

Kritikalitätssicherheit unter Anrechnung des
Brennelementabbrandes bei der Lagerung und Handhabung
von Brennelementen in Brennelementlagerbecken von
Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren

DIN
25471

ICS 27.120.20

Criticality safety taking into account the burnup of fuel
elements when handling and storing nuclear fuel elements in
fuel pools of nuclear power stations with lightwater reactors

Sûreté-criticité compte tenu du taux de combustion des
éléments combustibles lors du maniement et du stockage
des éléments combustibles en piscine de refroidissement
des centrales nucléaires à réacteur à eau légère

Inhalt

	Seite		Seite
Vorwort	2	4.4 Auslegung sonstiger Einrichtungen zur Handhabung bestrahlter Brennelemente	10
1 Anwendungsbereich	2	5 Kontrolle des Brennelementabbrands	10
2 Normative Verweisungen	2	5.1 Grundsätze	10
3 Definitionen und Formelzeichen	3	5.2 Verfahren zur Ermittlung des Brennelementabbrands	10
3.1 Definitionen	3	5.2.1 Messung des Neutronen- multiplikationsfaktors eines Brennelementes	10
3.2 Formelzeichen	4	5.2.2 Messung des Abbrandes eines Brennelementes	11
4 Anforderungen an die Kritikalitätsanalyse	5	5.2.3 Analyse der Leistungsgeschichte eines Brennelementes	11
4.1 Aufgaben	5	Anhang A (informativ) Erläuterungen zur Anrechnung des Brennelementabbrandes bei der Kritikalitätsanalyse von Einrichtungen zur Handhabung oder Lagerung von Brennelementen	11
4.2 Nachweis der Kritikalitätssicherheit ..	6	Anhang B (informativ) Erläuterungen zum berechneten Neutronenmultiplikationsfaktor und dessen Unsicherheiten	13
4.2.1 Berechnungssysteme	6	Anhang C (informativ) Erläuterungen zu Parametern, die die Reaktivität einer Einrichtung zur Handhabung oder Lagerung bestrahlter Brennelemente beeinflussen	14
4.2.1.1 Berechnung des Nuklidinventars ..	6	Anhang D (informativ) Literaturhinweise	17
4.2.1.2 Nachweis der Kritikalitätssicherheit	6		
4.2.2 Sicherstellung ausreichender Unterkritikalität	6		
4.2.2.1 Grundsätze	6		
4.2.2.2 Abschätzung der Unsicherheiten ..	6		
4.3 Auslegung von Brennelement- lagerbecken für die Lagerung von bestrahlten und unbestrahlten Brennelementen	7		
4.3.1 Grundlegende Anforderungen	7		
4.3.2 Kenngrößen der Brennelemente	7		
4.3.3 Ermittlung der reaktivsten Anordnung der Brennelemente	8		
4.3.3.1 Auslegungsannahmen	8		
4.3.3.2 Einflussparameter und Randbedingungen	8		
4.3.3.3 Zu betrachtende Störfälle	9		

Fortsetzung Seite 2 bis 18

Normenausschuss Materialprüfung (NMP) — FB Kerntechnik — im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Vorwort

Diese Norm wurde vom Fachbereich Kerntechnik im NMP, Arbeitsausschuss NMP 745 „Kritikalitätssicherheit“ erstellt.

Die vorliegende Norm enthält Festlegungen, die die Einhaltung der Kritikalitätssicherheit bei der Handhabung und Lagerung von Brennelementen in Brennelementlagerbecken von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren sicherstellen, wenn bei der Planung, Errichtung oder dem Betrieb entsprechender Handhabungs- bzw. Lagereinrichtungen der Abbrand bestrahlter Brennelemente angerechnet wird. Für unbestrahlte Brennelemente werden Festlegungen getroffen, soweit sie für das Verständnis und die Anwendung der Norm erforderlich sind. Grundsätzliche Festlegungen der bei der Kritikalitätsanalyse solcher Einrichtungen zu erfüllenden Anforderungen sind in der sicherheitstechnischen Regel KTA 3602 des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) enthalten.

Die Anrechnung des Brennelementabbrandes bei der Kritikalitätsanalyse erfordert die Kenntnis des Reaktivitätszustandes des bestrahlten Kernbrennstoffs. Dazu ist das Nuklidinventar des bestrahlten Kernbrennstoffs mit Hilfe von nuklearen Berechnungssystemen zu ermitteln. Dieses Inventar gehört neben den geometrischen und sonstigen Merkmalen der Brennelemente und der betrachteten Einrichtung zu den Eingangsdaten, die zum Nachweis der Kritikalitätssicherheit mit Hilfe entsprechend geeigneter Berechnungssysteme erforderlich sind. Die vorliegende Norm enthält daher Festlegungen zur Durchführung der Berechnung des Nuklidinventars und der Kritikalitätsanalyse von Einrichtungen, die den genannten Zwecken dienen.

Die Anrechnung des Brennelementabbrandes bei der Handhabung oder Lagerung eines Brennelements erfordert die Kenntnis seines Abbrandes. Die vorliegende Norm enthält daher Festlegungen darüber, welche Verfahren zur Ermittlung des Brennelementabbrandes zulässig sind.

Erläuterungen zur Anrechnung des Brennelementabbrandes werden in Anhang A gegeben.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für die Handhabung und Lagerung von unbestrahlten und bestrahlten Brennelementen mit oxidischem Kernbrennstoff in Brennelementlagerbecken von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren.

2 Normative Verweisungen

Diese Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation.

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

DIN 13303-2:1982-11, *Stochastik — Mathematische Statistik — Begriffe und Zeichen.*

Reihe DIN 25401, *Begriffe der Kerntechnik.*

DIN 25463-1, *Berechnung der Nachzerfallsleistung der Kernbrennstoffe von Leichtwasserreaktoren — Teil 1: Nichttrezyklierte Kernbrennstoffe.*

DIN 25478:1994-07, *Einsatz von Berechnungssystemen beim Nachweis der Kritikalitätssicherheit.*

DIN 25482-1, *Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen — Teil 1: Zählende Messungen ohne Berücksichtigung des Probenbehandlungseinflusses.*

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

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

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

KTA 1401, *Allgemeine Forderungen an die Qualitätssicherung*.

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*.

KTA 3602:1990-06, *Lagerung und Handhabung von Brennelementen, Steuerelementen und Neutronenquellen in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren*.

3 Definitionen und Formelzeichen

3.1 Definitionen

Für die Anwendung dieser Norm gelten die Definitionen nach DIN 13303-1, DIN 13303-2, Normen der Reihe DIN 25401, DIN 25463-1, DIN 25478, DIN 25482-1, DIN 55350-21, DIN 55350-23, DIN 55350-24 sowie KTA 1401, KTA 3101.2 und KTA 3602. Außerdem gelten folgende Definitionen:

3.1.1

Anfangsinventar (eines Kernbrennstoffes)

Das Nuklidinventar eines unbestrahlten Kernbrennstoffes.

3.1.2

Beckenwasser (eines Brennelementlagers)

Wasser des Brennelementlagerbeckens.

3.1.3

Brennelementlagerbecken

Ein mit Wasser gefülltes Becken, in dem insbesondere Brennelemente gehandhabt und in Brennelementlagergestellen gelagert werden und bei dem das Wasser als Kühlmittel und zur Abschirmung dient.

ANMERKUNG Wegen des Vorhandenseins des Wassers werden Brennelementlagerbecken auch Nasslager genannt.

3.1.4

Brennelementlagergestell

Eine mechanische Struktur, die eine feste Anordnung von Brennelementlagerpositionen sicherstellt.

3.1.5

Brennelementlagerposition

Bezeichnet den Ort für die Lagerung eines Brennelements.

3.1.6

einseitige Toleranzgrenze

Wert einer Zufallsvariablen, der einen Mindestanteil $1 - \gamma$ der wahren Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zufallsvariablen mit einer Wahrscheinlichkeit $1 - \alpha$ (Konfidenzniveau) einseitig nach unten oder oben abgrenzt. Eine einseitige Toleranzgrenze ist demnach durch den unteren bzw. oberen Grenzwert eines halboffenen Anteilsintervalls gegeben.

ANMERKUNG 1 Zum Begriff Anteilsintervall siehe DIN 13303-2:1982-11, 4.7.1.

ANMERKUNG 2 Toleranzgrenzen werden durch die Wahrscheinlichkeiten $1 - \alpha$ und $1 - \gamma$ gekennzeichnet. Wird z. B. $\alpha = \gamma = 0,05$ gewählt, so heißt die Toleranzgrenze einseitige 95 %/95 %-Toleranzgrenze.

ANMERKUNG 3 Zur Berechnung von Toleranzgrenzen siehe z. B. [1].

3.1.7

Leistungsgeschichte eines Brennelements

Darstellung der von einem Brennelement erzeugten thermischen Leistung als Funktion der Zeit für die gesamte Zeitspanne seiner Betriebszeit.

3.1.8

Nuklidinventar; Inventar an Nukliden

Anzahldichten oder Konzentrationen aller in einem Nuklidsatz bestimmten Nuklide.

ANMERKUNG Sind die Nuklide näher bestimmt, so wird im Allgemeinen ihre nähere Bestimmung verwendet, z. B. Radionuklidinventar (Inventar an Radionukliden), Spaltproduktinventar (Inventar an Spaltprodukten), Spaltstoffinventar (Inventar an Spaltstoffen).

3.1.9

Nuklidsatz

Enthält die Nuklide, die bei der Kritikalitätsanalyse zur Beschreibung eines Stoffes berücksichtigt werden.

3.2 Formelzeichen

Die verwendeten Formelzeichen sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 — Formelzeichen zur Kritikalitätssicherheit unter Anrechnung des Brennelementabbrandes bei der Lagerung und Handhabung von Brennelementen in Brennelementlagerbecken von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren

Formelzeichen	Benennung
$A_{\min}$	Geforderter Mindestwert des über ein Brennelement gemittelten Abbrandes (siehe 4.3.1 b)
Δk_A	Aus der Anrechnung des Brennelementabbrands herrührende Unsicherheit oder aufgrund dieser Anrechnung erforderliche Korrektur des für die Einrichtung zur Handhabung oder Lagerung bestrahlter Brennelemente berechneten Neutronenmultiplikationsfaktors (siehe z. B. 4.3.2 e) 5) und 4.3.3.2 g)).
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 Genauigkeit der Rechenergebnisse der anhand der Benchmark-Experimente ausgeführten Validationsrechnungen 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 Spaltstoffanordnung verbundene Unsicherheit abschätzt (siehe DIN 25478).

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Formelzeichen	Benennung
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 (siehe Erläuterungen in Anhang B).
Δk_S	Sicherheitsabstand, den ein berechneter Neutronenmultiplikationsfaktor unter Berücksichtigung der mit seiner Berechnung verbundenen Unsicherheiten vom Zustand der Kritikalität mindestens einhalten muss (siehe 4.2.2.1).
Δk_T	Unsicherheiten, die von Maß- und Fertigungstoleranzen der Brennelemente und der betrachteten Einrichtung (Spaltstoffanordnung) herrühren.
Δk_U	Summe aus Δk_A , Δk_B , Δk_N , Δk_R und Δk_T ANMERKUNG 1 Zu Anforderungen an die Berechnung von Δk_U siehe 4.2.2.2
$1 - \alpha$	Konfidenzniveau ANMERKUNG 2 Nach DIN 13303-2:1982-11, 4.4, ist das Konfidenzniveau die durch einen im Raum einer Zufallsvariablen (eines Zufallsvektors) aufgespannten Konfidenzbereich gegebene Wahrscheinlichkeit.
$1 - \gamma$	Mindestanteil an der Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zufallsvariablen.
$k_{BE}(A_{\min})$	Neutronenmultiplikationsfaktor eines einzelnen Brennelements, das den Abbrand $A_{\min}$ aufweist (siehe 5.2.1)
$k(x)$	Neutronenmultiplikationsfaktor einer durch einen Parametersatz x definierten Spaltstoffanordnung (siehe auch Erläuterungen in Anhang B)
x	Parametersatz $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, der die zum berechneten Neutronenmultiplikationsfaktor $k(x)$ gehörende Spaltstoffanordnung charakterisiert. x umfasst die geometrischen Daten, die Kernbrennstoffdaten (wie z. B. Anfangsanreicherung und Abbrand der Brennelemente) und die sonstigen Materialdaten der Spaltstoffanordnung.

4 Anforderungen an die Kritikalitätsanalyse

4.1 Aufgaben

Für jede Einrichtung, die der Handhabung oder der Lagerung von Brennelementen in Brennelementlagerbecken dient, ist eine Kritikalitätsanalyse zu erstellen.

Für jede dieser Einrichtungen ist der Nachweis der Kritikalitätssicherheit für den bestimmungsgemäßen Betrieb sowie für jeden einzelnen der für die jeweilige Einrichtung zu unterstellenden Störfälle zu erbringen. Insbesondere ist nachzuweisen, dass sichergestellt ist, dass mindestens zwei voneinander unabhängige, gleichzeitig wirkende und im bestimmungsgemäßen Betrieb nicht zu erwartende Ereignisabläufe eintreten müssen, bevor Kritikalität erreicht werden kann (Störfallprinzip).

Bei der Kritikalitätsanalyse sind

- alle Kenngrößen der Brennelemente anzugeben, von denen die Kritikalitätssicherheit abhängt (siehe 4.3.2), und

- alle Kritikalitätssicherheitsparameter anzugeben, deren Einhaltung bei der Herstellung, der Aufstellung oder dem Betrieb der im ersten Absatz genannten Einrichtungen sicherzustellen ist (siehe z. B. 4.3.3.2).

4.2 Nachweis der Kritikalitätssicherheit

4.2.1 Berechnungssysteme

4.2.1.1 Berechnung des Nuklidinventars

Die Berechnung des Nuklidinventars bestrahlten Kernbrennstoffs muss unter Berücksichtigung charakteristischer Reaktorbetriebsbedingungen erfolgen. Die zur Berechnung dieses Inventars eingesetzten nuklearen Berechnungssysteme müssen die Anforderungen nach KTA 3101.2:1987-12, Abschnitt 6, erfüllen.

4.2.1.2 Nachweis der Kritikalitätssicherheit

Die zum Nachweis der Kritikalitätssicherheit eingesetzten Berechnungssysteme müssen die Anforderungen nach DIN 25478 erfüllen.

4.2.2 Sicherstellung ausreichender Unterkritikalität

4.2.2.1 Grundsätze

Der Nachweis der Kritikalitätssicherheit einer Einrichtung zur Handhabung und Lagerung von Brennelementen ist erbracht, wenn der für diese Einrichtung unter den reaktivsten Bedingungen, wie sie sich aus der Analyse des bestimmungsgemäßen Betriebes und der nach 4.1 zu behandelnden Störfälle ergeben, errechnete Neutronenmultiplikationsfaktor unter Berücksichtigung aller Unsicherheiten, die mit den eingesetzten Berechnungssystemen und der betrachteten Spaltstoffanordnung verbunden sind, kleiner oder höchstens gleich ist einer oberen Grenze $(1 - \Delta k_S)$, die einen angemessenen Sicherheitsabstand Δk_S vom Zustand der Kritikalität aufweist.

Für die Analyse des bestimmungsgemäßen Betriebes und von Störfällen ist für den Sicherheitsabstand Δk_S der Wert 0,05 zu wählen. Für die Analyse von Störfällen darf in begründeten Fällen für Δk_S auch ein kleinerer Wert als 0,05 angewendet werden, jedoch ist nachzuweisen, dass keine kritische Anordnung gebildet wird.

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

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

Der Term Δk_U stellt die Summe sämtlicher Unsicherheiten dar, die mit den eingesetzten Berechnungssystemen und der betrachteten Spaltstoffanordnung verbunden sind, siehe Tabelle 1:

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

Es ist zu beachten, dass Δk_U vom Parametersatz x abhängen kann, weil Δk_R , Δk_N , Δk_B , Δk_T und Δk_A davon abhängen können.

4.2.2.2 Abschätzung der Unsicherheiten

Eine jede der Unsicherheiten, 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 Erläuterungen in Anhang B).

- Unsicherheit Δk_R : Siehe Tabelle 1 und Erläuterungen in Anhang B.
- Unsicherheit Δk_N : Die mit der Berechnung des Nuklidinventars bestrahlten Kernbrennstoffs verbundene Unsicherheit Δk_N ist als Beitrag zum Term Δk_U der Gleichung (2) auszuweisen, sofern sie nicht durch eine in Bezug auf die Reaktivität der betrachteten Einrichtung nachweislich abdeckende
 - Korrektur der berechneten Nuklidkonzentrationen und/oder