

Berechnung der Nachzerfallsleistung der Kernbrennstoffe von Hochtemperaturreaktoren mit kugelförmigen Brennelementen

DIN
25 485

Decay heat power in nuclear fuels of high-temperature reactors with spherical fuel elements

Die Nachzerfallsleistung von Kernbrennstoffen ist die nach der Abschaltung eines Kernreaktors durch radioaktiven Zerfall der Spalt- und Aktivierungsprodukte des Kernbrennstoffes erzeugte thermische Leistung. Sie ist eine wichtige physikalische Größe für die Auslegung von Systemen, bei denen die Nachzerfallsleistung als Wärmequelle zu berücksichtigen ist.

Diese Norm liefert die Grundlage für die Berechnung der Nachzerfallsleistung von nichtrezykliertem Kernbrennstoff von Hochtemperaturreaktoren mit kugelförmigen Brennelementen. Dabei werden folgende Anteile berücksichtigt:

- der Beitrag der Spaltprodukte aus Kernspaltungen,
- der Beitrag der Aktiniden,
- der Beitrag von Isotopen, die durch Neutroneneinfang in Spaltprodukten entstehen.

Die Norm gibt die lokale Erzeugung der Nachzerfallsleistung 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. Ihre Ermittlung wird dem Benutzer überlassen.

Die Leistungserzeugung aufgrund verzögerter Neutronen und aktivierten Strukturmaterials ist nicht Gegenstand der Norm.

Das hier genormte Rechenverfahren bietet den Vorteil, ohne aufwendige Rechenprogramme und umfangreiche Datenbibliotheken die Nachzerfallsleistung mit einer den Summationsprogrammen vergleichbaren Genauigkeit zu berechnen. Wegen des durch die Norm abgedeckten weiten Parameterbereiches der Reaktorauslegung sind die für einzelne Beiträge zur Nachzerfallsleistung entwickelten Gleichungen verhältnismäßig umfangreich.

Zur Berechnung der Nachzerfallsleistung oder einzelner Beiträge dürfen vom Anwender eigene Rechenmethoden und Datensammlungen verwendet werden, sofern deren Gültigkeit nachgewiesen wird.

Für den Beitrag der Spaltprodukte ist dazu ein Vergleich mit der Norm erforderlich.

Inhalt

	Seite		Seite
1 Anwendungsbereich	1	3.4.1 Beitrag von ^{239}U und ^{239}Np	5
2 Begriffe und Formelzeichen	1	3.4.2 Beitrag der übrigen Aktiniden	5
2.1 Nachzerfallsleistung	1	3.5 Beitrag durch Neutroneneinfang in Spaltprodukten	7
2.2 Betriebszeit	2	3.5.1 Beitrag des ^{134}Cs	7
2.3 Abklingzeit	2	3.5.2 Beitrag restlicher Einfangreaktionen	7
2.4 Leistungshistogramm	2	3.6 Totale Nachzerfallsleistung	7
2.5 Liste der verwendeten Formelzeichen	2	4 Tabellen	8
3 Nachzerfallsleistung	3	Anhang A Gültigkeitsbereich für die Näherungsgleichungen	10
3.1 Allgemeines	3	Anhang B Anwendungsbeispiel	10
3.2 Leistungshistogramm	3	Zitierte Normen	13
3.3 Beitrag der Spaltprodukte	3	Erläuterungen	13
3.4 Beitrag der Aktiniden	5		

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für graphitmoderierte gasgekühlte Hochtemperaturreaktoren (HTR), die mit kugelförmigen Brennelementen mit einem Kernbrennstoffgemisch aus ^{235}U und ^{238}U beladen werden.

Die Anwendung auf rezyklierten Kernbrennstoff ist nicht zulässig. Die Berechnungsvorschriften gelten für Abklingzeiten von 0 s bis 10^9 s (etwa 30 Jahre).

Anmerkung: Bei der Benutzung der optional angegebenen Näherungsgleichungen ist der in Anhang A angegebene Gültigkeitsbereich zu beachten.

2 Begriffe und Formelzeichen

2.1 Nachzerfallsleistung

Die Nachzerfallsleistung von Kernbrennstoffen ist die nach der Abschaltung eines Kernreaktors durch radioaktiven Zerfall der Spalt- und Aktivierungsprodukte des Kernbrennstoffs erzeugte thermische Leistung (aus: DIN 25 463 Teil 1/05.90).

Fortsetzung Seite 2 bis 13

Normenausschuß Kerntechnik (NKe) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

2.2 Betriebszeit

Die Betriebszeit des Kernbrennstoffs umfaßt die gesamte Zeit vom ersten Einsatz des Brennstoffs im Kernreaktor bis zur letzten betrachteten Abschaltung oder Ausschleusung (aus: DIN 25 463 Teil 1/05.90).

2.3 Abklingzeit

Die Abklingzeit ist die Zeit nach der Betriebszeit (aus: DIN 25 463 Teil 1/05.90).

2.4 Leistungshistogramm

Durch das Leistungshistogramm wird der reale bzw. anzunehmende zeitliche Verlauf der Leistung in Intervalle mit konstanter Leistung der betrachteten spaltbaren Isotope unterteilt (aus: DIN 25 463 Teil 1/05.90).

2.5 Liste der verwendeten Formelzeichen

i	—	Index zur Kennzeichnung der spaltbaren Isotope ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu
j	—	Summationsindex für die Darstellung der Nachzerfallsleistung durch eine Summe von Exponentialfunktionen
k	—	Index zur Numerierung der einzelnen Zeitintervalle im Leistungshistogramm
m	—	Anzahl der Zeitintervalle T_k im Leistungshistogramm
α_{ij}	$\frac{\text{MeV/s}}{\text{Spaltung}}$	Koeffizienten zur Darstellung der Nachzerfallsleistung der Spaltprodukte als Summe von 24 Exponentialfunktionen
β_{ij}	$\frac{\text{MeV/s}}{\text{Spaltung}}$	Koeffizienten zur Darstellung der Standardabweichung der Nachzerfallsleistung der Spaltprodukte als Summe von 24 Exponentialfunktionen
λ_{ij}	1/s	Exponenten zur Darstellung der Nachzerfallsleistung der Spaltprodukte und deren Standardabweichung als Summe von 24 Exponentialfunktionen
$A(t)$	—	Faktor, der auf die Nachzerfallsleistung der Spaltprodukte P_S anzuwenden ist, um den Beitrag P_A der Aktiniden (außer ^{239}U und ^{239}Np) zu berechnen
$f_i(t)$	$\frac{\text{MeV/s}}{\text{Spaltung}}$	Nachzerfallsleistung der Spaltprodukte zur Zeit t nach einer einzelnen Kernspaltung des spaltbaren Isotops i
$\Delta f_i(t)$	$\frac{\text{MeV/s}}{\text{Spaltung}}$	Standardabweichung (1σ) von $f_i(t)$
$F_i(t_k, T_k)$	$\frac{\text{MeV/s}}{\text{Spaltung/s}}$	Nachzerfallsleistung der Spaltprodukte des spaltbaren Isotops i zur Zeit t_k nach Ende eines Zeitintervalls T_k , bezogen auf eine Spaltung je s
$\Delta F_i(t_k, T_k)$	$\frac{\text{MeV/s}}{\text{Spaltung/s}}$	Standardabweichung (1σ) von $F_i(t_k, T_k)$
$H(t)$	—	Faktor, der auf die Nachzerfallsleistung der Spaltprodukte P_S anzuwenden ist, um den Beitrag P_E durch Neutroneneinfang in Spaltprodukten (außer in ^{133}Cs) zu berechnen.
P_k	1)	Gesamte thermische Leistung des Brennstoffs während des k -ten Zeitintervalls T_k
P_{ik}		Beitrag des spaltbaren Isotops i zur thermischen Leistung des Brennstoffs während des k -ten Zeitintervalls T_k
$P_N(t, T)$		Totale Nachzerfallsleistung zur Zeit t nach Ende der Betriebszeit T
$P_S(t, T)$		Gesamte Nachzerfallsleistung aufgrund von Spaltproduktzerfällen
$\Delta P_S(t, T)$		Standardabweichung (1σ) von $P_S(t, T)$
$P_{Si}(t, T)$	wie P_k	Beitrag des spaltbaren Isotops i zur Nachzerfallsleistung $P_S(t, T)$
$\Delta P_{Si}(t, T)$		Standardabweichung (1σ) von $P_{Si}(t, T)$
$P_E(t, T)$		Beitrag durch Neutroneneinfang in Spaltprodukten (außer in ^{133}Cs) zur Nachzerfallsleistung
$P_{Cs}(t, T)$		Beitrag des ^{134}Cs zur Nachzerfallsleistung
$P_B(t, T)$		Beitrag der Aktiniden ^{239}U und ^{239}Np zur Nachzerfallsleistung
$P_A(t, T)$		Beitrag der Aktiniden (außer ^{239}U und ^{239}Np) zur Nachzerfallsleistung
Q_i	$\frac{\text{MeV}}{\text{Spaltung}}$	Gesamte thermische Energiefreisetzung aus einer Kernspaltung des spaltbaren Isotops i
ΔQ_i	$\frac{\text{MeV}}{\text{Spaltung}}$	Standardabweichung (1σ) der thermischen Energiefreisetzung aus einer Kernspaltung des spaltbaren Isotops i
SM	g/Kugel	Mittlerer Schwermetallgehalt unter Einbeziehung brennstofffreier Kugeln

1) Beliebige Leistungseinheit

t	s	Abklingzeit (Begriff siehe Abschnitt 2.3 und Bild 1)
t_k	s	Zeit seit Ende des k -ten Zeitintervalls T_k im Leistungshistogramm (siehe Bild 1)
T	s	Betriebszeit (Begriff siehe Abschnitt 2.2 und Bild 1)
T_k	s	Dauer des k -ten Zeitintervalls im Leistungshistogramm (siehe Bild 1)

Anmerkung: Weitere Formelzeichen sind in den entsprechenden Abschnitten erklärt.

3 Nachzerfallsleistung

3.1 Allgemeines

Zur Berechnung der Nachzerfallsleistung werden folgende Anteile berücksichtigt:

- der Beitrag der Spaltprodukte aus Kernspaltungen der vier Isotope ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu und ^{241}Pu . Andere spaltbare Isotope werden wie ^{235}U behandelt.
- der Beitrag der Aktiniden.
- der Beitrag von Isotopen, die durch Neutroneneinfang in Spaltprodukten entstehen.

3.2 Leistungshistogramm

Während der Betriebszeit ändern sich die Zusammensetzung und die Leistung des zu betrachtenden Brennstoffs. Gründe dafür sind:

- das Durchlaufen der Brennelemente durch die verschiedenen Leistungszonen des Reaktors,
- die mögliche Änderung der Gesamtleistung und
- der Auf- und Abbau von spaltbaren Isotopen.

Dies läßt sich bei der Berechnung der Nachzerfallsleistung dadurch berücksichtigen, daß die Betriebszeit in Zeitintervalle mit konstanter Leistung und konstanten Leistungsbeiträgen der spaltbaren Isotope unterteilt wird, d. h., der reale Verlauf der Leistung wird durch eine Treppenfunktion angeglichen (Leistungshistogramm). Dabei ist darauf zu achten, daß der durch die Approximation verursachte systematische Fehler klein bleibt gegenüber dem statistischen Fehler der berechneten Nachzerfallsleistung. Dies läßt sich dadurch erreichen, daß eine möglichst gute Approximation der Brennstoffleistung am Ende der Betriebszeit angestrebt wird. Da der Fehler, der durch die Approximation der Leistung im Leistungshistogramm verursacht wird, mit zunehmender Abklingzeit rasch abnimmt, kann die Genauigkeit der Approximation in den einzelnen Intervallen mit zunehmendem Abstand t_k des Intervalls k vom betrachteten Abklingzeitpunkt abnehmen. Da eine Änderung in den relativen Leistungsbeiträgen der spaltbaren Isotope einen geringeren Einfluß auf die Nachzerfallsleistung hat als eine Änderung in der Betriebsleistung, genügt hierfür häufig eine gröbere Einteilung. Es ist darauf zu achten, daß in jedem Zeitintervall des Leistungshistogramms das Zeitintegral der tatsächlichen Leistung eines spaltbaren Isotops mit dem der approximierten übereinstimmt.

3.3 Beitrag der Spaltprodukte

Der Beitrag P_S der Spaltprodukte zur Nachzerfallsleistung berechnet sich aus den einzelnen Beiträgen $P_{Si}(t, T)$ der vier spaltbaren Isotope

$$P_S(t, T) = \sum_{i=1}^4 P_{Si}(t, T) \quad (1)$$

Jeder Beitrag $P_{Si}(t, T)$ setzt sich wiederum aus der Summe der Nachzerfallsleistungen der m Zeitintervalle des Leistungshistogramms zusammen

$$P_{Si}(t, T) = \sum_{k=1}^m P_{Si}(t_k, T_k) = \sum_{k=1}^m \frac{P_{ik}}{Q_i} \cdot F_i(t_k, T_k) \quad (2)$$

P_{ik} ist die thermische Leistung, die durch Spaltung freigesetzt wird. Q_i ist die gesamte, durch eine einzelne Spaltung freigesetzte thermisch nutzbare Energie, die in Tabelle 1 angegeben ist. P_{ik}/Q_i gibt die Spaltrate des spaltbaren Isotops i an.

$F_i(t_k, T_k)$ ist die auf eine Kernspaltung je s bezogene Nachzerfallsleistung der Spaltprodukte des spaltbaren Isotops i für ein Zeitintervall der Dauer T_k und für eine Abklingzeit t_k . Sie berechnet sich aus der Energiefreisetzung $f_i(t)$ der Spaltprodukte einer einzelnen Spaltung zur Zeit t nach der Spaltung zu

$$F_i(t_k, T_k) = \int_0^{T_k} f_i(T_k - T' + t_k) \cdot dT' \quad (3)$$

$f_i(t)$ wird mit den in Tabelle 2 angegebenen Koeffizienten α_{ij} , λ_{ij} wie folgt berechnet

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^{24} \alpha_{ij} \cdot e^{-\lambda_{ij} \cdot t} \quad (4)$$

Damit ergibt sich

$$F_i(t_k, T_k) = \sum_{j=1}^{24} \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} \cdot (1 - e^{-\lambda_{ij} \cdot T_k}) \cdot e^{-\lambda_{ij} \cdot t_k} \quad (5)$$

Der Beitrag P_S der Spaltprodukte zur Nachzerfallsleistung ergibt sich also zu

$$P_S(t, T) = \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^m \left[\frac{P_{ik}}{Q_i} \sum_{j=1}^{24} \left[\frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} (1 - e^{-\lambda_{ij} \cdot T_k}) e^{-\lambda_{ij} \cdot t_k} \right] \right] \quad (6)$$

Zur Veranschaulichung der Nomenklatur zeigt Bild 1 ein Leistungshistogramm mit vier Zeitintervallen unterschiedlicher Leistung für das spaltbare Isotop i.

Für die Nachzerfallsleistungsbeiträge $P_{Si}(t, T)$ berechnen sich die einzelnen t_k zu

$$t_m = t, \quad t_{m-1} = t + T_m, \quad t_1 = t + \sum_{k=2}^m T_k \quad (7)$$

Der relative Fehler (Standardabweichung) der Nachzerfallsleistung $\Delta P_{Si}/P_{Si}$ der Spaltprodukte berechnet sich aus der Standardabweichung $\Delta F_i(t_k, T_k)$ und der relativen Standardabweichung $\Delta Q_i/Q_i$.

Für den Beitrag des spaltbaren Isotops i gilt

$$\left[\frac{\Delta P_{Si}}{P_{Si}} \right]^2 = \left[\frac{\Delta Q_i}{Q_i} \right]^2 + \left[\frac{\sum_{k=1}^m \frac{P_{ik}}{Q_i} \Delta F_i(t_k, T_k)}{P_{Si}} \right]^2 \quad (8)$$

Die Werte Q_i und ΔQ_i sind in Tabelle 1 angegeben. Die Standardabweichung $\Delta F_i(t_k, T_k)$ wird wie folgt berechnet

$$\Delta F_i(t_k, T_k) = \int_0^{T_k} \Delta f_i(T_k - T' + t_k) dT' \quad (9)$$

wobei für die $\Delta f_i(t)$ eine zu Gleichung (4) analoge Darstellung angesetzt wird, deren Koeffizienten λ_{ij} , β_{ij} in Tabelle 2 angegeben sind

$$\Delta f_i(t) = \sum_{j=1}^{24} \beta_{ij} \cdot e^{-\lambda_{ij} \cdot t} \quad (10)$$

Damit berechnet sich $\Delta F_i(t_k, T_k)$ für die Abklingzeiten

$$t_k \geq 1 \text{ s:} \quad \Delta F_i(t_k, T_k) = \sum_{j=1}^{24} \frac{\beta_{ij}}{\lambda_{ij}} \cdot (1 - e^{-\lambda_{ij} \cdot T_k}) \cdot e^{-\lambda_{ij} \cdot t_k} \text{ bzw.} \quad (11)$$

$$t_k < 1 \text{ s:} \quad \Delta F_i(t_k, T_k) = \frac{F_i(t_k, T_k)}{F_i(t_k = 1 \text{ s}, T_k)} \Delta F_i(t_k = 1 \text{ s}, T_k) \quad (12)$$

Die Standardabweichung ΔP_S der Nachzerfallsleistung aller Spaltprodukte berechnet sich aus

$$|\Delta P_S| = \sum_{i=1}^4 |\Delta P_{Si}| \quad (13)$$

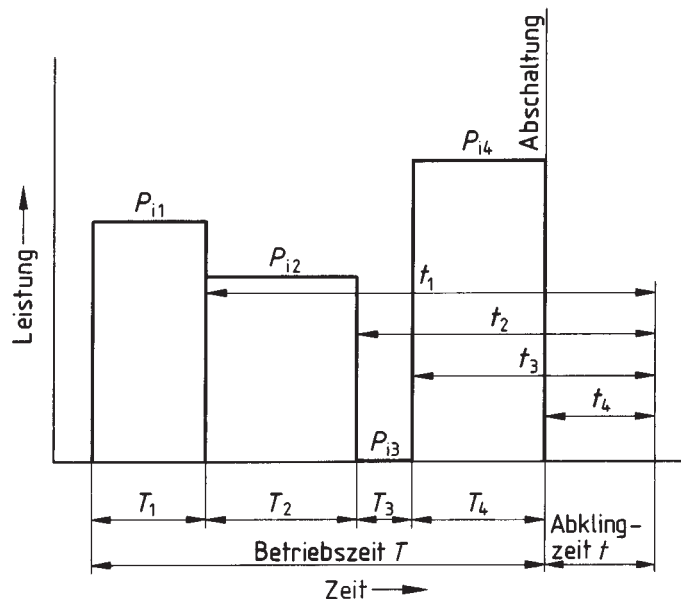


Bild 1. Leistungshistogramm