

DIN 25712

ICS 27.120.30

Ersatz für
DIN 25712:2007-07**Kritikalitätssicherheit unter Anrechnung des Brennstoffabbrands bei
Transport und Lagerung bestrahlter
Leichtwasserreaktor-Brennelemente in Behältern**

Criticality safety taking into account the burnup of fuel for transport and storage of irradiated light water reactor fuel assemblies in casks

Sûreté-criticité compte tenu du taux de combustion des combustibles lors du transport et du stockage d'éléments combustibles irradiés en châteaux de transport en provenance de réacteurs à eau légère

Gesamtumfang 53 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Inhalt

Seite

Vorwort	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe und Symbole	7
3.1 Begriffe	7
3.2 Symbole	7
4 Kritikalitätssicherheit	9
4.1 Grundsätze	9
4.2 Auslegungsannahmen und Festlegungen	9
4.2.1 Grundlegende Anforderungen	9
4.2.2 Anforderungen an die Kritikalitätsanalyse	11
4.3 Parameter, die die Kritikalitätssicherheit beeinflussen	12
4.3.1 Allgemeines	12
4.3.2 Kenngrößen der Brennstäbe und Brennelemente	12
4.3.3 Kenngrößen der Behälter und Behältereinbauten	13
4.3.4 Sonstige Einflussgrößen	14
4.4 Sicherstellung ausreichender Unterkritikalität	14
4.4.1 Grundsätze	14
4.4.2 Ermittlung der Unsicherheiten	14
4.4.3 Berücksichtigung der Inhomogenität des Abbrands	15
5 Kontrollen der Beladung der Behälter	16
5.1 Allgemeine Anforderungen	16
5.2 Ermittlung des Abbrands und Erstellung von Beladeplänen	17
5.2.1 Allgemeines	17
5.2.2 Vergleich des Abbrands mit dem durch eine Beladungskurve geforderten Mindestabbrand	17
5.2.3 Bestimmung eines in der Kritikalitätsanalyse höchstzulässigen Abbrandwerts	18
5.3 Kontrollmessungen bei der Beladung der Behälter	18
5.3.1 Allgemeines	18
5.3.2 Entscheidungsmessung	18
5.3.3 Konsistenzprüfung	19
6 Dokumentation	19
Anhang A (informativ) Erläuterungen zu Bestimmung und Anwendung von Beladungskurven (Erläuterungen zu 3.1.2, 4.4.3 und 5.2)	20
A.1 Grundlage und Bedeutung einer Beladungskurve	20
A.1.1 Reaktivitätsäquivalenzbedingung und Beladungskurve	20
A.1.2 Kritikalitätssicherheitsakzeptanzkriterium und Beladungskurve	20
A.2 Grundlage der Bestimmung einer Beladungskurve	21
A.2.1 Allgemeines	21
A.2.2 Prinzipielle Vorgehensweise zur Bestimmung der Beladungskurve	22
A.2.3 Einseitige 95 %/95 %-Toleranzgrenze	23
A.2.4 „Methode der kleinsten Quadrate“ mit Anwendung eines linearen Modells und Bestimmung von 95 %/95 %-Toleranzgrenze	24
A.3 Berücksichtigung axialer Abbrandprofile	25
A.3.1 Einführung	25
A.3.2 Beschreibung des Verfahrens des „äquivalenten uniformen Abbrandes“ zur Berücksichtigung des Endeffekts in der Beladungskurve	26
A.3.3 Beschreibung des Verfahrens der Generierung eines abdeckenden axialen Abbrandprofils als Funktion des mittleren Abbrandes zur Berücksichtigung des Endeffekts in der Beladungskurve	33

A.3.4 Modellierung axialer Abbrandprofile 45

A.3.5 Berücksichtigung horizontaler Abbrandprofile.....46

A.3.6 Andere Verfahren zur Bestimmung einer Beladungskurve 46

A.4 Berücksichtigung von Unsicherheiten der Bestimmung des mittleren Abbrands, die
von einer anzuwendenden Beladungskurve nicht abgedeckt werden 47

Literaturhinweise 51

Vorwort

Diese Norm wurde vom Fachbereich Kerntechnik, Arbeitsausschuss NA 062-07-45 AA „Kritikalitätssicherheit“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP) erarbeitet und erstellt.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN [und/oder die DKE] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Änderungen

Gegenüber DIN 25712:2007-07 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Verweisungen wurden aktualisiert;
- b) 5.1 wurde redaktionell überarbeitet;
- c) 5.2 wurde redaktionell überarbeitet und konkretisiert;
- d) 5.3 wurde redaktionell und strukturell überarbeitet;
- e) Anhänge A.3 bis A.3.4 wurden aktualisiert;
- f) Bilder wurden überarbeitet.

Frühere Ausgaben

DIN 25712: 2007-07

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für den Nachweis der Kritikalitätssicherheit bei Transport und Lagerung von bestrahlten Brennelementen oder sonstigen Brennstabanordnungen (z. B. Brennstabbüchsen oder -köcher) aus Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren in Behältern sowie für die damit verbundenen Handhabungsvorgänge.

Die Anrechnung des Abbrands der Brennelemente und -stäbe erfordert die Kenntnis des Reaktivitätszustandes des bestrahlten Kernbrennstoffs in den Behältern. Dazu ist das Nuklidinventar des bestrahlten Kernbrennstoffs mit Hilfe von nuklearen Berechnungssystemen zu ermitteln. Dieses Nuklidinventar gehört neben den geometrischen und sonstigen Merkmalen der Brennelemente und -stäbe und der Behälter einschließlich ihrer Einbauten zu den Eingangsdaten, die zum Nachweis der Kritikalitätssicherheit mit Hilfe entsprechend geeigneter Berechnungssysteme erforderlich sind. Es werden daher Festlegungen zur Durchführung der Berechnung des Nuklidinventars und der Kritikalitätsanalyse von Behältern getroffen, die den genannten Zwecken dienen.

Die Berücksichtigung des Abbrands von Brennelementen oder -stäben erfordert die Kenntnis ihres Abbrands und seiner Kontrolle bei der Beladung der Behälter für den Transport- oder zur Lagerung.

Die Norm enthält Anforderungen, die unter Berücksichtigung des Brennstoffabbrands die Einhaltung der Kritikalitätssicherheit beim Transport und bei der Lagerung von bestrahlten Brennelementen und Brennstäben aus Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren in Behältern und bei den damit verbundenen Be- und Entladevorgängen sicherstellen.

Die vorliegende Norm enthält außerdem Festlegungen zur Ermittlung des Abbrands und zur Durchführung von Kontrollen der Einhaltung des erforderlichen Abbrands bei der Beladung der Behälter.

Es werden sowohl die bei der Kritikalitätsanalyse des Transports von bestrahlten Brennelementen und -stäben zu erfüllenden Anforderungen in den IAEA Safety Standards Series No. SSR-6 und den internationalen Vorschriften für die Beförderung gefährlicher Güter ADR, RID, IMDG-Code, ICAO Technical Instructions und ADN als auch die in den „Sicherheitstechnischen Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente in Behältern“ berücksichtigt.

Einführende Erläuterungen zur Anrechnung des Abbrands bestrahlten Kernbrennstoffs sind in DIN 25471:2009-05, Anhänge A und C gegeben.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 1319-4, *Grundlagen der Messtechnik — Teil 4: Auswertung von Messungen; Messunsicherheit*

DIN 13303-1, *Stochastik — Wahrscheinlichkeitstheorie, Gemeinsame Grundbegriffe der mathematischen und der beschreibenden Statistik — Begriffe und Zeichen*

DIN 13303-2, *Stochastik — Mathematische Statistik — Begriffe und Zeichen*

DIN 25401 (alle Teile), *Begriffe der Kerntechnik*

DIN 25463-1, *Berechnung der Zerfallsleistung der Kernbrennstoffe von Leichtwasserreaktoren — Teil 1: Uranoxid-Kernbrennstoff für Druckwasserreaktoren*

DIN 25471:2009-05, *Kritikalitätssicherheit unter Anrechnung des Brennelementabbrandes bei der Lagerung und Handhabung von Brennelementen in Brennelementlagerbecken von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren*

DIN 25478, *Einsatz von Berechnungssystemen beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit*

DIN 55350-21, *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik — Begriffe der Statistik — Zufallsgrößen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen*

DIN 55350-23, *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik — Begriffe der Statistik — Beschreibende Statistik*

DIN 55350-24, *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik — Begriffe der Statistik — Schließende Statistik*

DIN ISO 11929, *Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung Grundlagen und Anwendungen*

KTA 1401:2013-11, *Allgemeine Anforderungen an die Qualitätssicherung*¹⁾

KTA 3101.2:1987-12, *Auslegung der Reaktorkerne von Druck- und Siedewasserreaktoren — Teil 2: Neutronenphysikalische Anforderungen an Auslegung und Betrieb des Reaktorkerns und der angrenzenden Systeme*¹⁾

KTA 3602, *Lagerung und Handhabung von Brennelementen und zugehörigen Einrichtungen in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren*¹⁾

IAEA SSR-6, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, Internationale Atomenergie-Organisation, Wien²⁾

ADR, *Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße*, Europäische Kommission für Wirtschaft, Genf¹⁾

ADN, *Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf Binnenwasserstraßen*, Europäische Kommission für Wirtschaft, Genf¹⁾

ICAO Technical Instructions, *Technische Instruktionen für den sicheren Transport gefährlicher Güter per Luft*, Internationale Organisation für die zivile Luftfahrt, Montreal³⁾

IMDG-Code, *Internationaler Code für die Beförderung von gefährlichen Gütern mit Seeschiffen*, Internationale Seeschiffahrtsorganisation, London¹⁾

RID, *Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter*, Zwischenstaatliche Organisation für den internationalen Eisenbahnverkehr, Bern¹⁾

ESK, *Leitlinie für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern*, Empfehlung der Entsorgungskommission, revidierte Fassung vom 10.06.2013⁴⁾

1) Zu beziehen durch: Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin (Hausanschrift: Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin).

2) Zu beziehen durch: International Atomic Energy Agency, Vienna International Centre, PO Box 100, A-1400 Vienna, Austria

3) Zu beziehen durch: Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Postfach 20 03 63, 53133 Bonn.

4) Zu beziehen durch: Bundesanzeiger vom 03.01.2003 (Nr. 1, S. 11).

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die Begriffe nach DIN 13303-1, DIN 13303-2, den Normen der Reihe DIN 25401, DIN 25463-1, DIN 25471, DIN 25478, DIN ISO 11929, DIN 55350-21, DIN 55350-23, DIN 55350-24 sowie KTA 1401, KTA 3101.2 und KTA 3602 und die folgenden Begriffe.

3.1.1

Beladeplan

Festlegung der jeweiligen Position der Brennelemente oder sonstiger Brennstabanordnungen in dem zu beladenden Behälter

3.1.2

Beladungskurve

Darstellung des Mindestabbrands als Funktion des Anfangsinventars an Spaltstoffen im Brennelement oder einer sonstigen Brennstabanordnung

3.1.3

Bereitstellungsposition

Brennelementlagerposition im Nasslager eines Kernkraftwerkes, in der ein Brennelement oder eine sonstige Brennstabanordnung zur Beladung eines Behälters bereitgestellt wird

3.1.4

Mindestabbrand

derjenige Abbrand, den ein Brennelement oder eine sonstige Brennstabanordnung mindestens aufweisen muss, damit in einer gegebenen Einrichtung zur Handhabung, zum Transport oder zur Lagerung von Brennelementen oder Brennstabanordnungen die Kritikalitätssicherheit sichergestellt ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Mindestabbrand hängt ab vom Anfangsinventar an Spaltstoffen des Brennelements oder der Brennstabanordnung (siehe 3.1.2). Er hängt außerdem ab von den konstruktiven Merkmalen des Brennelements oder der Brennstabanordnung und der jeweiligen Einrichtung zur Handhabung, zum Transport oder zur Lagerung von Brennelementen oder Brennstabanordnungen.

3.1.5

Schrittfolgeplan

Festlegung der Reihenfolge der Umsetzungen von Brennelementen oder sonstigen Brennstabanordnungen zwischen den dafür vorgesehenen Positionen

3.2 Symbole

Tabelle 1 — Symbole

Symbol	Bedeutung
A	mittlerer (spezifischer) Abbrand, im Folgenden mittlerer Abbrand genannt
A_L	aus der Analyse der Leistungsgeschichte berechneter Wert des mittleren Abbrands eines Brennelements oder eines Brennstabs
A_M	durch Messung ermittelter Wert des mittleren Abbrands eines Brennelements oder eines Brennstabs
$A_{\min}$	Mindestabbrand (siehe 3.1.4)
α	Signifikanzniveau
$\bar{e}$	Anfangsinventar an Spaltstoffen
ΔA	Differenz zwischen zwei Abbrandwerten

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Bedeutung
Δk_A	aus der Anrechnung des Abbrands herrührende Unsicherheit oder aufgrund dieser Anrechnung erforderliche Korrektur des für eine Kernbrennstoffanordnung berechneten Neutronenmultiplikationsfaktors
Δk_B	systematische Abweichung des zur Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors eingesetzten Berechnungssystems, wie sie sich aus Vergleichen mit adäquat gewählten Benchmark-Experimenten ergibt Δk_B enthält alle Unsicherheiten, die herrühren aus — der Unsicherheit der Rechenergebnisse der anhand der Benchmark-Experimente ausgeführten Validierungsrechnungen und aus — den Unsicherheiten der Parameter, die die experimentellen Randbedingungen und Resultate beschreiben. Erforderlichenfalls ist Δk_B um einen Beitrag zu erhöhen, der die mit der Extrapolation von den experimentellen Randbedingungen auf die Randbedingungen der betrachteten Kernbrennstoffanordnung verbundene Unsicherheit berücksichtigt (siehe DIN 25478).
Δk_N	Unsicherheit des berechneten Neutronenmultiplikationsfaktors, die sich aus den mit der Berechnung des Nuklidinventars bestrahlten Kernbrennstoffs verbundenen Unsicherheiten ergibt. Δk_N ergibt sich aus der Validierung des zur Berechnung des Nuklidinventars eingesetzten Berechnungssystems (siehe KTA 3101.2:1987-12, 6.3).
Δk_R	statistische Unsicherheit oder numerischer Fehler des berechneten Neutronenmultiplikationsfaktors.
Δk_S	festgelegter Sicherheitsabstand, der für einen berechneten Neutronenmultiplikationsfaktor unter Berücksichtigung der mit seiner Berechnung verbundenen Unsicherheiten vom Zustand der Kritikalität mindestens eingehalten werden muss ($\Delta k_S = 0,05$, siehe 4.1).
Δk_T	Unsicherheit, die von Maß- und Fertigungstoleranzen sowie von Toleranzen in der Materialzusammensetzung der betrachteten Kernbrennstoffanordnung herrührt.
Δk_U	Summe aus Δk_A , Δk_B , Δk_N , Δk_R und Δk_T
$k(\vec{x})$	Neutronenmultiplikationsfaktor einer durch einen Parametersatz $\vec{x}$ definierten Kernbrennstoffanordnung
$s(A_L)$	Unsicherheit von A_L
$s(A_M)$	Unsicherheit von A_M
t_{AZ}	Abklingzeit
$\vec{x}$	Parametersatz $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, der die zum berechneten Neutronenmultiplikationsfaktor $k(\vec{x})$ gehörende Kernbrennstoffanordnung charakterisiert. $\vec{x}$ umfasst die geometrischen Daten, die Kernbrennstoffdaten (z. B. Anfangsinventar an Spaltstoffen, von der Bestrahlungsgeschichte abhängige Nuklidinventar, Abbrand) und die sonstigen Materialdaten der Kernbrennstoffanordnung. Je nach ihrer Bedeutung können die Parameter x_i von der Abklingzeit t_{AZ} abhängig sein (siehe 4.3.2 e)).
$1 - \alpha$	Konfidenzniveau
$1 - \gamma$	Mindestanteil an der Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zufallsvariablen

4 Kritikalitätssicherheit

4.1 Grundsätze

In den Behältern für Brennelemente oder sonstige Brennstabanordnungen ist unter Berücksichtigung der Behältereinbauten und gegebenenfalls von Brennelement-Einsätzen die Anordnung der Brennelemente und sonstigen Brennstabanordnungen so zu wählen, dass der unter den Annahmen in 4.2 berechnete Neutronenmultiplikationsfaktor $k(\bar{x})$ der Transport- oder Lageranordnung eine obere Grenze $(1 - \Delta k_S)$ nicht überschreitet. Dabei sind alle Unsicherheiten nach 4.4.2 in das für $k(\bar{x})$ erhaltene Ergebnis einzubeziehen.

Für den Sicherheitsabstand Δk_S ist der Wert 0,05 zu wählen.

ANMERKUNG Werden bei der Berechnung von $k(\bar{x})$ keine Mindestabbrände für die Brennelemente oder Brennstäbe zugrunde gelegt, so kann in der Analyse von Störfällen für Δk_S auch ein kleinerer Wert als 0,05 angewendet werden (siehe z. B. [43]).

Beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit sind

- alle Kenngrößen der Brennelemente oder sonstiger Brennstabanordnungen (siehe 4.3.2) anzugeben,
- alle Kenngrößen der Behälter und Behältereinbauten (siehe 4.3.3) anzugeben,
- alle sonstigen Einflussgrößen (siehe 4.3.4) anzugeben, von denen die Kritikalitätssicherheit abhängt und deren Einhaltung bei der Beladung und dem Betrieb der Behälter sicherzustellen ist.

4.2 Auslegungsannahmen und Festlegungen

4.2.1 Grundlegende Anforderungen

4.2.1.1 Allgemeines

Für Transportbehälter ist der Nachweis der Kritikalitätssicherheit für die Normal- und Prüfbedingungen nach den für die zutreffenden Verkehrsträger gültigen Vorschriften ADR, RID, IMDG-Code, ICAO Technical Instructions oder ADN, zu erbringen.

Für Lagerbehälter sind die Kritikalitätssicherheitsanforderungen der Sicherheitstechnischen Leitlinien (ESK) für trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente in Behältern zu erfüllen. Dabei ist eine fehlerhafte Beladung der Behälter nach 5.1 auszuschließen und es sind Kontrollmessungen bei der Beladung der Behälter nach 5.3 durchzuführen.

Für die Handhabung, den Transport und die Lagerung von Brennelementen sind zusätzlich die Anforderungen nach 4.2.1.2, für die Handhabung, den Transport und die Lagerung von sonstigen Brennstabanordnungen die Anforderungen nach 4.2.1.3 einzuhalten. Bei Beladung eines Behälters mit Brennelementen und sonstigen Brennstabanordnungen ist 4.2.1.4 anzuwenden.

4.2.1.2 Handhabung, Transport und Lagerung von Brennelementen

Für den Nachweis der Kritikalitätssicherheit dürfen die Abbrände der zu transportierenden oder einzulagernden Brennelemente angerechnet werden. Dabei sind folgende alternative Vorgehensweisen zugelassen:

- a) für alle Brennelementpositionen eines Behälters wird eine einzige Beladungskurve nach 4.2.2 bestimmt;
- b) die Brennelementpositionen eines Behälters werden in Zonen eingeteilt. Für jede Zone wird eine eigene Beladungskurve nach 4.2.2 bestimmt;
- c) für die Brennelementpositionen werden die tatsächlichen individuellen Abbrände der zu transportierenden oder einzulagernden Brennelemente zu Grunde gelegt.

Wird nach 4.2.1.2 b) verfahren, so ist zu beachten, dass die Beladungskurven wechselseitig abhängig sind. Eine Änderung der Beladungskurve einer Zone erfordert die Neubestimmung der Beladungskurven aller anderen Zonen. Eine Änderung der Zoneneinteilung der Brennelementpositionen erfordert die Neubestimmung der Beladungskurven aller Zonen.

Die Vorgehensweise nach 4.2.1.2 c) erfordert eine Kritikalitätsanalyse nach 4.2.2 für die vorgesehene tatsächliche Behälterbeladung. Dabei sind höchstens die unteren 99 %/99 %-Toleranzgrenzen der individuellen Abbrände der Brennelemente zu Grunde zu legen, wie sie sich aus den Unsicherheiten ergeben, die mit dem zur Bestimmung dieser Abbrände eingesetzten Verfahren verbunden sind (siehe 5.2.3).

Bei reparierten Brennelementen, bei denen bei einer Reparatur Brennstäbe entnommen oder ausgetauscht wurden, sind folgende Einflüsse auf die Reaktivität einer Brennelementanordnung zu beachten:

- die Reparatur kann zu einer Änderung des mittleren Abbrands eines Brennelements führen;
- ein repariertes Brennelement, das nach seiner Reparatur nochmals bestrahlt wird, kann ein im Vergleich zu einem nicht reparierten Brennelement gleichen Typs geändertes Abbrandverhalten besitzen;
- die Reaktivität eines gefluteten Brennelements kann mit zunehmender Anzahl der aus diesem Brennelement entfernten Brennstäbe zunächst zunehmen.

4.2.1.3 Handhabung, Transport und Lagerung von sonstigen Brennstabanordnungen

Für den Nachweis der Kritikalitätssicherheit von sonstigen Brennstabanordnungen darf der Abbrand der Brennstäbe angerechnet werden. Dieser Nachweis ist nach 4.2.2 zu führen.

Bei fester Geometrie der Brennstabanordnungen dürfen die Abbrandwerte der Brennstäbe individuell berücksichtigt werden. In diesem Fall darf auch nach 4.2.1.2 vorgegangen werden. Anderenfalls darf von folgenden Auslegungsannahmen und Festlegungen nur mit Begründung abgewichen werden:

- a) für alle Brennstäbe ist nur die sich unter Berücksichtigung der Unsicherheiten des zur Abbrandbestimmung eingesetzten Verfahrens (siehe 5.2.3) ergebende untere 99 %/99 %-Toleranzgrenze des kleinsten mittleren Brennstababbrands, der in den zu betrachtenden Brennstabanordnungen vorkommt, zu Grunde zu legen. Der angerechnete Abbrandwert darf jedoch höchstens so groß sein, dass die Annahme realistischer axial inhomogener Verteilungen dieses Abbrands nicht zu einer höheren Reaktivität der Brennstabanordnungen führt als die Annahme einer axial homogenen Verteilung. Bei der Bestimmung des kleinsten mittleren Brennstababbrands, der in den Brennstabanordnungen vorkommt, ist zu beachten, dass die Verteilung des Abbrands in den Brennelementen, denen die Brennstäbe entnommen sind, horizontal inhomogen sein kann;

ANMERKUNG Zum Einfluss axialer Abbrandprofile auf die Reaktivität einer Brennstabanordnung siehe z. B. [1], [2] und Anhang A.3 dieser Norm.

- b) ist das Anfangsinventar an Spaltstoffen in den Brennstäben axial gestaffelt, so ist das unter den jeweiligen Randbedingungen reaktivste Anfangsinventar an Spaltstoffen für die gesamte aktive Länge der Brennstäbe anzunehmen;
- c) weisen die Brennstäbe der zu betrachtenden Brennstabanordnungen unterschiedliche Anfangsinventare an Spaltstoffen auf, so ist das unter den jeweiligen Randbedingungen reaktivste Anfangsinventar an Spaltstoffen, das in der Anordnung vorkommt, für alle Brennstäbe der Anordnung anzunehmen;
- d) abbrennbare Neutronengifte, die Bestandteil des Anfangsinventars des unbestrahlten Kernbrennstoffs sind, dürfen nicht angerechnet werden;
- e) bei Flutung der zu betrachtenden Brennstabanordnungen ist für diese Anordnungen diejenige Moderation zu Grunde zu legen, die zum höchsten Neutronenmultiplikationsfaktor führt.

4.2.1.4 Handhabung, Transport und Lagerung von Brennelementen zusammen mit sonstigen Brennstabanordnungen

Für den Nachweis der Kritikalitätssicherheit einer Transport- oder Lageranordnung von Brennelementen zusammen mit Brennstabanordnungen in einem Behälter sind Brennelemente nach 4.2.1.2 und die Brennstabanordnungen nach 4.2.1.3 zu behandeln. Dabei ist zu beachten, dass die Präsenz der Brennstabanordnungen die Mindestabbrände beeinflusst, die die Brennelemente aufweisen müssen.

4.2.2 Anforderungen an die Kritikalitätsanalyse

4.2.2.1 Berechnung des Nuklidinventars

Für die Berechnung des Nuklidinventars bestrahlten Kernbrennstoffs gelten folgende Anforderungen und Festlegungen:

- a) Die Berechnung des Nuklidinventars muss unter Berücksichtigung anlagenbezogener Reaktorbetriebsbedingungen erfolgen. Die bei der Berechnung des Nuklidinventars verwendeten betrieblichen Kenngrößen und Randbedingungen sind in der Dokumentation über den Kritikalitätssicherheitsnachweis auszuweisen.

ANMERKUNG Wesentliche betriebliche Kenngrößen und Randbedingungen, die die Reaktivität des bestrahlten Brennstoffs beeinflussen, sind (siehe DIN 25471:2009-05, Anhang C, sowie [3]):

- spezifische Leistung und Leistungsgeschichte;
- Positionierung des jeweiligen Brennelements im Kern in seinen einzelnen Standzeiten;
- Temperatur des Kernbrennstoffs;
- Temperatur, Dichte und Dampfblasengehalt des Moderators;
- Präsenz löslichen Bors im Moderator (in DWR-Reaktoren);
- Präsenz abbrennbarer Neutronenabsorber (z. B. Gadolinium, Erbium, Bor), die fester Bestandteil des unbestrahlten Kernbrennstoffs sind;
- Präsenz fester Neutronenabsorber im Brennstabgitter oder zwischen den Brennelementen (z. B. Steuerstäbe, Neutronenabsorberstäbe wie z. B. Borglasstäbe).

- b) Bei der Bestimmung des Nuklidinventars sind die in 4.3.2 aufgeführten Brennstab- und Brennelementenkenngrößen zu berücksichtigen.
- c) Die Reaktivität der Gesamtanordnung ist als Funktion der Zeit nach Bestrahlungsende zu untersuchen. Bei der Bestimmung des Nuklidinventars darf die Abklingzeit der Brennelemente oder Brennstäbe vor der Einladung in den Transport- oder Lagerbehälter angerechnet werden. Es gilt:
- 1) Bei der Lagerung darf von der tatsächlichen Abklingzeit nur so viel angerechnet werden, dass der Neutronenmultiplikationsfaktor $k(\bar{x})$ der Gesamtanordnung der Brennelemente oder sonstigen Brennstabanordnungen im Behälter zu irgendeinem späteren Zeitpunkt nicht größer wird, als es für die angerechnete Abklingzeit ist.
 - 2) Reaktivitätsanstiege, die durch die Untersuchung der Reaktivität als Funktion der Abklingzeit aufgezeigt werden, können beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit durch eine in Bezug auf die Reaktivität nachweislich abdeckende Korrektur des verwendeten Nuklidsatzes kompensiert werden.
- d) Die zur Berechnung des Nuklidinventars eingesetzten nuklearen Berechnungssysteme müssen die Anforderungen nach KTA 3101.2:1987-12, Abschnitt 6, erfüllen.

4.2.2.2 Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors einer Transport- oder Lageranordnung von Brennelementen oder sonstigen Brennstabanordnungen

Für die Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors $k(\bar{x})$ einer Transport- oder Lageranordnung von Brennelementen oder sonstigen Brennstabanordnungen gelten folgende Anforderungen und Festlegungen:

- a) sämtliche im bestrahlten Kernbrennstoff vorhandenen Nuklide, die positive Reaktivitätsbeiträge aufweisen, sind im Nuklidsatz, der zur Bestimmung von $k(\bar{x})$ verwendet wird, zu berücksichtigen;
- b) Nuklide mit negativen Reaktivitätsbeiträgen, deren Beiträge zur Größe Δk_N (siehe Tabelle 1) bestimmt werden können, dürfen dann berücksichtigt werden, wenn diese Beiträge verifizierbar sind.
- c) negative Reaktivitätsbeiträge von Radionukliden, deren Halbwertszeiten nicht signifikant größer sind als die Abklingzeit der Brennelemente oder Brennstäbe vor der Einladung in den Transport- oder Lagerbehälter, dürfen nur dann angerechnet werden, wenn dies entweder durch die Absorptionseigenschaften der Zerfallsprodukte oder durch die Resultate der nach 4.2.2.1 c) auszuführenden Untersuchung gerechtfertigt ist;
- d) negative Reaktivitätsbeiträge von Nukliden solcher Elemente oder deren chemischer Verbindungen, die bei bestimmungsgemäßen Betrieb oder unter Störfallbedingungen flüchtig werden können, dürfen nicht angerechnet werden;
- e) abbrennbare Neutronengifte, die fester Bestandteil des unbestrahlten Kernbrennstoffs in einem Brennstab oder Brennelement sind, dürfen berücksichtigt werden, soweit nicht durch 4.2.1.3 anders geregelt. Dabei ist ein möglicher Anstieg der Reaktivität mit dem Abbrand des Kernbrennstoffs zu beachten;
- f) der reaktivste Zustand, der entsprechend der Konstruktion der Behälter und Behältereinbauten sowie der vorgesehenen Transport- und Lageranordnung erreicht werden kann, ist zu ermitteln. Dabei sind die nach 4.2.1 zu untersuchenden Bedingungen sowie die vorgesehene Behälterbeladung mit Brennelementen oder sonstigen Brennstabanordnungen zu berücksichtigen;
- g) die zur Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors eingesetzten Berechnungssysteme müssen die Anforderungen nach DIN 25478 erfüllen.

4.3 Parameter, die die Kritikalitätssicherheit beeinflussen

4.3.1 Allgemeines

Der Einfluss der zu betrachtenden Betriebsbedingungen, Prüfbedingungen und Störfallbedingungen auf die nachfolgend genannten Kenngrößen und sonstigen Einflussgrößen ist zu berücksichtigen.

4.3.2 Kenngrößen der Brennstäbe und Brennelemente

Bei der Bestimmung des Nuklidinventars bestrahlter Brennelemente und ihrer Brennstäbe sowie beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit ist der Einfluss folgender Brennstab- und Brennelementkenngrößen und ihrer Toleranzen entsprechend den in 4.2.1.2 und 4.2.1.3 getroffenen Festlegungen zu berücksichtigen (siehe auch Erläuterungen in DIN 25471:2009-05, Anhang C):

- a) Brennstab-Daten und Brennelementstruktur, z. B.:
 - Pelletdurchmesser und -dicke;
 - Brennstabdurchmesser;
 - Hüllrohrmaterial und -dicke;
 - Anzahl und Abstand der Brennstäbe;

- Länge der aktiven Zone;
 - Positionierung und Abmessungen teillanger Brennstäbe;
 - Positionierungen, Abmessungen und Materialien von Führungs- und Instrumentierungsrohren, Wasserstäben, -kanälen oder -kästen;
 - Positionierungen, Abmessungen und Materialien von Abstandshaltern.
- b) Änderungen an den Brennelementen (z. B. durch Reparatur);
- c) Spaltstoffinventar:
- maximal mögliches Anfangsinventar an Spaltstoffen und deren Verteilung in den Brennstäben und im Brennelement;
 - reaktivste Zusammensetzung an Spaltstoffen unter Berücksichtigung von Abbrand und Abklingzeit.
- d) Abbrennbare Neutronengifte, soweit sie fester Bestandteil des unbestrahlten Brennstoffs sind:
- Anfangsinventar und Verteilung dieser Gifte in Brennstäben und im Brennelement.
- e) Abbrand und Abklingzeit (siehe auch 4.4.3)
- Spaltstoffinventar und -verteilung in Brennstäben und im Brennelement in Abhängigkeit vom Abbrand,
 - Inventar und Verteilung thermisch nicht spaltbarer Aktinide in Abhängigkeit vom Abbrand,
 - Spaltproduktinventar und -verteilung in Brennstäben und im Brennelement in Abhängigkeit vom Abbrand,
 - Abnahme der Massenanteile abbrennbarer Neutronengifte in Abhängigkeit vom Abbrand,
 - zeitliche Änderung der Aktiniden- und Spaltproduktzusammensetzung nach Bestrahlungsende.

4.3.3 Kenngrößen der Behälter und Behältereinbauten

Beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit ist der Einfluss folgender Kenngrößen entsprechend den in 4.2.1.2 und 4.2.1.3 getroffenen Festlegungen zu berücksichtigen:

- a) Materialzusammensetzungen und Toleranzen von Behältern und Behältereinbauten bezüglich ihrer Absorber-, Moderator- und Reflektorwirkung;
- b) Abmessungen und Toleranzen der Behälter und Behältereinbauten sowie deren Anordnungen;
- c) Exzentrische Positionierungen der Brennelemente oder sonstigen Brennstabanordnungen in ihren Positionen und Variationen der räumlichen Abstände der Brennelemente oder sonstigen Brennstabanordnungen zueinander;
- d) Einfluss der zu betrachtenden Betriebsbedingungen, Prüfbedingungen und Störfallbedingungen auf die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Materialien.

4.3.4 Sonstige Einflussgrößen

Sonstige Einflussgrößen sind:

- a) Abmessungen und Materialzusammensetzungen einschließlich Toleranzen berücksichtigter Brennelementeinsätze;
- b) Neutronenwechselwirkungen zwischen benachbarten Behältern;
- c) Reflektorwirkung der die Behälteranordnung umgebenden Strukturen;
- d) Orientierung der Brennelemente oder sonstigen Brennstabanordnungen innerhalb des Behälters bei Vorhandensein inhomogener Anreicherungs- oder Abbrandverteilungen.

4.4 Sicherstellung ausreichender Unterkritikalität

4.4.1 Grundsätze

Damit sichergestellt ist, dass der für eine durch einen Parametersatz $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ beschriebene Kernbrennstoffanordnung berechnete Neutronenmultiplikationsfaktor $k(\vec{x})$ nicht den nach 4.1 höchstzulässigen Wert $(1 - \Delta k_S)$ überschreitet, muss $k(\vec{x})$ folgende Ungleichung erfüllen:

$$k(\vec{x}) \leq (1 - \Delta k_S) - \Delta k_U \quad (1)$$

Δk_U ist die Summe der Unsicherheiten, die mit den eingesetzten Berechnungssystemen und der betrachteten Kernbrennstoffanordnung verbunden sind,

$$\Delta k_U = \Delta k_R + \Delta k_N + \Delta k_B + \Delta k_T + \Delta k_A \quad (2)$$

Es ist zu beachten, dass Δk_U im Allgemeinen vom Parametersatz $\vec{x}$ abhängt, weil Δk_R , Δk_N , Δk_B , Δk_T und Δk_A von $\vec{x}$ abhängen können.

4.4.2 Ermittlung der Unsicherheiten

Jede Unsicherheit, die nach Gleichung (2) zum Term Δk_U der Ungleichung (1) beiträgt, ist — sofern sie eine Zufallsgröße ist — als einseitige 95 %/95 %-Toleranzgrenze auszudrücken (siehe DIN 25471:2009-05, Anhang B und Beiblatt 1 zu DIN 25478). Zusätzlich gilt:

- a) Δk_N ist als Beitrag zum Term Δk_U der Ungleichung (1) auszuweisen, sofern Δk_N nicht durch eine in Bezug auf die Reaktivität der betrachteten Kernbrennstoffanordnung nachweislich abdeckende

— Korrektur der berechneten Nuklidkonzentrationen oder

— Beschränkung des beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit berücksichtigten Nuklidsatzes

kompensiert wird. Es ist zu beachten, dass Δk_N von der Abklingzeit t_{AZ} abhängen kann.

- b) Beiträge von Maß- und Fertigungstoleranzen der Brennstäbe und Brennelemente sowie der betrachteten Behälter und ihrer Einbauten zum Term Δk_T der Gleichung (2) sind auszuweisen, sofern sie nicht durch ein in Bezug auf die Reaktivität der betrachteten Kernbrennstoffanordnung nachweislich abdeckendes Rechenmodell kompensiert werden. Es ist zu beachten, dass der Einfluss von Fertigungstoleranzen nur dann mit statistischen Verfahren analysiert werden kann, wenn die Verteilung der Abweichungen der Istwerte vom Nominalwert hinreichend bekannt ist oder abdeckend beschrieben werden kann.

- c) Beiträge zum Term Δk_A der Gleichung (2), die auf den Einfluss weiterer Parameter zurückzuführen sind, wie z. B. auf den Einfluss axialer Abbrandverteilungen auf die Reaktivität der betrachteten Kernbrennstoffanordnung, sind auszuweisen, sofern sie nicht
- in einem zum Neutronenmultiplikationsfaktor dieser Anordnung korrelierten Kritikalitätssicherheitsparameter berücksichtigt werden (siehe z. B. 4.4.3) oder
 - durch nachweislich in Bezug auf die Reaktivität abdeckende Modellannahmen kompensiert werden (siehe z. B. 4.2.2.1 c) 2)).

Es ist zu beachten, dass Δk_A von der Abklingzeit t_{AZ} abhängen kann.

Sämtliche Unsicherheiten, die zu jeweils einem Term der Gleichung (2) beitragen, dürfen statistisch addiert werden, wenn sie voneinander unabhängig sind. Sind die Unsicherheiten korreliert, so ist ihre Korrelation zu berücksichtigen, sofern diese zu einem höheren Wert des jeweiligen Terms der Gleichung (2) führt (siehe [4]).

4.4.3 Berücksichtigung der Inhomogenität des Abbrands

Der Einfluss horizontal inhomogener Abbrandverteilungen auf die Reaktivität der Gesamtanordnung der Brennelemente oder sonstigen Brennstabanordnungen im Behälter ist unter Berücksichtigung nachweislich abdeckender Orientierungen der Brennelemente oder sonstigen Brennstabanordnungen benachbarter Positionen zu ermitteln. Dabei ist zu beachten, dass der Einfluss solcher Abbrandverteilungen auf die Reaktivität der Anordnung mit der Abklingzeit zunehmen kann.

Der Einfluss horizontal inhomogener Abbrandverteilungen ist in abdeckender Weise zu berücksichtigen

- entweder als Beitrag zum Term Δk_A der Gleichung (2),
- oder in der entsprechenden Beladungskurve (siehe 4.2.1.2).

Bei der Ermittlung des Einflusses horizontal inhomogener Abbrandverteilungen sind vereinfachende Modellannahmen über die horizontale Verteilung des Abbrands zulässig, wenn diese Annahmen als abdeckend nachgewiesen werden.

Der Einfluss axialer Abbrandverteilungen auf die Reaktivität der Gesamtanordnung der Brennelemente oder sonstigen Brennstabanordnungen im Behälter ist anhand einer hinreichenden Anzahl von Abbrandverteilungen zu ermitteln. Diese müssen für den Reaktor, in dem die Brennelemente eingesetzt waren, charakteristisch sein und die während der Einsatzzeit der Brennelemente angewendeten Betriebsweisen und Beladungs- und Regelstrategien der Reaktoranlage abdecken. Welche Betriebsweisen und Beladungs- und Regelstrategien abgedeckt sind, ist in der Dokumentation über den Kritikalitätssicherheitsnachweis auszuweisen.

Werden Brennelemente aus verschiedenen Reaktoranlagen in einen Behälter eingesetzt, so ist für jede Reaktoranlage eine hinreichende Anzahl anlagenbezogener Abbrandverteilungen auszuwerten. Von dieser Anforderung darf ohne Begründung nicht abgewichen werden.

Bei der Auswertung axialer Abbrandverteilungen ist zu beachten, dass der Einfluss solcher Abbrandverteilungen auf die Reaktivität der Gesamtanordnung der Brennelemente oder sonstigen Brennstabanordnungen im Behälter im Allgemeinen mit der Abklingzeit zunimmt.

Der Einfluss axialer Abbrandverteilungen ist in abdeckender Weise zu berücksichtigen

- entweder als Beitrag zum Term Δk_A der Gleichung (2),
- oder in der entsprechenden Beladungskurve (siehe 4.2.1.2).

Bei der Auswertung der axialen Abbrandverteilungen ist es unvermeidlich, diese Verteilungen durch Modellverteilungen anzunähern. Es ist nachzuweisen, dass diese Modellverteilungen nicht zu einer geringeren Reaktivität führen können als die tatsächlichen jeweiligen axialen Abbrandverteilungen.

Eine Analyse horizontaler und axialer Abbrandverteilungen ist nicht erforderlich, wenn die Inhomogenitäten der Abbrandverteilung durch die Modellannahme einer homogenen Verteilung desjenigen Abbrands abgedeckt wird, bei dem die Reaktivität der Brennelemente oder sonstigen Brennstabanordnungen als Funktion ihres Abbrands in der Gesamtanordnung im Behälter ihr Maximum aufweist.

5 Kontrollen der Beladung der Behälter

5.1 Allgemeine Anforderungen

Für die Beladung eines jeden Behälters ist ein Beladeplan zu erstellen, in dem die Position eines jeden Brennelements oder einer jeden sonstigen Brennstabanordnung in dem jeweiligen Behälter individuell festgelegt wird.

Bei der Erstellung von Beladeplänen ist nach 5.2 sicherzustellen, dass die zur Beladung der Behälter vorgesehenen Brennelemente oder sonstigen Brennstabanordnungen die nach 4.2.1.2 oder 4.2.1.3 jeweils geforderten Mindestabbrände aufweisen.

Die zur Beladung eines Behälters vorgesehenen Brennelemente oder sonstigen Brennstabanordnungen sind im Nasslager der betreffenden Reaktoranlage in Bereitstellungspositionen umzusetzen, die eine eindeutige Zuordnung zum Beladeplan des Behälters ergeben.

Für die Umsetzung der Brennelemente oder sonstigen Brennstabanordnungen in die Bereitstellungspositionen und für die Beladung des Behälters entsprechend dem Beladeplan ist jeweils ein Schrittfolgeplan zu erstellen.

Unmittelbar vor dem Einsetzen eines Brennelements oder einer sonstigen Brennstabanordnung in den Behälter ist

- die Übereinstimmung des Kennzeichens dieses Brennelements oder der Identität dieser sonstigen Brennstabanordnung mit dem Beladeplan zu kontrollieren und
- eine Kontrollmessung an diesem Brennelement bzw. dieser Brennstabanordnung nach 5.3 auszuführen.

Führt eine dieser Kontrollen zum Ergebnis, dass dieses Brennelement oder diese Brennstabanordnung nicht in den Behälter umgesetzt werden darf, ist die Beladung des Behälters zu unterbrechen und die Ursachen sind zu klären.

Bei der Ermittlung des Abbrands nach 5.2, der Durchführung der Kontrollmessungen nach 5.3 sowie bei der Erstellung der Beladepläne und der zugehörigen Schrittfolgepläne als auch bei der Ausführung dieser Pläne sind die Anforderungen aus KTA 1401 an die Qualitätssicherung, Prüfungen und Dokumentation zu erfüllen. Außerdem sind die Anforderungen aus KTA 3602 zur Handhabung von Brennelementen und sonstigem Lagergut in Lagerbecken von Kernkraftwerken zu erfüllen. Es ist für die

- Anwendung der Resultate des Verfahrens nach 5.2,
- Umsetzung in die Bereitstellungspositionen,
- Kontrolle der Kennzeichen der Brennelemente oder der Identität der sonstigen Brennstabanordnungen,
- Anwendung der Resultate der Kontrollmessungen nach 5.3, und
- Umsetzung in die Behälter