

DIN 25463-1

ICS 27.120.30

Einsprüche bis 2013-04-30
Vorgesehen als Ersatz für
DIN 25463-1:1990-05

Entwurf

Berechnung der Zerfallsleistung der Kernbrennstoffe von Leichtwasserreaktoren – Teil 1: Uranoxid-Kernbrennstoff für Druckwasserreaktoren

Calculation of the decay power in nuclear fuels of light water reactors –
Part 1: Uranium oxide nuclear fuel for pressurized water reactors

Calcul de la chaleur de désintégration dans le combustible nucléaire de réacteurs à eau
légère –

Partie 1: Oxyde d'uranium combustible pour réacteurs à eau pressurisée

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2012-12-17 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses
Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN, 10772 Berlin (Hausanschrift: Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin).

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 51 Seiten

Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN

Inhalt

Seite

Vorwort	3
Einleitung.....	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe und Formelzeichen	5
4 Zerfallsleistung	9
4.1 Allgemeines	9
4.2 Leistungshistogramm	9
4.3 Berechnungsvorschrift	10
4.3.1 Allgemeines	10
4.3.2 Zerfallsleistung der Spaltprodukte und ihrer Zerfallsprodukte, P_S	11
4.3.3 Zerfallsleistung der Actinide und von aus Neutroneneinfangreaktionen in Spaltprodukten entstandenen Nukliden, P_R	12
4.3.4 Gesamte Zerfallsleistung, P_Z	12
4.4 Unsicherheit, ΔP_Z	13
Anhang A (normativ) Lineare Interpolation der Wirkungsquerschnitte	28
A.1 Allgemeines	28
A.2 Lineare Interpolation der Wirkungsquerschnitte auf die Brennstoffeigenschaften	29
A.3 Lineare Interpolation der Wirkungsquerschnitte auf den jeweiligen Abbrand	30
Anhang B (informativ) Anwendungsbeispiele.....	32
B.1 Spezifikation des DWR-Brennelements und des Leistungshistogramms	32
B.2 Rechenergebnisse	34

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Normenausschuss Materialprüfung (NMP) — FB Kerntechnik — Arbeitsausschuss NA 062-07-44 AA „Zerfallsleistung“ erarbeitet.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

DIN 25463 „Berechnung der Zerfallsleistung der Kernbrennstoffe von Leichtwasserreaktoren“ besteht aus:

- Teil 1: *Uranoxid-Kernbrennstoff für Druckwasserreaktoren*
- Beiblatt zu Teil 1: *Nichtrezyklierte Kernbrennstoffe; Dokumentation und Erläuterungen*
- Teil 2: *Uran-Plutonium-Mischoxid (MOX) Kernbrennstoff für Druckwasserreaktoren*

Änderungen

Gegenüber DIN 25463-1:1990-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Umbenennung des Titels;
- b) Erweiterung des Anwendungsbereichs auf Abklingzeiten bis etwa 60 Jahre;
- c) Anpassung an die aktuelle Terminologie durch Streichung und Ergänzung von Begriffen;
- d) Aktualisierung durch Aufnahme neuer Kenntnisse bei der Erarbeitung von DIN 25462-2;
- e) Umstellung der Gestaltung auf die Festlegungen nach Normen der Reihe DIN 820.

Einleitung

Dieses Dokument liefert die Grundlage für die Berechnung der Zerfallsleistung von Uranoxid-Kernbrennstoff in Druckwasserreaktoren. Dabei werden berücksichtigt:

- der Beitrag der Spaltprodukte aus Kernspaltungen,
- der Beitrag der Actinide,
- der Beitrag von Nukliden, die durch Neutroneneinfang in Spaltprodukten entstehen.

Dieses Dokument gibt die lokale Erzeugung der Zerfallsleistung in Abhängigkeit von der thermischen Brennstoffleistung während des Betriebes an. Die räumliche Verteilung der Energieumwandlung in Wärme (z. B. absorbierte γ -Strahlung) wird nicht berücksichtigt.

Dem Anwender dieses Dokuments werden Rechenvorschriften und Datensätze an die Hand gegeben, mit denen die Zerfallsleistung unter Verwendung des für die jeweilige Kombination aus

- ^{235}U -Anreicherung und
- effektivem Moderationsverhältnis

gültigen Wirkungsquerschnitts berechnet werden kann.

Bei Benutzung der angegebenen Gleichungen und Tabellen ist der jeweils angegebene Geltungsbereich zu beachten.

Nicht Gegenstand dieses Dokuments ist die Erzeugung von Zerfallsleistung aufgrund aktivierten Strukturmaterials.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument ist für die Berechnung der Zerfallsleistung von Uranoxid-Kernbrennstoff in Druckwasserreaktoren anzuwenden.

Die Berechnungsvorschriften gelten für

- Abklingzeiten von 0 s bis $2 \cdot 10^9$ s (etwa 60 Jahre),
- ^{235}U -Anteil von 3 % bis 5 %,
- effektive Moderationsverhältnisse von 1,80 bis 2,40,
- Abbrände von 0 MWd/kg Schwermetall bis 80 MWd/kg Schwermetall.

Wird der Anwendungsbereich verlassen, dürfen vom Anwender eigene Rechenverfahren und Datensammlungen verwendet werden, sofern deren Gültigkeit nachgewiesen wird.

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 25463-2:2008-03, *Berechnung der Zerfallsleistung der Kernbrennstoffe von Leichtwasserreaktoren — Teil 2: Uran-Plutonium-Mischoxid (MOX)-Kernbrennstoff für Druckwasserreaktoren*

3 Begriffe und Formelzeichen

Für die Anwendung dieser Norm gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Zerfallsleistung

thermische Leistung, die durch den Zerfall der im Kernbrennstoff enthaltenen Nuklide erzeugt wird
[DIN 25463-2:2008-03]

3.2

Betriebszeit

Zeit vom ersten Einsatz des Kernbrennstoffs im Reaktor bis zu dem Zeitpunkt, ab dem die Zerfallsleistung berechnet wird
[DIN 25463-2:2008-03]

3.3

Abklingzeit

Zeit nach der Betriebszeit
[DIN 25463-2:2008-03]

3.4

Leistungshistogramm

zeitlicher Verlauf der thermischen Brennstoffleistung während der Betriebszeit, approximiert durch Zeitintervalle mit konstanter thermischer Leistung
[DIN 25463-2:2008-03]

3.5**²³⁵U-Anreicherung**

Massenanteil in % von ²³⁵U bezogen auf die gesamte Uranmasse

3.6**geometrisches Moderationsverhältnis**

Quotient aus Wasservolumen zu Brennstoffvolumen

3.7**effektives Moderationsverhältnis**

Produkt aus dem geometrischen Moderationsverhältnis und dem Quotienten aus der Dichte des Moderators und der Referenzdichte von 706,0 kg/m³

$$v = \frac{v_{\text{geom}} \cdot \rho}{706,0 \text{ kg/m}^3}$$

Tabelle 1 — Formelzeichen zur Berechnung der Zerfallsleistung

Formelzeichen	Benennung	Einheit
A_n	Atomare Masse des Nuklids n	AMU
a_0	^{235}U -Anteil	%
N_n	Anzahl der Kerne des Nuklids n im Brennstoff	—
P	thermische Leistung des gesamten Kernbrennstoffs	W
ΔP	Unsicherheit von P	W
P_k	thermische Leistung des gesamten Kernbrennstoffs während $\Delta t_{B,k}$	W
P_{ik}	thermische Leistung des spaltbaren Nuklids i während $\Delta t_{B,k}$	W
P_R	Zerfallsleistung der Actinide und von aus Neutroneneinfangreaktionen in Spaltprodukten entstandenen Nukliden	W
ΔP_R	Unsicherheit von P_R	W
P_S	Zerfallsleistung der Spaltprodukte und ihrer Zerfallsprodukte	W
ΔP_S	Unsicherheit von P_S	W
$P_{S,i}$	Zerfallsleistung der Spaltprodukte des spaltbaren Nuklids i und ihrer Zerfallsprodukte	W
$\Delta P_{S,i}$	Unsicherheit von $P_{S,i}$	W
P_Z	gesamte Zerfallsleistung	W
ΔP_Z	Unsicherheit von P_Z	W
$Q_{f,i}$	spontane thermische Energiefreisetzung aus einer Kernspaltung des spaltbaren Nuklids i ohne Berücksichtigung nachfolgender Spaltproduktzerfälle	MeV
$Q_{\text{eff},i}$	gesamte thermische Energiefreisetzung aus einer Kernspaltung des spaltbaren Nuklids i mit Berücksichtigung der Energie nachfolgender Spaltproduktzerfälle	MeV
$Q_{c,v,i}$	thermisch nutzbarer Anteil der freigesetzten Energie aus nicht zu einer Spaltung führenden Neutroneneinfängen	MeV
Q_i	gesamte thermisch nutzbare Energie pro Kernspaltung des spaltbaren Nuklids i mit Berücksichtigung der Energie aus nachfolgenden Spaltproduktzerfällen sowie aus Neutroneneinfängen in Spaltprodukten, Actiniden und Strukturmaterial	MeV
ΔQ_i	Unsicherheit von Q_i	MeV
Q_n	thermisch nutzbare Energie aus einem Zerfall des Nuklids n	MeV
$Q_{c,n}$	thermisch nutzbare Energie aus dem Einfang eines Neutrons im Nuklid n	MeV
R_{ik}	Spaltrate des spaltbaren Nuklids i im k -ten Betriebsintervall	1/s
t	Zeitpunkt während der Betriebszeit t_B oder der Abklingzeit t_A	s
t_0	Beginn des ersten Betriebszeitintervalls	s
t_m	Ende des letzten Betriebszeitintervalls	s

Formelzeichen	Benennung	Einheit
t_k	Ende des k -ten Betriebszeitintervalls	s
t_A	Abklingzeit	s
$t_{A,k}$	Abklingzeit des k -ten Betriebszeitintervalls $t_{A,k} = t_A + (t_m - t_k)$	s
t_B	Betriebszeit $t_B = t_m - t_0$	s
$\Delta t_{B,k}$	Dauer des k -ten Betriebszeitintervalls	s
ν	effektives Moderationsverhältnis	—
ν_{geom}	geometrisches Moderationsverhältnis	—
γ_{ni}	Spaltausbeute des Nuklids n bei Spaltung des Nuklids i	—
α_{ij}	Koeffizienten zur Darstellung der Zerfallsleistung der Spaltprodukte	MeV/s
β_{ij}	Koeffizienten zur Darstellung der Standardabweichung der Zerfallsleistung der Spaltprodukte	MeV/s
ε	Umrechnungsfaktor für die Leistungseinheiten MeV/s $\rightarrow$ W	Ws/MeV
λ_{ij}	Exponentialkoeffizient zur Darstellung der Zerfallsleistung der Spaltprodukte und deren Standardabweichung	s ⁻¹
λ_n	Zerfallskonstante des Nuklids n	s ⁻¹
λ_{mn}	Zerfallskonstante des Zerfalls vom Nuklid m zum Nuklid n	s ⁻¹
φ	Neutronenflussdichte	cm ⁻² s ⁻¹
$\sigma_{A,n}$	Neutronenumwandlungswirkungsquerschnitt für das Nuklid n	cm ²
$\sigma_{C,n}$	Neutroneneinfangwirkungsquerschnitt für das Nuklid n	cm ²
σ_{mn}	Neutronenwirkungsquerschnitt für den Übergang vom Nuklid m zum Nuklid n	cm ²
$\sigma_{f,i}$	Neutronenkernspaltungswirkungsquerschnitt des spaltbaren Nuklids i	cm ²
ρ	Dichte des Moderators	kg/m ³
i	Index zur Kennzeichnung der spaltbaren Nuklide (z. B. ²³⁵ U, ²³⁸ U, ²³⁹ Pu, ²⁴¹ Pu)	—
j	Summationsindex für die Darstellung der Zerfallsleistung durch eine Summe von Exponentialfunktionen	—
k	Index zur Nummerierung der einzelnen Zeitintervalle im Leistungshistogramm	—
m	Anzahl der Betriebszeitintervalle $\Delta t_{B,k}$ im Leistungshistogramm oder Index eines Vorläufernuklids einer Neutronenreaktions- oder Zerfallskette	—
n	Index eines Nuklids	—

4 Zerfallsleistung

4.1 Allgemeines

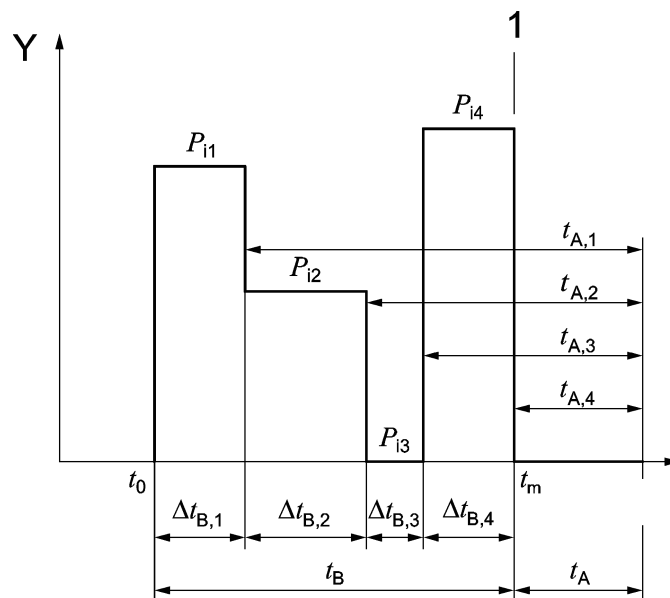
Zur Berechnung der Zerfallsleistung werden folgende Anteile (siehe Gleichung (5)) berücksichtigt:

- Der Beitrag der Spaltprodukte aus Kernspaltungen der vier Nuklide ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu und ^{241}Pu . Spaltprodukte anderer spaltbarer Nuklide werden über eine entsprechende Erhöhung der Spaltrate der obigen Nuklide pauschal berücksichtigt.
- Der Beitrag aus dem Zerfall der ursprünglich im Kernbrennstoff enthaltenen Nuklide und der Beitrag von Nukliden, die durch Neutroneneinfang in Spaltprodukten und Actiniden sowie deren Zerfallsprodukten entstehen.

4.2 Leistungshistogramm

Während der Betriebszeit ändern sich die Leistung, die Leistungsanteile der spaltbaren Nuklide und insbesondere die Neutronenflussdichte im betrachteten Brennstoff. Dies lässt sich dadurch berücksichtigen, dass die Betriebszeit in Zeitintervalle mit konstanter Leistung unterteilt wird (siehe Bild 1). Dabei ist darauf zu achten, dass eine durch diese Näherung verursachte Änderung der berechneten Zerfallsleistung klein bleibt gegenüber der statistischen Unsicherheit der Zerfallsleistung. Dies lässt sich durch eine möglichst gute Approximation der Brennstoffleistung insbesondere am Ende der Betriebszeit erreichen. Hierbei ist darauf zu achten, dass in jedem Zeitintervall des Leistungshistogramms das Zeitintegral der tatsächlichen Brennstoffleistung erreicht wird.

Insbesondere bei Berechnung der Zerfallsleistung bei kurzen Abklingzeiten ist darauf zu achten, dass der zeitliche Verlauf des Abfahrvorgangs inklusive der durch Kettenreaktionen verzögerte Neutronen hervorgerufenen Leistung im Leistungshistogramm berücksichtigt wird.



Legende

Y	Leistung	t	Zeit
1	Abschaltung	t _B	Betriebszeit
		t _A	Abklingzeit

Bild 1 — Leistungshistogramm

4.3 Berechnungsvorschrift

4.3.1 Allgemeines

Die Zerfallsleistung berechnet sich allgemein aus der Summe der Zerfallsleistungen aller durch Spaltung und Neutroneneinfang sowie durch nachfolgende Zerfälle entstandene Nuklide n nach Gleichung (1).

$$P_Z(t_A, t_B) = \varepsilon \cdot \sum_n Q_n \cdot \lambda_n \cdot N_n(t_A, t_B) \quad (1)$$

Dabei ist $\varepsilon = 1,6022 \times 10^{-13} \text{ Ws/MeV}$

Die Teilchenanzahl $N_n(t_A, t_B)$ des Nuklids n ergibt sich aus dem Differentialgleichungssystem (2)

$$\frac{dN_n(t)}{dt} = -\lambda_n \cdot N_n(t) - \sigma_{A,n}(t) \cdot \varphi(t) \cdot N_n(t) + \sum_m \sigma_{mn}(t) \cdot \varphi(t) \cdot N_m(t) + \sum_m \lambda_{mn} \cdot N_m(t) + \sum_i y_{ni} \cdot \sigma_{f,i}(t) \cdot \varphi(t) \cdot N_i(t) \quad (2)$$

mit der Anfangsbedingung

$N_n(t_0) = \text{Teilchenanzahl}^{1)} \text{ des Nuklids } n \text{ im Brennstoff zu Beginn des ersten Betriebszeitintervalls}$

und folgender Interpretation der einzelnen Größen

$\sigma_{A,n} = \sigma_{c,n} + \sigma_{f,n}$ Neutronenumwandlungswirkungsquerschnitt des Nuklids n . Beim Nuklid ^{238}U wird zusätzlich die $n,2n$ -Reaktion hinzugerechnet (siehe Bild 2);

$\frac{dN_n(t)}{dt}$ Änderungsrate des Nuklids n ;

$\lambda_n \cdot N_n(t)$ Abbaurate des Nuklids n durch radioaktiven Zerfall;

$\sigma_{A,n}(t) \cdot \varphi(t) \cdot N_n(t)$ Abbaurate des Nuklids n durch Neutronenreaktionen;

$\sum_m \sigma_{mn}(t) \cdot \varphi(t) \cdot N_m(t)$ Erzeugungsrate des Nuklids n durch Neutroneneinfänge in den Nukliden m ;

$\sum_m \lambda_{mn} \cdot N_m(t)$ Erzeugungsrate des Nuklids n durch radioaktive Zerfälle der Nuklide m ;

$\sum_i y_{ni} \cdot \sigma_{f,i}(t) \cdot \varphi(t) \cdot N_i(t)$ Erzeugungsrate des Nuklids n als Spaltprodukt der Nuklide i .

Die Neutronenflussdichte $\varphi(t)$ ergibt sich allgemein zu

$$\varphi(t) = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{P(t) - P_Z(t)}{\sum_i Q_{f,i} \cdot \sigma_{f,i}(t) \cdot N_i(t) + \sum_m Q_{c,m} \cdot \sigma_{c,m}(t) \cdot N_m(t)} \quad (3)$$

¹⁾ Die Umrechnung von Massen- auf Teilchenanzahl erfolgt mit Hilfe der atomaren Massen A_n (siehe dazu Tabellen 5 und 6).

Dabei ist $Q_{f,i} = Q_{\text{eff},i} - \sum_{j=1}^{24} \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}}$ mit $Q_{\text{eff},i}, \alpha_{ij}$ und λ_{ij} nach den Tabellen 2 und 3.

Zur Vermeidung der in Gleichung (3) notwendigen Iterationen kann die Gleichung (3) durch die Gleichung (4) approximiert werden.

$$\varphi(t) = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{P(t)}{\sum_i Q_{\text{eff},i} \cdot \sigma_{f,i}(t) \cdot N_i(t) + \sum_m Q_{c,m} \cdot \sigma_{c,m}(t) \cdot N_m(t)} \quad (4)$$

Dabei ist

$$i = 1, \dots, 19$$

Für die Benutzung der Gleichung (4) sind die benötigten Größen den Tabellen 2, 5, 6, 8 bis 10 zu entnehmen.

Die in Tabelle 2 angegebenen Werte für Q_i enthalten die anderen Beiträge nach Gleichung (3) für Leistungsreaktoren.

In dieser Norm wird die Zerfallsleistung P_Z als Summe der Beiträge der direkten Spaltprodukte und ihrer Zerfallsprodukte P_S (siehe 4.3.2) und den Beiträgen der restlichen Nuklide P_R (siehe 4.3.3) in Gleichung (5) dargestellt.

$$P_Z(t_A, t_B) = P_S(t_A, t_B) + P_R(t_A, t_B) \quad (5)$$

4.3.2 Zerfallsleistung der Spaltprodukte und ihrer Zerfallsprodukte, P_S

Die Lösung der Gleichungen (1) und (2) für den Beitrag der Spaltprodukte ohne Berücksichtigung von Neutroneneinfangreaktionen (siehe 4.3.3), berechnet sich nach folgendem Formalismus aus den einzelnen Beiträgen $P_{S,i}(t_A, t_B)$ der vier Nuklide

$$P_S(t_A, t_B) = \sum_{i=1}^4 P_{S,i}(t_A, t_B) \quad (6)$$

Jeder Beitrag $P_{S,i}(t_A, t_B)$ setzt sich wiederum aus der Summe der Zerfallsleistungen der m Zeitintervalle des Leistungshistogramms zusammen.

$$P_{S,i}(t_A, t_B) = \sum_{k=1}^m P_{S,i}(t_{A,k}, \Delta t_{B,k}) \quad (7)$$

Dabei ist

$$P_{S,i}(t_{A,k}, \Delta t_{B,k}) = \varepsilon \cdot R_{ik} \cdot \sum_{j=1}^{24} \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{ij} \cdot \Delta t_{B,k}} \right) \cdot e^{-\lambda_{ij} \cdot t_{A,k}} \quad (8)$$

mit den in Tabelle 3 angegebenen Koeffizienten α_{ij} , λ_{ij} und der Spaltrate R_{ik} des spaltbaren Isotops i :

$$R_{ik} = \sigma_{f,i}(t_k) \cdot \varphi(t_k) \cdot N_i(t_k) \cdot \left(\frac{\sum_{n = \text{alle spaltbaren Nuklide (Tabellen 8, 9)}} \sigma_{f,n}(t_k) \cdot N_n(t_k)}{\sum_{n = {}^{235}\text{U}, {}^{238}\text{U}, {}^{239}\text{Pu}, {}^{241}\text{Pu}} \sigma_{f,n}(t_k) \cdot N_n(t_k)} \right) \quad (9)$$

Durch den Klammerausdruck in Gleichung (9) wird eine Korrektur zur Berücksichtigung der Spaltprodukte aus anderen spaltbaren Nukliden als ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$ und ${}^{241}\text{Pu}$ durchgeführt. Bei den Yields (siehe Tabelle 6) zur Berechnung des Effekts des Neutroneneinfangs in Spaltprodukten kann diese Korrektur vernachlässigt werden.

Die Neutronenflussdichte $\varphi(t_k)$ sowie die Anzahl der Kerne $N_i(t_k)$ der spaltbaren Nuklide ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$ und ${}^{241}\text{Pu}$ in Gleichung (9) erhält man durch Lösen der Gleichungen (2) bis (4) unter Benutzung der in den Tabellen 5 und 6 angegebenen Reaktionsketten mit den nuklearen Daten nach den Tabellen 5 bis 9.

Der Beitrag P_S der Spaltprodukte zur Zerfallsleistung ergibt sich nach Gleichung (10) zu:

$$P_S(t_A, t_B) = \varepsilon \cdot \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^4 R_{ik} \cdot \sum_{j=1}^{24} \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{ij} \cdot \Delta t_{B,k}} \right) \cdot e^{-\lambda_{ij} \cdot t_{A,k}} \quad (10)$$

Zur Veranschaulichung der Nomenklatur zeigt Bild 1 ein Leistungshistogramm mit vier Zeitintervallen k unterschiedlicher Leistung.

4.3.3 Zerfallsleistung der Actinide und von aus Neutroneneinfangreaktionen in Spaltprodukten entstandenen Nukliden, P_R

Neben dem Beitrag der Spaltprodukte und ihrer Zerfallsprodukte spielen bei der Zerfallsleistung von Uranoxid-Brennstoff noch die durch Neutronenreaktionen im Brennstoff und seiner Spalt- und Folgeprodukte entstehende Nuklide und deren Zerfallsprodukte eine wesentliche Rolle.

Dieser Beitrag P_R ist durch Gleichung (11) gegeben.

$$P_R(t_A, t_B) = \varepsilon \cdot \sum_n Q_n \cdot \lambda_n \cdot N_n(t_A, t_B) \quad (11)$$

Dabei umfasst n alle in Tabelle 4 genannten Nuklide (Nuklidlisten 1 und 2).

Die zur Berechnung von Gleichung (11) notwendigen Größen Q_n und λ_n sind in den Tabellen 5 und 6 wiedergegeben. Die zeitabhängige Anzahl der Kerne $N_n(t_A, t_B)$ des Nuklids n ist durch Lösen des Differentialgleichungssystems (2) unter Verwendung der in den Tabellen 5 und 6 aufgeführten Reaktionsketten unter Benutzung der Daten aus den Tabellen 5 bis 9 zu ermitteln.

Beim Lösen des Differentialgleichungssystems (2) für die oben genannten Ketten ist zu beachten, dass für das zu bestimmende sowie auch für jedes andere in der Kette berücksichtigte Nuklid sämtliche in den Tabellen 5 bis 9 angegebenen Daten und damit alle erforderlichen Zerfalls- und Aufbaupfade berücksichtigt werden.

4.3.4 Gesamte Zerfallsleistung, P_Z

Die gesamte Zerfallsleistung $P_Z(t_A, t_B)$ berechnet sich aus der Summe der Zerfallsleistung der Spaltprodukte (siehe 4.3.2) und der Zerfallsleistung der Actinide und von aus Neutroneneinfangreaktionen in Spaltprodukten entstandenen Nukliden (siehe 4.3.3) nach Gleichung (5) in 4.3.1.

4.4 Unsicherheit, ΔP_Z

Die Unsicherheit ΔP_Z der gesamten Zerfallsleistung P_Z wird aus den Unsicherheiten ΔP_S von P_S (siehe 4.3.2) und ΔP_R (siehe 4.3.3) von P_R , dem vorliegenden Berechnungsverfahren und der relativen Unsicherheit in der thermischen Brennstoffleistung während des Betriebs ($\Delta P/P$) nach Gleichung (12) ermittelt.

$$\Delta P_Z(t_A, t_B) = n \cdot \sqrt{\Delta P_S^2(t_A, t_B) + \Delta P_R^2(t_A, t_B) + P_Z^2(t_A, t_B) \cdot \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2} \quad (12)$$

Dabei ist n das zur gewählten statistischen Sicherheit gehörende Vielfache der Standardabweichung.

Die Unsicherheit ΔP_S berechnet sich für $t_A \geq 1$ s nach den Gleichungen (13) und (14).

$$\Delta P_S(t_A, t_B) = \sum_{i=1}^4 \sqrt{P_{S,i}^2(t_A, t_B) \cdot \left[\frac{\Delta Q_i}{Q_i}\right]^2 + \Delta P_{S,i}^2(t_A, t_B)} \quad (13)$$

mit $P_{S,i}(t_A, t_B)$ nach Gleichung (7) und

$$\Delta P_{S,i}(t_A, t_B) = \varepsilon \cdot \sum_{k=1}^m \left[R_{ik} \cdot \sum_{j=1}^{24} \frac{\beta_{ij}}{\lambda_{ij}} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{ij} \Delta t_{B,k}}\right) \cdot e^{-\lambda_{ij} t_{A,k}} \right] \quad (14)$$

mit R_{ik} nach Gleichung (9).

Die Unsicherheit ΔP_S berechnet sich für $t_A < 1$ s nach Gleichung (15).

$$\Delta P_S(t_A, t_B) = P_S(t_A, t_B) \cdot \frac{\Delta P_S(t_A = 1s, t_B)}{P_S(t_A = 1s, t_B)} \quad (15)$$

Die Unsicherheit ΔP_R berechnet sich nach Gleichung (16).

$$\Delta P_R(t_A, t_B) = 0,05 \cdot \left(1 + \frac{t_A}{t_A + 5 \cdot 10^5 \text{ s}}\right) \cdot P_R(t_A, t_B) \quad (16)$$

Tabelle 2 — Gesamte thermisch nutzbare Energie Q_i aus einer Kernspaltung des spaltbaren Nuklids i zur Anwendung in Gleichung (4) sowie die entsprechenden Unsicherheiten ΔQ_i

i	spaltbares Nuklid Tabellen 8 und 9	$Q_{\text{eff},i}$ ^a MeV		Q_{c,v_i} ^b MeV		Q_i MeV	ΔQ_i MeV
1	^{235}U	193,7	+	8,7	=	202,4	$\pm 0,5$
2	^{238}U	198,1	+	10,9	=	209,0	$\pm 1,0$
3	^{239}Pu	199,9	+	11,5	=	211,4	$\pm 0,7$
4	^{241}Pu	202,0	+	11,9	=	213,9	$\pm 0,7$
5 - 19	alle anderen ^c	200,0	+	10,0	=	210,0	
^a $Q_{\text{eff},i}$ gesamte thermische Energiefreisetzung aus einer Kernspaltung des spaltbaren Nuklids i mit Berücksichtigung der Energie nachfolgender Spaltproduktzerfälle ^b Q_{c,v_i} thermisch nutzbarer Anteil der freigesetzten Energie aus nicht zu einer Spaltung führenden Neutroneneinfängen. Dabei wurde von einer LWR-typischen mittleren Energie pro Einfang von 6,1 MeV ausgegangen. Dieser Wert kann gegebenenfalls vom Benutzer reaktorbezogen verändert werden ^c alle anderen spaltbaren Nuklide dienen ausschließlich der Neutronenflussberechnung und tragen auch hier nur einen sehr kleinen Beitrag bei, so dass sie nicht genauer angegeben zu werden brauchen							

Tabelle 3 — Koeffizienten für die thermische Spaltung der spaltbaren Nuklide ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu und ^{241}Pu (siehe Gleichungen (8), (10) und (14))

$i = 1$ (^{235}U)				$i = 2$ (^{238}U)			
j	α_{ij} MeV/s	β_{ij} MeV/s	λ_{ij} 1/s	j	α_{ij} MeV/s	β_{ij} MeV/s	λ_{ij} 1/s
1	5,7798E-01	8,5000E-02	8,3602E-01	1	3,6000E-01	1,4827E-01	4,3427E+00
2	2,9233E-02	5,0000E-03	4,5552E-01	2	4,0000E-01	6,0046E-02	1,7114E+00
3	3,3504E-01	2,0000E-02	3,0573E-01	3	1,6000E+00	1,7336E-01	6,4000E-01
4	1,9666E-01	6,8830E-03	1,4005E-01	4	5,2820E-01	4,6803E-02	1,9429E-01
5	5,8224E-02	2,0378E-03	5,5000E-02	5	1,4805E-01	1,2693E-02	6,9788E-02
6	2,6312E-02	7,8936E-04	3,6808E-02	6	4,5980E-02	3,1217E-03	1,8809E-02
7	2,7805E-02	6,9512E-04	1,2740E-02	7	1,0406E-02	5,6858E-04	6,1265E-03
8	3,8308E-03	5,7462E-05	3,5465E-03	8	1,6991E-03	9,2954E-05	1,3799E-03
9	1,2670E-03	5,0681E-05	1,0225E-03	9	6,9102E-04	2,7983E-05	5,2799E-04
10	3,1953E-04	1,2781E-05	4,9374E-04	10	1,4736E-04	9,3826E-06	1,6145E-04
11	1,9473E-04	4,8683E-06	1,8792E-04	11	2,4049E-05	1,5548E-06	4,8419E-05
12	3,2537E-05	8,1342E-07	5,4988E-05	12	6,9288E-06	3,4341E-07	1,5644E-05
13	7,6749E-06	1,9187E-07	2,0958E-05	13	6,4927E-07	2,2147E-08	5,3610E-06
14	2,5232E-06	5,4362E-08	1,0010E-05	14	4,3556E-07	1,6135E-08	2,1689E-06
15	4,9948E-07	1,0741E-08	2,5438E-06	15	1,6020E-07	5,5423E-09	6,3343E-07
16	1,8531E-07	3,6042E-09	6,6361E-07	16	2,3089E-08	7,9486E-10	1,2879E-07
17	2,6608E-08	5,3327E-10	1,2286E-07	17	2,5481E-09	1,0833E-10	2,5604E-08
18	2,2398E-09	4,4836E-11	2,7185E-08	18	3,5071E-11	4,0752E-12	9,1544E-09
19	8,9582E-12	1,7916E-13	3,2955E-09	19	6,3399E-11	2,8283E-12	7,3940E-10
20	8,5968E-11	1,7194E-12	7,4225E-10	20	4,1599E-14	2,5992E-15	2,4731E-10
21	2,1072E-14	6,9386E-15	2,4681E-10	21	5,3295E-16	0,0000E+00	1,9594E-13
22	7,1219E-16	1,5167E-17	1,5596E-13	22	1,6695E-18	0,0000E+00	6,4303E-14
23	8,1126E-17	0,0000E+00	2,2573E-14	23	4,1058E-16	0,0000E+00	6,4229E-14
24	9,4678E-17	0,0000E+00	2,0503E-14	24	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00 ^a

^a Bei Gleichungen in denen durch λ_{ij} geteilt wird, sollte λ_{ij} auf einen sehr kleinen Wert (z. B. 10^{-20}) gesetzt werden.

Tabelle 3 (fortgesetzt)

$i = 3$ (^{239}Pu)				$i = 4$ (^{241}Pu)			
j	α_{ij} MeV/s	β_{ij} MeV/s	λ_{ij} 1/s	j	α_{ij} MeV/s	β_{ij} MeV/s	λ_{ij} 1/s
1	5,4912E-01	-9,0874E-04	4,7905E+00	1	0,0000E+00	1,0000E+00	3,0000E+00
2	-8,6543E-01	-3,3073E-02	1,9751E+00	2	6,9719E-01	6,5249E-02	1,0220E+00
3	8,9528E-01	4,6767E-02	9,4315E-01	3	4,9499E-01	3,3081E-02	2,8135E-01
4	2,5627E-01	1,1635E-02	1,9264E-01	4	1,4422E-01	3,9065E-03	1,0920E-01
5	6,7895E-02	2,0805E-03	7,2747E-02	5	6,2519E-02	1,9898E-03	4,2857E-02
6	3,0835E-02	1,1528E-03	2,3154E-02	6	2,9637E-02	8,6499E-04	1,4286E-02
7	8,9278E-03	8,0447E-05	1,1478E-02	7	4,9236E-03	1,5426E-04	5,1913E-03
8	4,0592E-03	1,4718E-04	5,2372E-03	8	7,0004E-04	9,0135E-05	1,5686E-03
9	1,5314E-03	2,5159E-05	1,4875E-03	9	8,4058E-04	-5,4954E-05	1,3508E-03
10	7,1292E-04	1,8579E-05	5,3342E-04	10	6,8995E-04	2,8044E-05	5,3526E-04
11	1,4320E-04	5,8054E-06	1,7300E-04	11	1,5700E-04	7,5404E-06	1,6360E-04
12	1,7650E-05	8,6957E-07	4,8810E-05	12	1,4249E-05	7,3317E-07	4,0227E-05
13	7,3470E-06	3,6735E-07	2,0060E-05	13	2,0466E-07	0,0000E+00	1,6578E-05
14	1,7470E-06	8,7505E-08	8,3190E-06	14	4,5041E-06	2,3042E-07	1,5289E-05
15	5,4810E-07	2,7385E-08	2,3580E-06	15	9,8277E-07	4,9643E-08	7,6113E-06
16	1,6710E-07	8,3577E-09	6,4500E-07	16	5,1832E-07	2,5916E-08	2,5083E-06
17	2,1160E-08	1,0580E-09	1,2822E-07	17	2,3018E-08	1,1509E-09	1,1312E-06
18	2,9388E-09	1,4694E-10	2,5166E-08	18	1,5817E-07	7,9085E-09	6,2987E-07
19	1,3659E-10	6,8295E-12	1,3176E-08	19	1,8074E-08	9,0370E-10	1,3149E-07
20	5,7450E-11	2,8725E-12	7,3568E-10	20	3,6922E-09	1,8461E-10	2,4237E-08
21	3,8422E-14	1,9211E-15	2,4663E-10	21	5,3843E-11	2,6922E-12	9,6433E-09
22	1,8030E-16	9,0150E-18	3,3490E-13	22	5,3003E-11	2,6502E-12	7,3467E-10
23	1,8342E-15	1,8342E-16	1,8761E-13	23	4,8358E-14	2,4179E-15	2,4827E-10
24	1,9884E-16	3,9768E-17	3,1544E-14	24	9,8516E-16	5,0000E-17	1,6873E-13

Tabelle 4 — In Gleichung (11) zu berücksichtigende Radionuklide

Nuklidliste	Art	Nuklid
1	Radionuklide aus Neutroneneinfangreaktionen in Spaltprodukten	$^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{140}La , ^{148}Pm , $^{148\text{m}}\text{Pm}$, ^{154}Eu , ^{156}Eu
2	Actinide	^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{237}U , ^{238}U , ^{239}U , ^{237}Np , ^{238}Np , ^{239}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{243}Pu , ^{241}Am , ^{242}Am , ^{243}Am , ^{244}Am , ^{242}Cm , ^{244}Cm