DK 615.849.52 : 616-073.75 : 539.125.5.04
: 614.876 : 001.4

DEUTSCHE NORM

November 1991

Neutronendosimetrie

Spezielle Begriffe und Benennungen

DIN 6802 Teil 1

Neutron dosimetry; special terms and definitions

Ersatz für die im Oktober 1985 zurückgezogene Ausgabe 06.78

Aufgestellt vom Normenausschuß Radiologie im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. in Arbeitsgemeinschaft mit der Deutschen Röntgengesellschaft.

Diese Norm enthält speziell für die Neutronendosimetrie eingeführte Begriffe und Benennungen. Soweit diese Begriffe bereits in den auf Seite 11 aufgeführten Normen definiert sind, wurden sie wörtlich oder sinngemäß übernommen.

Strahlungsfeldgrößen und Dosisgrößen werden wie in DIN 6814 Teil 2 und Teil 3 als Differentialquotienten definiert. Der stochastischen Natur der Strahlung und ihrer Wechselwirkung ist dadurch Rechnung getragen, daß jeder Differentialquotient als Grenzwert des statistischen Erwartungswertes des entsprechenden Differenzenquotienten aufzufassen ist*). Die vorliegende Norm beschränkt sich somit auf die Definition nichtstochastischer Strahlungsfeldgrößen und Dosisgrößen. Mikrodosimetrische Größen werden nicht behandelt.

Inhalt

1 Klassifikation der Neutronen nach Energiebereichen

Unter der Neutronenenergie E wird in dieser Norm die kinetische Energie eines Neutrons, d. h. seine Energie ausschließlich der Ruheenergie verstanden.

In der Neutronendosimetrie ist es zweckmäßig, Neutronen entsprechend ihrer Energie E zu klassifizieren:

$E \leq 0{,}5$ eV	langsame Neutronen*)
$0{,}5$ eV $< E \leq 10$ keV	intermediäre Neutronen
10 keV $< E \leq 20$ MeV	schnelle Neutronen
$E > 20$ MeV	hochenergetische Neutronen

Thermische Neutronen sind Neutronen, deren kinetische Energien mit den kinetischen Energien der Atome des umgebenden Materials im thermischen Gleichgewicht stehen.

*) Siehe Erläuterungen

2 Strahlungsfeldgrößen für Neutronen

2.1 Neutronenflußdichte

Die Neutronenflußdichte φ ist der Differentialquotient $\frac{\mathrm{d}^2N}{\mathrm{d}A\,\mathrm{d}t}$.

Dabei ist d^2N die Anzahl der Neutronen, die in dem Zeitelement $\mathrm{d}t$ in eine kleine Kugel mit der Querschnittsfläche $\mathrm{d}A$ eintreten.

$$\varphi = \frac{\mathrm{d}^2N}{\mathrm{d}A\,\mathrm{d}t}$$

Eine andere Benennung für Neutronenflußdichte ist Neutronenfluenzrate (in Anlehnung an ICRU 33 (neutron fluence rate)).

2.2 Neutronenfluenz

Die Neutronenfluenz Φ ist das Integral der Neutronenflußdichte über eine Zeitspanne t_1 bis t_2.

$$\Phi = \int_{t_1}^{t_2} \varphi\,\mathrm{d}t$$

Fortsetzung Seite 2 bis 12

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

2.3 Energieflußdichte der Neutronen

Die Energieflußdichte der Neutronen ψ ist der Differentialquotient $\frac{d^2 W}{dA\, dt}$.

Dabei ist d^2W die Summe der Energien der Neutronen, die in dem Zeitelement dt in eine kleine Kugel mit der Querschnittsfläche dA eintreten.

$$\psi = \frac{d^2 W}{dA\, dt}$$

Eine andere Benennung für Energieflußdichte ist Energiefluenzrate, in Anlehnung an ICRU 33 (energy fluence rate).

2.4 Energiefluenz der Neutronen

Die Energiefluenz der Neutronen Ψ ist das Integral der Energieflußdichte ψ über eine Zeitspanne t_1 bis t_2.

$$\Psi = \int_{t_1}^{t_2} \psi\, dt$$

2.5 Energie- und Richtungsverteilung der Neutronen*)

2.5.1 Spektrale Neutronenflußdichte

Die spektrale Neutronenflußdichte φ_E (Verteilung der Neutronenflußdichte φ in bezug auf die Energie E der Neutronen) ist der Differentialquotient $\frac{d\varphi\,(E)}{dE}$. Dabei ist $d\varphi(E)$ die Flußdichte aller Neutronen, deren Energie in dem infinitesimalen Energieintervall zwischen E und $E + dE$ liegt.

$$\varphi_E = \frac{d\varphi\,(E)}{dE}$$

Die spektrale Neutronenflußdichte (spektrale Fluenzrate der Neutronen) φ_E ist eine Funktion der Energie. Die Neutronenflußdichte ist das Integral ihrer spektralen Verteilung über alle Energien von Null bis Unendlich:

$$\varphi = \int_0^\infty \varphi_E\, dE$$

Der Anteil $\varphi\,(E_1, E_2)$ aller Neutronen mit Energien zwischen E_1 und E_2 an der Neutronenflußdichte ist die Gruppenflußdichte:

$$\varphi\,(E_1, E_2) = \int_{E_1}^{E_2} \varphi_E\, dE$$

Die relative spektrale Neutronenflußdichte ist der Quotient $\frac{\varphi_E}{\varphi}$.

Spektrale Verteilungen werden auch für andere Größen, wie z. B. Neutronenfluenz, Energieflußdichte und Energiefluenz der Neutronen, definiert. Die spektrale Energieflußdichte ψ_E ist gleich dem Produkt aus der Energie E der Neutronen und der spektralen Neutronenflußdichte φ_E, die spektrale Energiefluenz Ψ_E gleich dem Produkt aus E und der spektralen Neutronenfluenz Φ_E.

$$\Phi_E = \frac{d\Phi(E)}{dE}; \qquad \Phi(E) = \int_0^E \Phi_E\, dE; \qquad \Phi = \int_0^\infty \Phi_E\, dE$$

$$\psi_E = \frac{d\psi(E)}{dE} = E\varphi_E; \qquad \psi(E) = \int_0^E \psi_E\, dE; \qquad \psi = \int_0^\infty \psi_E\, dE$$

$$\Psi_E = \frac{d\Psi(E)}{dE} = E\Phi_E; \qquad \Psi(E) = \int_0^E \Psi_E\, dE; \qquad \Psi = \int_0^\infty \Psi_E\, dE$$

2.5.2 Richtungsverteilung der Neutronenflußdichte

Die Richtungsverteilung der Neutronenflußdichte (raumwinkelbezogene Neutronenflußdichte) $\varphi_\Omega\,(\vartheta,\alpha)$ ist der Differentialquotient $\frac{d\varphi(\vartheta,\alpha)}{d\Omega}$. Dabei ist $d\varphi(\vartheta,\alpha)$ die Neutronenflußdichte aller Neutronen, deren Richtungen innerhalb des Raumwinkelelementes $d\Omega = \sin\vartheta\, d\vartheta\, d\alpha$ liegen.

$$\varphi_\Omega(\vartheta,\alpha) = \frac{d\varphi(\vartheta,\alpha)}{d\Omega}$$

Die Richtungsverteilung der Neutronenflußdichte ist somit eine Funktion der Richtungswinkel, d. h. des Polarwinkels ϑ und des Azimutalwinkels α. Der Anteil $\varphi(\Omega)$ aller Neutronen mit Richtungen innerhalb des Raumwinkels Ω ist:

$$\varphi(\Omega) = \int_\Omega \varphi_\Omega\, d\Omega$$

Der Anteil $\varphi(\vartheta_1, \vartheta_2)$ aller Neutronen mit Richtungen zwischen zwei Kreiskegeln mit den Öffnungswinkeln ϑ_1 und ϑ_2 ist in einem in bezug auf deren Achse symmetrischen Strahlenfeld

$$\varphi(\vartheta_1, \vartheta_2) = 2\pi \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \varphi_\Omega(\vartheta)\, \sin\vartheta\, d\vartheta$$

Die Neutronenflußdichte ist das Integral der Richtungsverteilung über alle Richtungen des Raumes:

$$\varphi = \int_{4\pi} \varphi_\Omega\, d\Omega$$

2.6 Neutronenstrom, Energiestrom

2.6.1 Neutronenstromdichte

Die Neutronenstromdichte $\vec{j}$ ist ein Vektor, dessen Komponente in Richtung einer Flächennormalen

$$j_n = \int_{4\pi} \varphi_\Omega(\vartheta, \alpha)\cos\vartheta\, d\Omega = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} \varphi_\Omega(\vartheta, \alpha)\cos\vartheta \sin\vartheta\, d\vartheta\, d\alpha$$

ist. Dabei ist ϑ der Winkel zwischen der Flächennormalen und dem Raumwinkelelement $d\Omega$ und α der Azimutalwinkel. Wegen des Faktors $\cos\alpha$ werden bei der Neutronenstromdichte diejenigen Neutronen positiv gezählt, die ein Flächenelement mit einer Richtungskomponente in den Halbraum durchsetzen, in den die Flächennormale weist (positive Richtung). Die Neutronen, die das Flächenelement in negativer Richtung durchsetzen, werden negativ gezählt. Daher ist in einem isotropen Strahlungsfeld (φ_Ω = const.) die Neutronenstromdichte $j = 0$, während die Flußdichte den positiven Wert $\varphi = 4\pi\varphi_\Omega$ hat. Die Stromdichte derjenigen Neutronen, die das Flächenelement in positiver Richtung durchsetzen, hat in diesem Fall die Normalkomponenten $j_{n+} = \varphi/4$ in positiver Richtung und $j_{n-} = -\varphi/4$ in negativer Richtung. Bei einseitiger isotroper Emission aus einer Fläche*) ist die Normalkomponente der Neutronenstromdichte gleich $\varphi/2$. Im Fall gleichgerichteter (unidirektionaler) Geschwindigkeiten der Neutronen ist die Flußdichte gleich dem Betrag der Stromdichte in Geschwindigkeitsrichtung.

2.6.2 Neutronenstrom

Der Neutronenstrom I durch eine Fläche A ist

$$I = \int_A j_n dA = \int_A \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} \varphi_\Omega(\vartheta, \alpha) \cos\vartheta \sin\vartheta\, d\vartheta\, d\alpha\, dA$$

Der aus ein- und austretenden Neutronen resultierende Strom durch eine geschlossene Fläche, deren Normale nach außen zeigt, ist gleich der zeitlichen Abnahme der Neutronenzahl innerhalb eines von der Fläche umschlossenen quellenfreien*) Volumens:

$$\oint j_n dA = -\frac{dN}{dt}$$

*) Siehe Erläuterungen

Der einseitige Strom derjenigen Neutronen, die eine Fläche in der positiven Richtung durchsetzen, ist

$$I_+ = \int_A j_{n+} \mathrm{d}A = \int_A \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varphi_\Omega(\vartheta, \alpha) \cos\vartheta \sin\vartheta \, \mathrm{d}\vartheta \, \mathrm{d}\alpha \, \mathrm{d}A$$

Der entgegengesetzt gerichtete einseitige Strom ist

$$I_- = \int_A j_{n-} \mathrm{d}A = \int_A \int_0^{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \varphi_\Omega(\vartheta, \alpha) \cos\vartheta \sin\vartheta \, \mathrm{d}\vartheta \, \mathrm{d}\alpha \, \mathrm{d}A$$

2.6.3 Energiestromdichte

Die Energiestromdichte der Neutronen $\vec{g}$ ist ein Vektor, dessen Komponente g_n in Richtung einer Flächennormalen

$$g_n = \int_{4\pi} \Psi_\Omega(\vartheta, \alpha) \cos\vartheta \, \mathrm{d}\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \Psi_\Omega(\vartheta, \alpha) \cos\vartheta \sin\vartheta \, \mathrm{d}\vartheta$$

ist. Dabei ist

$$\Psi_\Omega = \frac{\mathrm{d}\Psi(\vartheta, \alpha)}{\mathrm{d}\Omega}$$

die raumwinkelbezogene Energieflußdichte der Neutronen.

2.6.4 Energiestrom

Der Energiestrom der Neutronen G durch eine Fläche A ist das Integral

$$G = \int_A g_n \mathrm{d}A .$$

Der einseitige Energiestrom, der eine Fläche in der positiven Richtung durchsetzt, ist

$$G_+ = \int_A g_{n+} \mathrm{d}A = \int_A \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \psi_\Omega(\vartheta, \alpha) \cos\vartheta \sin\vartheta \, \mathrm{d}\vartheta \, \mathrm{d}\alpha \, \mathrm{d}A.$$

Der entgegengesetzt gerichtete einseitige Strom ist

$$G_- = \int_A g_{n-} \mathrm{d}A = \int_A \int_0^{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \psi_\Omega(\vartheta, \alpha) \cos\vartheta \sin\vartheta \, \mathrm{d}\vartheta \, \mathrm{d}\alpha \, \mathrm{d}A.$$

2.7 Anzahldichte

Ist $\mathrm{d}N$ die Teilchenanzahl im Volumenelement $\mathrm{d}V$, so ist die Anzahldichte n der Differentialquotient $\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}V}$.

$$n = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}V}$$

Anmerkung: Mit Hilfe von Indizes unterscheidet man z.B.

n_n = Anzahldichte der Neutronen

n_a = Anzahldichte der Atome

n_{av} = Anzahldichte der Atome des Nuklids v.

Die Anzahldichte der Atome n_a ist: $n_a = N_A \frac{\varrho}{M}$

N_A ist die Avogadrokonstante, ϱ ist die Dichte und M ist die molare Masse.

2.8 Neutronenquellstärke

Die Quellstärke B der Neutronen ist der Differentialquotient $\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}$.

Dabei ist $\mathrm{d}N$ die Anzahl der Neutronen, die in dem Zeitelement $\mathrm{d}t$ durch die Oberfläche einer Neutronenquelle austreten.

$$B = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}$$

2.9 Spektrale Neutronenquellstärke

Die spektrale Neutronenquellstärke B_E ist der Differentialquotient $\frac{\mathrm{d}B(E)}{\mathrm{d}E}$.

Dabei ist $\mathrm{d}B(E)$ die Quellstärke aller Neutronen, deren Energie in dem infinitesimalen Energieintervall zwischen E und $E + \mathrm{d}E$ liegt:

$$B_E = \frac{\mathrm{d}B(E)}{\mathrm{d}E}$$

2.10 Richtungsverteilung der Neutronenquellstärke

Die Richtungsverteilung B_Ω der Neutronenquellstärke in bezug auf die Ausbreitungsrichtung ist der Differentialquotient

$$\frac{\mathrm{d}B(\vartheta, \alpha)}{\mathrm{d}\Omega}$$

Dabei ist $\mathrm{d}B(\vartheta, \alpha)$ die Quellstärke für alle Neutronen, deren Richtung innerhalb des Raumwinkelelementes $\mathrm{d}\Omega = \sin\vartheta \, \mathrm{d}\vartheta \, \mathrm{d}\alpha$ liegt, sowie ϑ der Polarwinkel und α der Azimutalwinkel.

$$B_\Omega = \frac{\mathrm{d}B(\vartheta, \alpha)}{\mathrm{d}\Omega}$$

2.11 Spektrale Flußdichte thermischer Neutronen

Die spektrale Flußdichte φ_E^{th} thermischer Neutronen wird beschrieben durch die als MAXWELL-Verteilung bekannte Funktion:

$$\varphi_E^{th} = \varphi^{th} \frac{E}{(kT)^2} \mathrm{e}^{-\frac{E}{kT}}$$

Dabei ist φ^{th} die Flußdichte thermischer Neutronen, k die BOLTZMANN-Konstante und T die Temperatur.

Diese Form der Verteilung gilt näherungsweise auch, wenn das thermische Gleichgewicht nicht ganz erreicht ist. In diesen Fällen kann die Verteilung durch einen von der Temperatur der umgebenden Materie abweichenden Parameter T_n (Neutronentemperatur) beschrieben werden.

2.12 Konventionelle Flußdichte langsamer Neutronen*)

Die konventionelle Flußdichte ψ_0 ist definiert durch

$$\varphi_0 = \int \sqrt{E_0 / E} \, \varphi_E(E) \, \mathrm{d}E$$

wobei $E_0 = 0{,}0253$ eV die wahrscheinlichste Energie einer MAXWELL-Verteilung bei $T_0 = 239{,}59$ K (wahrscheinlichste Neutronengesschwindigkeit $v_0 = 2200 \, \mathrm{ms}^{-1}$) ist.

3 Wechselwirkung von Neutronen und geladenen Teilchen mit Materie

3.1 Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt σ eines Atomkerns für eine bestimmte Wechselwirkung mit Neutronen ist die Querschnittsfläche einer den Atomkern umgebenden hypothetischen Kugel von solcher Größe, daß die mittlere Anzahl von Neutronen, die diese Kugel treffen, gleich der mittleren Anzahl der mit dem Kern stattfindenden Wechselwirkungsprozesse der betreffenden Art ist.

Die SI-Einheit des Wirkungsquerschnitts ist das Quadratmeter m^2). Eine gebräuchliche Einheit ist das Barn (Einheitenzeichen b). 1 b = 10^{-28} m^2.

---

*) Siehe Erläuterungen