktivität im Fall A beträgt im Zustand Nulllast, kalt, xenonfrei mindestens 0,3 %. Bei rechnerischer Nachweisführung mit bewährten Auslegungsverfahren ist ein rechnerischer Betrag der Netto-Abschaltreaktivität von 1 % ausreichend.

(4) Das Vergiftungssystem ist im Fall B so auszulegen, daß der Reaktor aus dem angenommenen Ausgangszustand des bestimmungsgemäßen Betriebs in den unterkritischen Zustand überführt werden kann und die nach Absatz 3 ermittelte Abschaltreaktivität langfristig sichergestellt ist. Dazu ist erforderlich, daß zur Berechnung der Absorberwirksamkeit ein Programmsystem verwendet wird, das durch Experimente validiert wurde, und eine Überwachung des Neutronenflusses und der Absorberkonzentration vorgenommen wird. Liegen die vorgenannten Voraussetzungen nicht vor, so ist das Vergiftungssystem so auszulegen, daß ein rechnerischer Betrag der Abschaltreaktivität von 5 % eingehalten wird.

5.3.3 Spezielle Anforderungen beim Druckwasserreaktor

Als Sicherung gegen unbeabsichtigtes Kritischwerden ist die Giftkonzentration zu überwachen und ihre Verdünnung durch Maßnahmen nach Abschnitt 3.2 Absatz 3 zu verhindern.

5.3.4 Sicherheitstechnische Bedingungen für den Betrieb

Es ist zu gewährleisten, daß die durch Analysen nachgewiesenen zulässigen Wertebereiche von Menge und Konzentration der Gift-Vorratslösung im Betrieb und der Einspeiserate der Giftlösung im Anforderungsfall eingehalten werden.

6 Anforderungen an nukleare Berechnungssysteme

6.1 Allgemeine Anforderungen

(1) Nukleare Berechnungssysteme müssen in der Lage sein, die sicherheitstechnischen Kenngrößen des Reaktorkerns, soweit sie durch Auslegung des Reaktorkerns bedingt sind, sowie zur Validierung der Berechnungssysteme erforderliche Meßgrößen zu bestimmen. Die übliche Vorgehensweise bei der Durchführung der neutronenphysikalischen Berechnung ist in Anhang A aufgeführt.

(2) Durch nukleare Berechnungssysteme müssen folgende physikalische Phänomene beschreibbar sein:

- Neutronentransport,
- die durch Neutronen induzierten nuklidweisen Reaktionsratendichten als Funktion des Orts und des Abbrands,
- die induzierten Nuklidumwandlungen als Funktion des Orts und des Abbrands,
- die spontanen Zerfallsreaktionen instabiler Nuklide,
- Rückwirkung thermodynamischer Zustandsänderungen auf die Flußdichteverteilung,
- Einfluß der Spaltprodukte auf die Flußdichteverteilung,
- Wärmequelldichteverteilung.

(3) Vereinfachungen und Näherungen in den Modellen zur Berechnung dieser Phänomene sind zulässig. Hierzu gehören:

- die Aufteilung des Gesamtproblems in Teilprobleme,
- die Einbeziehung repräsentativer Lösungen von Teilproblemen in die Lösung des Gesamtproblems, wie

- Berechnung des Neutronenflusses und der Reaktionsraten in einer Gitterzelle mit idealisierten Randbedingungen,

- Berechnung des Neutronenflusses und der Reaktionsraten in einem größeren Gitterausschnitt, zum Beispiel einem Brennelement in typischer Umgebung,

- Ersatz einer expliziten Darstellung des Reflektors durch Albedo-Randbedingungen oder geeignet homogenisierte Reflektordarstellungen.

- c) die vereinfachte Darstellung der geometrischen und materiellen Struktur des Reaktorkerns, wie

- Homogenisierung von Teilbereichen des Reaktorkerns,

- Ersatz von kontinuierlichen Ortsvariablen durch eine endliche Zahl diskreter Maschen (räumliche Diskretisierung),

- Explizite Darstellung der geometrischen Struktur in weniger als drei Raumdimensionen,

- Darstellung des Einflusses vernachlässigter Raumdimensionen durch geeignete Korrekturterme,

- Zusammenfassung von Spaltprodukten zu Pseudo-Nukliden.

- d) die spektrale Diskretisierung des kontinuierlichen Neutronen- oder Gamma-Spektrums,

- e) die Diskretisierung des Abbrands (Konstanthaltung der Leistungsdichteverteilung während eines Abbrandschrittes),

- f) die Gleichsetzung von Wärmequelldichte mit dem Produkt aus Spaltratendichte und nutzbarer Energie pro Spaltung. Pauschale Berücksichtigung der Wärmefreisetzung im Strukturmaterial und Kühlmittel sind zu lässig.

Hinweis:

Der Nachweis für die Zulässigkeit der angeführten Vereinfachungen wird durch die Überprüfung der Gültigkeit und Genauigkeit geführt, siehe Abschnitt 6.3.

- (4) Es ist auch zulässig, zur Beschreibung von physikalischen Teilaspekten innerhalb des Berechnungssystems Korrelationen zu verwenden, die aus Experimenten abgeleitet wurden, sofern die Experimente für den vorgesehenen Anwendungsbereich der Korrelation repräsentativ sind.

6.2 Einflußgrößen und Randbedingungen

Für die Ausführung nuklearer Rechnungen sind je nach Aufgabenstellung die folgenden Einflußgrößen und Randbedingungen in Betracht zu ziehen:

- Anordnung und Zusammensetzung des Brennstoffs und Moderators sowie der Strukturteile innerhalb des Brennelements,
- Brennelemente unterschiedlicher Zusammensetzung und ihre Anordnung im Reaktorkern,
- räumliche Änderung der Brennstoffzusammensetzung durch Abbrand,
- lokalisierte abbrennbare und im Moderator gelöste Neutronengifte,
- Steuerstäbe,
- Material außerhalb des Reaktorkerns (Reflektor),
- Absorptionswirkung der Neutronenquellen und der Kerninstrumentierung,
- räumliche und zeitliche Änderungen von
 - Brennstofftemperatur,
 - Moderatortemperatur und -dichte,
 - Nuklidichten
 in Abhängigkeit von Abbrand und Leistung,

- i) Einwirkungen der Gesamtanlage (Teillastdiagramm, Umwälzregelkennlinien),
- k) Fertigungstoleranzen.

6.3 Überprüfung der Gültigkeit und Genauigkeit

(1) Berechnungssysteme, die für sicherheitstechnische Nachweise eingesetzt werden, müssen für den jeweiligen Anwendungsbereich validiert sein.

(2) Bei der Validierung des Berechnungssystems sind die systematischen und unsystematischen Fehler zu ermitteln. Nachgewiesene systematische Abweichungen der Ergebnisse von Referenzwerten dürfen durch entsprechende Anpassungskorrekturen am Ergebnis eliminiert werden.

(3) Das zu validierende Berechnungssystem ist auf Referenzprobleme anzuwenden, für die entweder theoretische Referenzlösungen oder qualifizierte Referenz-Meßergebnisse vorliegen (integrale Validierung). Teile eines Berechnungssystems dürfen für sich validiert werden (partielle Validierung).

(4) Als Referenzlösungen sind Ergebnisse von Berechnungssystemen, die entweder

- a) bereits validiert sind, oder
- b) die zu berechnenden physikalischen Sachverhalte durch realistische Modelle darstellen

zu verwenden.

(5) Liegen keine Referenzmeßergebnisse vor und ist eine Extrapolierbarkeit auf Anwendungsbereiche erforderlich, die für die Auslegung nicht erheblich sind, so sind vorzugsweise theoretische Referenzlösungen, sog. Benchmark-Probleme, heranzuziehen, die gegenüber dem Reaktor meist eine vereinfachte Geometrie, aber auch problemspezifische Erswernisse (zum Beispiel besondere Heterogenitäten) aufweisen und für die theoretische Referenzlösungen mit höherer Genauigkeit bekannt sind.

Hinweis:

Referenzlösungen können z. B. durch Verfahren mit hoher Orts- und Energieauflösung oder mit der Monte-Carlo-Methode gewonnen werden.

(6) Hierbei soll die Sensitivität des Ergebnisses gegenüber getroffenen Methodenvereinfachungen oder gegenüber Variationen gewisser Eingabeparameter untersucht werden, wie

- a) Einfluß der Art der gewählten Homogenisierung des Brennelementes und der ggf. anschließenden Ermittlung lokaler Größen,
- b) Einfluß der Anzahl der Energiegruppen und der Gruppengrenzen sowie der Anisotropie der Streuung bei Rechenproblemen mit hoher Heterogenität,
- c) Einfluß der Vernachlässigung von Raumdimensionen.

Hinweis:

Partielle und integrale Validierung ergänzen sich und werden in der Regel kombiniert. Bei der alleinigen Verwendung von integralen Verfahren kann eine Fehlerkompensation nicht ausgeschlossen werden. Deshalb ist die Extrapolierbarkeit auf Anwendungsbereiche, die für die Auslegung nicht erheblich sind, geringer zu veranschlagen. Andererseits kann bei alleiniger Verwendung von partiellen Verfahren der Nachweis der vollständigen Abdeckung des Gesamtsystems durch einzelne Validierungsschritte schwierig sein.

(7) Die Ergebnisse des zu validierenden Berechnungssystems sind mit den Referenzlösungen oder den Referenz-Meßergebnissen zu vergleichen. Aus diesem Vergleich sind die Abweichungen zwischen diesen Ergebnissen und den Referenzwerten abzuleiten und unter Berücksichtigung der problemabhängigen Anwendung des Berechnungssystems zu bewerten.

(8) Bei der Auswahl von Referenz-Meßergebnissen sind vor allem die folgenden Kriterien zu beachten:

- a) Dokumentation der Messungen,
- b) Qualität der Messung und Fehlerbetrachtung,
- c) Übertragbarkeit der Meßbedingungen auf den für die Auslegung abzudeckenden Anwendungsbereich des Berechnungssystems.

(9) **Tabelle 6-1** gibt Beispiele für Referenzmessungen zur Validierung nuklearer Berechnungssysteme.

6.4 Anforderungen an die Dokumentation

Über das Berechnungssystem sind Berichte zu fertigen. Diese sollen

- a) das Berechnungssystem hinsichtlich der Rechenmethoden, der Datensätze und der Validierungsprozedur beschreiben,
- b) den Anwendungsbereich des Berechnungssystems bezeichnen und die Genauigkeit der Ergebnisse quantifizieren.

I. Validierung nuklearer Berechnungssysteme am Leistungsreaktor

Referenzmessung	Bezug zu sicherheitstechnischen Kenngrößen
Herstellung kritischer Zustände bei Nulllast und xenonfreiem Reaktorkern unter Variation von - Kühlmitteltemperatur, - Borkonzentration (DWR), - Steuerstabstellung zur Ermittlung von Borwirksamkeit (DWR), integraler und differentieller Wirksamkeit von Steuerstäbbänken und Einzelstäben, isothermen Temperaturkoeffizienten.	Wirksamkeit der Steuerstäbe und der Vergiftungssysteme, Reaktivitätsrate beim Vergiften, Abschaltreaktivität, Reaktivitätskoeffizienten
Herstellung kritischer Zustände beim DWR bei Nulllast nach vorausgegangenem stationärem Leistungsbetrieb unter Variation der Borkonzentration zur Ermittlung der Reaktivitätsäquivalente der Leistung und der Xenonvergiftung.	Abschaltreaktivität, Reaktivitätskoeffizienten
Variation von Steuerstabstellung, Kühlmitteltemperatur und Borkonzentration bei stationärem Leistungsbetrieb beim DWR zur Ermittlung von differentieller Steuerstabwirksamkeit, Borwirksamkeit und Kühlmitteltemperaturkoeffizient.	Maximale Reaktivitätsrate beim Fahren der Steuerstäbe, Reaktivitätskoeffizienten
Auswertung von Neutronenfluß- (oder Gammafluß-) empfindlichen Detektorsignalen der Kerninneninstrumentierung zusammen mit charakteristischen Kühlmitteldaten (Druck, Temperatur) bei stationärem Leistungsbetrieb für verschiedene Steuerstabstellungen und bei lokalen Xenontransienten.	Leistungsdichteverteilung, Leistungsdichte, Sicherheit gegen Filmsieden, mittlerer und lokaler Abbrand
Messung charakteristischer Daten des Reaktorkerns bei Betriebstransienten im Leistungsbetrieb, wie zum Beispiel - Reaktorschnellabschaltung, - Ausfall von Kühlmittelumwälzpumpen, - Kernunterkühlung, - Lastabwurf, - Fehlfahren von Steuerstäben.	Reaktorleistung, Reaktivitätskoeffizienten,
Kleinsignalmessungen zur Ermittlung von Übertragungsfunktionen (Oszillationsmessungen, Sprungantwort, Rauschanalyse)	Reaktivitätskoeffizienten

II. Validierung nuklearer Berechnungssysteme an kritischen oder unterkritischen Anordnungen

Messung von mikroskopischen Fluß- und Reaktionsratenverteilungen in Gitterzellen oder Gitterausschnitten, makroskopische Flußdichteverteilung

III. Validierung nuklearer Berechnungssysteme durch Messungen an bestrahltem Brennstoff

Gammascan,
Isotopenanalyse

Tabelle 6-1: Beispiele für Referenzmessungen zur Validierung nuklearer Berechnungssysteme

Anhang A

Empfohlene und zulässige Vorgehensweise bei der Durchführung der neutronenphysikalischen Berechnung

A 1 Allgemeines

(1) Die Anforderungen der Abschnitte 6.2 bis 6.4 werden durch Berechnungssysteme erfüllt, die das Gesamtproblem der nuklearen Auslegung in mehreren Stufen lösen, so daß die Rechnungen in größtmöglicher Nähe zu den angestrebten Nachweisen liegen.

Eine Vorgehensweise in vier Stufen bei der Erstellung der Gruppenkonstanten und der anschließenden Reaktorkernberechnung.

Stufe 1 Erzeugung von Wirkungsquerschnitten für diskrete Werte von Energie und Streuwinkel

Stufe 2 Erzeugung von Vielgruppenkonstanten,

Stufe 3 Erzeugung von Weniggruppenkonstanten,

Stufe 4 Reaktorkernberechnung.

(2) Die Beachtung der im folgenden beschriebenen Vorgehensweise berührt nicht die Vorschriften des Abschnitts 6.3, jedoch reicht sie bei der Erfüllung dieser Vorschriften stets aus.

A 2 Erzeugung von Wirkungsquerschnitten für diskrete Werte der Variablen γ (Stufe 1 in **Bild A-1**)

(1) Ein kernphysikalischer Datensatz heißt bewertet, wenn die kernphysikalischen Konstanten für jedes Nuklid vollständig und eindeutig vorliegen. Bei der Erstellung des Datensatzes wird noch kein Bezug auf ein reaktorspezifisches Neutronenspektrum genommen.

(2) Den weitaus größten Teil eines Datensatzes bilden die Wirkungsquerschnitte. Sie hängen in komplizierter Weise von Energie und Impuls der Neutronen ab. Schon wegen ihres Umfangs können sie nicht direkt zur Reaktorberechnung benutzt werden, sondern bedürfen einer Reduktion, die unter schrittweiser Einführung spezifischer Reaktoreigenschaften erfolgt.

(3) Die Erzeugung bewerteter Datensätze (Punktquerschnitte), wie zum Beispiel ENDF/B (Evaluated Nuclear Data File) oder KEDAK (Kerndaten Karlsruhe), ist nicht Gegenstand dieser Regel.

A 3 Erzeugung von Vielgruppenkonstanten aus dem bewerteten Datensatz (Stufe 2 in **Bild A-1**)

(1) Der Reaktortyp, zum Beispiel Leichtwasserreaktor, Schwerwasserreaktor, geht auf Stufe 2 der Datenreduktion nur geringfügig ein durch:

- a) Wahl der Gruppenzahl und Gruppengrenzen für den Vielgruppensatz,
- b) Wahl des Übergangs von Spalt- auf Bremsspektrum für die Wichtung,
- c) Vereinfachungen bei der Einebnung der nichtaufgelösten Resonanzen und der nur schwach sich abschirmenden aufgelösten:
 - ca) Analytische Wichtungsfunktion, vorzugsweise engere Resonanz-Näherung,
 - cb) Vernachlässigung der Interferenzstreuung,
 - cc) Verwendung von Äquivalenzrelationen für die Ortsabhängigkeit,

cd) oft sogar Verzicht auf Orts- und Temperaturabhängigkeit.

(2) Resonanzen, deren Selbstabschirmung von Bedeutung ist, werden nicht behandelt, sondern ihre Parameter zusammen mit den Vielgruppenkonstanten für die Rechnungen der Stufe 3 bereitgestellt.

(3) Die Bildung der Vielgruppenkonstanten geschieht für jedes Nuklid isoliert, bei der Einebnung von Resonanzen wird jeweils auch nur eine einzelne Gruppe der gewählten Vielgruppenstruktur behandelt.

(4) Gewöhnlich beginnt eine Reaktorkernberechnung mit dem Zweig A in der Stufe 3. Berechnungen auf Stufe 2 müssen nur bei Erweiterung oder Änderung der Datenbasis des LWR-spezifischen Spektralprogramms durchgeführt werden.

A 4 Kondensation auf Weniggruppenkonstanten (Stufen 3A und 3B in **Bild A-1**)

(1) Am Anfang dieser Stufe steht die Einebnung der Resonanzen mit Selbstabschirmung in die Vielgruppenstruktur, die unter Berücksichtigung der Elementarzellegeometrie (s. u.) sowie der Resonanzabsorber- und Moderatorkonzentrationen zu erfolgen hat. Die Näherungsannahme gegenseitiger Nicht-Beeinflussung der Resonanzen verschiedener Nuklide ist erlaubt, jedoch ist die Temperaturverbreiterung zu berücksichtigen.

Hinweis:

Soll die Abbrandentwicklung in starken Aktinidenkonzentrationen möglichst genau berechnet werden, so wird gemeinsame Behandlung aller Resonanznuklide in einer einzigen, den ganzen epithermischen Energiebereich umfassenden Rechnung empfohlen.

(2) Der einleitende Schritt der problemabhängigen Vervollständigung der Vielgruppenkonstantenbasis hat die Berechnung des gesamten Neutronenspektrums der zugrundegelegten Materialanordnung und -mischung vorauszugehen.

(3) Falls Weniggruppenkonstanten für die unterschiedlichen Bereiche des Reaktorkerns mit einem Spektral-Abbrandprogramm direkt berechnet werden, sind dabei Rechnungen sowohl für Elementarzellen als auch für Superzellen durchzuführen und daraus ein vollständiger Datensatz von 1- bis 2-Gruppenkonstanten, wie sie für Kernberechnungen (Stufe 4) benötigt werden, herzuleiten.

Hinweis:

Elementarzellen und Superzellen werden zur "Homogenisierung" der räumlichen Feinstruktur des Brennstabgitters eingeführt, um durch eindimensionale Behandlung den Rechenaufwand zu reduzieren. Hierzu wird der Reaktorkern in Bereiche aufgeteilt, innerhalb derer die neutronenphysikalischen Gittereigenschaften (Geometrie und Materialien) so gleichförmig sind, daß sie durch jeweils einen einzigen Satz von Gruppenkonstanten dargestellt werden können.

Als Elementarzellen werden üblicherweise Brennstabzellen sowie wassergefüllte und mit Absorber gefüllte Strukturzellen eingeführt. Diese werden zylindrisiert und das Strukturmaterial, z. B. der Abstandshalter, anteilig einer Ringzone zugeschlagen.

Durch die Einführung von Superzellen ist es in Reaktorkernen in Druckwasserreaktoren möglich, größere Homogenisierungsbereiche durch eine einzige repräsentative Gitterzelle mit geeigneten Randbedingungen darzustellen. Die zylindrische Superzelle enthält in ihrem Zentrum eine Elementarzelle, die auch einen Absorber enthalten kann und deren äußere

Zone aus dem homogenisierten Material der umgebenden Teile des Brennelements besteht.

(4) Beim Druckwasserreaktor dürfen sowohl für Elementarzellen als auch für Brennelemente 1D-Spektral-Abbrandrechnungen ohne Rückkopplung mit der späteren Reaktorrechnung durchgeführt und dabei wichtige Betriebsvariable als Parameter variiert werden. Die erhaltenen parametrisierten 1- bis 2- Gruppenkonstanten sind direkt für die Reaktorkernberechnung (Stufe 4) verwendbar.

(5) In Fällen nicht zu vernachlässigender Wechselwirkung zwischen benachbarten Elementarzellen ist eine 2D-Weniggruppenrechnung für das Brennelement zwischenschalten (Zweig B). Dabei ist zu prüfen, ob in der 2D-Brennelementrechnung die Wechselwirkung des Brennelements mit seiner Umgebung berücksichtigt werden muß.

(6) Der Kernaufbau des Siedewasserreaktors (Steuerstabkreuze, breite Wasserspalte, mehrere Anreicherungen im Brennelement) erfordert stets den Rechenablauf des Zweigs B. Der starken Brennelement-Heterogenität ist dabei durch eine Iteration zwischen den Zweigen A und B Rechnung zu tragen. Außer den Werten der Zustandsparameter ist auch die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Elementarzellen rückzukoppeln.

Hinweis:

Wird die 2D-Neutronenflußrechnung in Diffusionsnäherung durchgeführt, so ist in der Umgebung starker Absorber eine Anpassung an Ergebnisse von 1D-Transportrechnungen vorzunehmen. Anpassungsgrößen können sein: Randfluß/Randstrom (Diffusionskonstante) oder Absorptionsrate (Absorptions-/Spaltratenverhältnis).

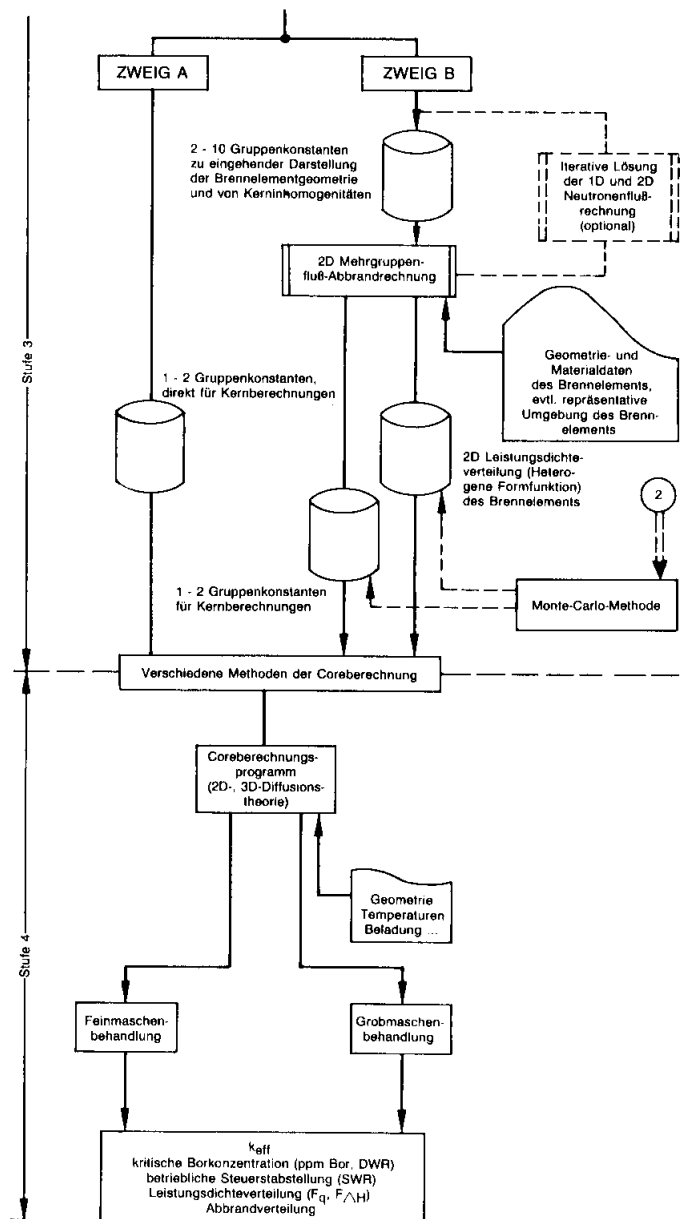
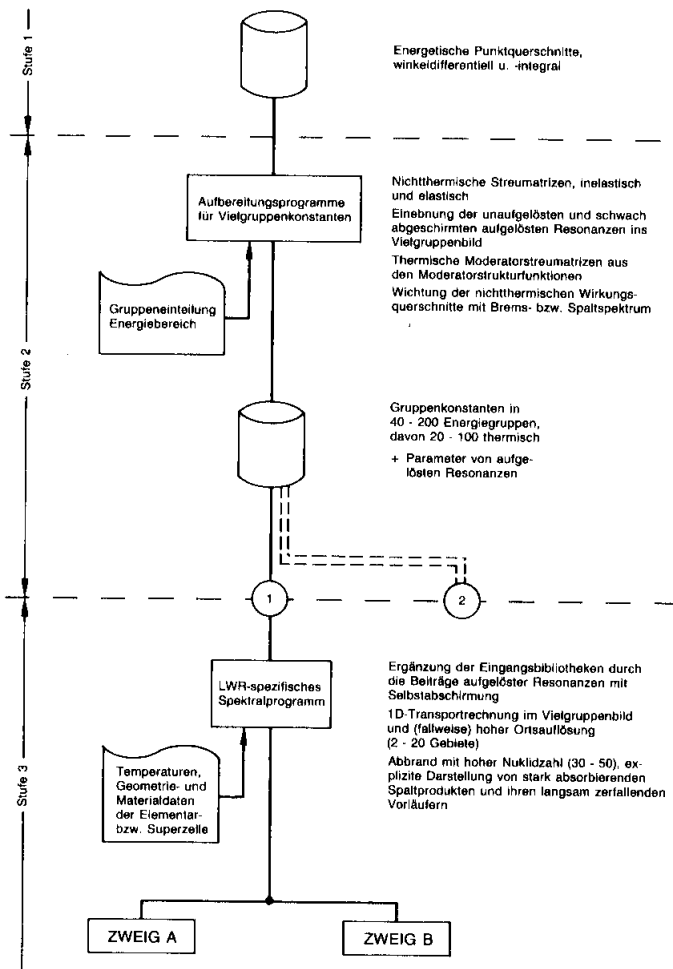


Bild A-1: Ablauf der nuklearen Kernberechnung

(7) Die 1- bis 2-Gruppenkonstanten für Reaktorkernberechnungen sind in Abhängigkeit von wichtigen Betriebsvariablen darzustellen. Solche sind:

- a) Abbrand des Brennstoffs und der abbrennbaren Neutronengifte,
- b) Brennstofftemperatur,
- c) Moderatorichte und -temperatur.

(8) Die wesentliche Reduktion der Kerndaten findet auf den Zweigen A und B statt. Die dazu gemachten, hier kurz beschriebenen Näherungen sollen eine rationelle Lösung dieses Problems erreichen. Die Monte-Carlo-Methode jedoch, auf die in **Bild A-1** ebenfalls hingewiesen wird, ist prinzipiell frei von allen diesen Näherungen. Sie löst die Transportgleichung durch Beschreibung und statistische Auswertung einer großen Zahl einzelner Neutronenschicksale. Damit ist sie empfohlen zur Überprüfung der Näherungen in Zweifelsfällen oder - allgemeiner - zur Aufstellung von Referenzlösungen für die Validierung der üblichen Vorgehensweise.

A 5 Reaktorkernberechnungen (Stufe 4 in **Bild A-1**)

(1) Reaktorkernberechnungen, insbesondere Abbrandrechnungen dürfen wegen des Problemumfangs normalerweise mit Hilfe von Grobmaschenverfahren durchgeführt werden. Dabei dürfen über jeweils ein Brennelement gemittelte Weniggruppenkonstanten verwendet werden.

(2) Während für die Brennelement-Einsatzplanung häufig 2D-Rechnungen ausreichen, ist für andere Aufgaben, bei denen axiale Flußverteilungen und Flußumverteilungen eine Rolle spielen, eine 3D-Darstellung erforderlich.

(3) Die Ergebnisse einer Kernberechnung mit homogenisierter Darstellung der Brennelemente reichen für viele Anwendungen aus, zum Beispiel für die Berechnung des Multiplikationsfaktors k_{eff} , für die Beurteilung der globalen Leistungsverteilung, für die Berechnung von gemittelten Brennelementabbränden. Für andere Fragestellungen ist jedoch

eine höhere räumliche Auflösung bis hin zur Darstellung einzelner Brennstäbe erforderlich. Dies gilt mindestens für die Bestimmung der maximalen Leistungsdichte und des maximalen lokalen Abbrands im Brennelement, für die Bestimmung des minimalen DNB-Verhältnisses im Reaktorkern und für die Berechnung von Detektorsignalen der Kerninstrumentierung. Für diese Anwendungen ist es notwendig, die mikroskopischen Verteilungen des Neutronenflusses und der lokalen Leistungsverteilung im ganzen Reaktorkern zu kennen. Ein Hilfsmittel für die Ermittlung der mikroskopischen Verteilungen sind die sogenannten Brennelement-Formfunktionen. Eine Brennelement-Formfunktion wird aus der 2D-Mehrgruppen-Fluß-Abbrandrechnung der Stufe 3 gewonnen und dem Ergebnis der Grobmaschenrechnung (Stufe 4) aufmoduliert.

Hinweis:

Zur Ermittlung der Brennelement-Formfunktion denkt man sich das Brennelement in eine, für seine Situation im Reaktorkern typische Umgebung eingebettet. Dadurch werden repräsentative Randbedingungen für die spektrale Zusammensetzung des Neutronenflusses erzeugt. Häufig wird es genügen, das Brennelement unter Symmetrierandbedingungen zu betrachten.

(4) Statt der Vorgehensweise nach Absatz 3 kann die Feinmaschenmethode mit der über Elementarzellen gemittelten Weniggruppenkonstanten Verwendung finden. Wenn dafür jedoch auf eine dreidimensionale Darstellung des Reaktorkerns verzichtet werden muß, ist der Einfluß des Separationsproblems auf die Ergebnisse zu diskutieren.

(5) Bei der Ermittlung lokaler Leistungsdichteverteilungen ist sowohl für die Grobmaschenmethode als auch für die Feinmaschenmethode im Sinne der in Abschnitt 6.3 dargestellten Überprüfung der Gültigkeit und Genauigkeit zu fordern, daß die Reaktionsraten der einzelnen Brennstäbe in ausgesuchten typischen Kernbereichen und Umgebungen anhand von einer qualifizierten Referenzlösung überprüft oder konservativ abgeschätzt werden. Analoge Nachweise sind für die Leistungsdichteverteilung in Brennelementen, die an den Reflektor angrenzen, zu erbringen.

Anhang B Bestimmungen, auf die in dieser Regel verwiesen wird

(Verwiesene Bestimmungen gelten nur in der in diesem Anhang angegebenen Fassung)

KTA 3101.1	(2/80)	Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren; Teil 1: Grundsätze der Thermohydraulischen Auslegung
KTA 3103	(3/84)	Abschaltsysteme von Leichtwasserreaktoren
KTA 3501	(6/85)	Reaktorschutzsystem und Überwachungseinrichtungen des Sicherheitssystems

Stichwortverzeichnis

- Abschaltgeschwindigkeit des Schnellabschaltsystems 2 (1)
Abschaltgeschwindigkeit des Vergiftungssystems 2 (2)
Abschaltreaktivität 5.1 (3)
Abschaltsysteme 5.1
Anfahrstörfall 5.2.1 (4)c
angrenzende Systeme siehe: Systeme, angrenzende
Ansprechfehler 4.6 (3)
- Begrenzung der Leistungsdichte 4.1
Benchmark-Probleme 6.3 (5)
Berechnung, neutronenphysikalische Anhang A
Berechnungssysteme, nukleare 6
Betrieb, anomaler 3.1 (2)b u. d; 4.1 a; 4.2.2 (5)
Betrieb, bestimmungsgemäßer Grundlagen (3); 4.1 b u. c;
5.1 (2); 5.2.1 (1); 5.2.2 (1); 5.3.1 (2); 5.3.2 (4)
- Datensatz Grundlagen (8); A 2; A 4 (3)
Dokumentation 6.4
- Einzelfehler 5.1 (3)
Elementarzellen A 4 (3); A 4 (3) Hinweis; A 4 (4) u. (6); A 5
(4)
- Fahrkammersystem 4.2.1 (1) Hinweis
Feinmaschenmethode A 5 (4) u. (5)
- Grenzwerte der Leistungsdichte 4.5 (1)
Grobmaschenmethode A 5 (5)
Grobmaschenverfahren A 5 (1)
- Handmaßnahmen 3.2 (3)a u. (4); 4.4 (1)a; 4.4 (2) u. (3)
- Informationsredundanz 4.2.2 (6)
inhärente Sicherheit 3.1 (2)c; 3.1 (2)c Hinweis
Instrumentierung des Reaktorkerns 4.2
- Kalibrierfehler 4.6 (1) u. (3)
- eines Leistungsdichte-Überwachungssignals 2 (3)
Kenngröße, sicherheitstechnische Grundlagen (4), (5), (6),
(7), (9) u. (10); Tabelle G-1; 3.1; Tabelle 3-1; 3.2 (1) u.
(2); 5.1 (2) Hinweis; 5.2.4; 6.1 (1); Tabelle 6-1
Kern-Außeninstrumentierung 4.2.2 (1) Hinweis
Kern-Inneninstrumentierung 4.2.2 (1) Hinweis
Kernüberwachungszone 2(4)
Kritischwerden, unbeabsichtigtes 5.3.3
Kugelmeßsystem 4.2.1 (1) Hinweis
- Leistungsdichte-Umverteilungen 4.2.2 (4) u. Hinweis
Leistungsdichte-Überwachungssignal 2 (5)
Leistungsbegrenzung 4.4
- Meßgrößen Tabelle 3-1
Monte-Carlo-Methode A 4 (8)
- Näherungen 6.1 (3)
Netto-Abschaltreaktivität 5.2.2 (1) u. (2); 5.2.3 (1) u. (2);
5.3.2 (3)
Nettowirksamkeit des Schnellabschaltsystems 2(6)
Nettowirksamkeit eines Vergiftungssystems 2(7)
Normalbetrieb Grundlagen (3); 3.1 (2); 3.2 (1); 4.1 d
- Phänomene, physikalische 6.1 (2)
Prüfungen, wiederkehrende 3.2 (2)
- Rechenmethode Grundlagen (8)
Referenz-Meßergebnisse 6.3 (3), (5), (7) u. (8)
Referenzmessung Tabelle 6-1
- Schnellabschaltsystem 5.2; 5.2.1 (2); 5.2.2 (1); 5.2.3 (1);
5.2.4; 5.3.1 (1)
Schnellabschaltung 3.2 (3)d; 4.4 (1)e; 4.4 (4); 5.2.1 (1) u.
(2)b; 5.3.1 (1)
Schutzbegrenzungen 4.4 (4)
Schutzziele Grundlagen (2)
Spurfehler 4.2.2 (4) Hinweis; 4.6 (2) u. (3)
- eines Überwachungssignals 2 (8)
Steuerstab-Fahrbegrenzungen 4.2.2 (5)a; 4.4 (1)c
Störfall 3.1 (2)b u. d; 5.2.1 (1)
Superzellen A 4 (3) u. Hinweis
Systeme, angrenzende Grundlagen (9= u. (10); 1 (1) u. (2);
3.1 (2)d u. Hinweis zu d); 3.2 (1) u. (2)
- Überprüfung der Gültigkeit und Genauigkeit 6.3
Überprüfung der Leistungsdichteverteilung 4.2.1
Überwachung der Leistungsdichte 4.2.2
Überwachungssignal 4.2.2 (4) Hinweis
Überwachungszone 4.2.2 (2) u. (4) Hinweis; 4.5 (2)
- Validierung 2 (9); 6.1 (1); 6.3 (2) u. (3); 6.3 (6) Hinweis; 6.3
(9); 6.4 a; Tabelle 6.1; A 4 (8)
Vereinfachungen 6.1 (3)
Vergiftungssysteme 5.2.2 (1); 5.3
Vielgruppenkonstante A 3
- Weniggruppenkonstante A 4; A 5(1) u. (4)
Wirksamkeit des Schnellabschaltsystems 2 (10)
Wirksamkeit eines Vergiftungssystems 2 (11); 5.3.2 (2)
- Zustandsbegrenzungen 4.4 (2)