

**DIN ISO 8529-1
(VDE 0412-8529-1)**
DIN

Diese Norm ist zugleich eine **VDE-Bestimmung** im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.

VDE

ICS 17.240

Einsprüche bis 2020-12-23

Entwurf
**Neutronen-Referenzstrahlungsfelder –
Teil 1: Charakteristika und Verfahren zur Erzeugung
(ISO/DIS 8529-1:2020);
Text Deutsch und Englisch**

Reference neutron radiations fields –
Part 1: Characteristics and methods of production
(ISO/DIS 8529-1:2020);
Text in German and English

Rayonnements neutroniques de référence –
Partie 1: Caractéristiques et méthodes de production
(ISO/DIS 8529-1:2020);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-10-23 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe 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 dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

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 58 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE
DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR)

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist ...

Inhalt	Seite
Nationales Vorwort.....	4
Vorwort.....	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Neutronen-Referenzstrahlungsfelder mit breitem Spektrum, die mit Radionuklidquellen erzeugt werden.....	8
4.1 Einleitung.....	8
4.2 Charakteristika von Kalibrierquellen.....	8
4.2.1 Arten	8
4.2.2 Quellenform und Quellenumhüllung.....	10
4.2.3 Photonenkomponente des Neutronenfelds.....	10
4.2.4 Energieverteilung der Emissionsrate der Neutronenquelle.....	11
4.2.5 Von einer Neutronenquelle erzeugte Neutronen-Flussdichte	11
4.2.6 Bestimmung der Emissionsrate der Neutronenquelle.....	12
4.2.7 Bestrahlungseinrichtung.....	13
5 Neutronen-Referenzstrahlungsfelder zur Bestimmung des Ansprechvermögens von Neutronenmessgeräten als Funktion der Neutronenenergie	13
5.1 Einleitung.....	13
5.2 Allgemeine Eigenschaften.....	13
5.3 Mit Teilchenbeschleunigern erzeugte Neutronen-Referenzstrahlungsfelder	14
5.3.1 Allgemeine Anforderungen.....	14
5.3.2 Energie von geladenen Teilchen.....	14
5.3.3 Neutronenspektrum.....	15
5.3.4 Parasitärer und gestreuter Neutronenuntergrund	15
5.3.5 Messung und Monitoring der Neutronenfluenz	16
5.4 Mit Reaktoren erzeugte Neutronen-Referenzstrahlungsfelder.....	16
5.4.1 Allgemeine Anforderungen.....	16
5.4.2 Erzeugung und Monitoring	16
6 Thermische Neutronen-Referenzstrahlungsfelder	16
Anhang A (normativ) Tabellarische und grafische Darstellung der Neutronenspektren für Radionuklidquellen	18
A.1 Tabellarische Darstellung der Daten	18
A.2 Grafische Darstellung	18
Anhang B (informativ) Charakteristika der D ₂ O-moderierten ²⁵² Cf-Quellen	24

Anhang C (informativ) Winkelabhängigkeit der Emissionsrate von Neutronen-Radionuklidquellen.....	26
Anhang D (normativ) Richtiger Wert der Flussdichte thermischer Neutronen	29
Literaturhinweise	30

Bilder

Bild 1 – Koordinatensystem für den Fall einer anisotrop emittierenden Quelle	12
Bild A.1 – Neutronenspektrum aus einer D ₂ O-moderierten ²⁵² Cf-Spontanspaltungsquelle	22
Bild A.2 – Neutronenspektrum aus einer ²⁵² Cf-Spontanspaltungsquelle	22
Bild A.3 – Neutronenspektrum einer ²⁴¹ Am-Be(α,n)-Quelle („kleine“ und „große“ Quelle)	23
Bild B.1 – Neutronenspektrum der D ₂ O-moderierten ²⁵² Cf-Quelle in 100 cm Entfernung vom Zentrum der Quelle in der Äquatorialebene im Vakuum für Werte der D ₂ O-Reinheit von 95 % bis 100 %	25
Bild C.1 – Winkelabhängigkeit der Emissionsrate einer kleinen ²⁵² Cf-Spontanspaltungsquelle (äußere Abmessungen: 7,8 mm Durchmesser und 10 mm Höhe), normiert auf die Winkelabhängigkeit der Emissionsrate der äquivalenten Punktquelle $B/4\pi$. Das ²⁵² Cf-Material liegt in Form einer Drahtlegierung vor, die innerhalb der Kapsel mit Hilfe einer inneren Spule zentriert wurde.	26
Bild C.2 – Winkelabhängigkeit der Emissionsrate einer kleinen ²⁴¹ Am-Be(α,n)-Quelle (äußere Abmessungen: 7,8 mm Durchmesser und 10 mm Höhe), normiert auf die Winkelabhängigkeit der Emissionsrate der äquivalenten Punktquelle $B/4\pi$	27

Tabellen

Tabelle 1 – Neutronen-Referenz-Radionuklidquellen zur Kalibrierung von Neutronenmessgeräten	10
Tabelle 2 – Neutronenstrahlungen zur Bestimmung des Ansprechvermögens von Neutronenmessgeräten als Funktion der Neutronenenergie	14
Tabelle A.1 – Werte der gruppierten Quellenemissionsrate für eine D ₂ O-moderierte ²⁵² Cf-Spontanspaltungsquelle	19
Tabelle A.2 – Werte der gruppierten Quellenemissionsrate für eine ²⁵² Cf-Spontanspaltungsquelle	20
Tabelle A.3 – Werte der gruppierten Quellenemissionsrate für „kleine“ und „große“ ²⁴¹ Am-Be(α,n)-Quellen	21
Tabelle B.1 – Änderungen im D ₂ O-moderierten ²⁵² Cf-Feld als Folge kleiner Schwankungen der D ₂ O-Reinheit und konstruktiver Details	24
Tabelle C.1 – Winkelabhängigkeit der Quellstärke bei 0°, 90° (normalerweise verwendete Richtung) und 180°, normiert auf die Winkelabhängigkeit der Quellstärke der äquivalenten Punktquelle $B/4\pi$, für verschiedene Quellenbauarten	28

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument ISO/DIS 8529-1:2020 „Reference neutron radiation fields – Part 1: Characteristics and methods of production“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die ISO erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen ISO-Text.

Das internationale Dokument wurde vom ISO/TC 85/SC 2 „Radiological protection“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und den nationalen Mitgliedern zur Stellungnahme und Abstimmung vorgelegt.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium GK 852 „Strahlenschutzdosimeter“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de), Gemeinschaftsgremium mit dem DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnichtsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DKE (www.dke.de) und DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von ISO Technischen Komitees durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Themen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Im Besonderen sollten die für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten notwendigen Annahmekriterien beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der empfangenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname wird als Information zum Nutzen der Anwender angegeben und stellt keine Anerkennung dar.

Eine Erläuterung zum freiwilligen Charakter von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen, sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT) berücksichtigt, enthält der folgende Link www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom technischen Komitee ISO/TC 85, *Nuclear energy, nuclear technologies and radiological protection*, Unterkomitee SC 2, *Radiological protection*, erarbeitet.

Eine Liste aller Teile der Normenreihe ISO 6980 ist auf der ISO-Internetseite zu finden.

Neutronen-Referenzstrahlungsfelder – Teil 1: Charakteristika und Verfahren zur Erzeugung

Einleitung

Dies ist die erste einer Reihe von drei Internationalen Normen für die Kalibrierung von Dosimetern und Dosisleistungsmessgeräten für Neutronenstrahlung zu Strahlenschutz Zwecken. Sie beschreibt die Eigenschaften und Erzeugungsverfahren von Neutronen-Referenzstrahlungsfeldern, die für Kalibrierungen zu verwendenden sind. ISO 8529-2 beschreibt Grundlagen zu den physikalischen Größen, die das Strahlungsfeld charakterisieren, und Kalibrierverfahren in allgemeiner Form, wobei der Schwerpunkt auf aktiven Dosisleistungsmessgeräten und der Verwendung von Radionuklidquellen liegt. ISO 8529-3 befasst sich mit Dosimetern für die Orts- und Personendosisüberwachung und beschreibt die jeweiligen Verfahren zur Kalibrierung und Bestimmung des Ansprechvermögens in Bezug auf die Mess-Äquivalentdosisgrößen der Internationalen Kommission für Strahlungseinheiten und Messungen (en: International Commission on Radiation Units and Measurements) (ICRU). Umrechnungskoeffizienten zur Umrechnung der Neutronenfluenz in diese Mess-Äquivalentdosisgrößen sind in ISO 8529-3 angegeben.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument spezifiziert die Neutronen-Referenzstrahlungsfelder im Energiebereich von thermisch bis 20 MeV, die zur Kalibrierung von Neutronenmessgeräten für Strahlenschutz Zwecke und zur Bestimmung ihres Ansprechvermögens in Abhängigkeit von der Neutronenenergie verwendet werden.

Dieses Dokument befasst sich nur mit den Verfahren zur Erzeugung und Charakterisierung der Neutronen-Referenzstrahlungsfelder. Die Verfahren zur Anwendung dieser Strahlungsfelder für Kalibrierungen sind in ISO 8529-2 und ISO 8529-3 beschrieben:

Die spezifizierten Neutronen-Referenzstrahlungsfelder sind die folgenden:

- Neutronenfelder von Radionuklidquellen, einschließlich Neutronenfelder von Quellen in einem Moderator;
- Neutronenfelder, die durch Kernreaktionen mit geladenen Teilchen aus Beschleunigern erzeugt werden;
- Neutronenfelder von Reaktoren.

Aufgrund der Erzeugungs- und Anwendungsverfahren werden diese Neutronen-Referenzstrahlungsfelder für die Zwecke dieses Dokuments in die folgenden drei getrennten Abschnitte unterteilt.

- Im [Abschnitt 4](#) werden Radionuklid-Neutronenquellen mit breiten Spektren für die Kalibrierung von Neutronenmessgeräten spezifiziert. Diese Quellen sollten von Laboren verwendet werden, die sich mit der routinemäßigen Kalibrierung von Neutronenmessgeräten befassen, deren jeweilige Bauart bereits bauartgeprüft ist.
- Im [Abschnitt 5](#) werden beschleunigererzeugte monoenergetische Neutronen und reaktorerzeugte Neutronen mit breiten oder quasi-monoenergetischen Spektren zur Bestimmung des Ansprechvermögens von Neutronenmessgeräten in Abhängigkeit von der Neutronenenergie spezifiziert. Da diese Neutronen-Referenzstrahlungsfelder in spezialisierten und gut ausgestatteten Laboren erzeugt werden, wird nur ein Minimum an experimentellen Details angegeben.
- In [Abschnitt 6](#) werden die thermischen Neutronenfelder spezifiziert. Diese Felder können durch moderierte Radionuklidquellen, Beschleuniger oder Reaktoren erzeugt werden.

Für die Umrechnung der Neutronenfluenz in die für Strahlenschutz Zwecke empfohlenen Messgrößen wurden Konversionskoeffizienten berechnet, und zwar auf Grundlage der im normativen [Anhang A](#) dargestellten Spektren und unter Verwendung der Fluenz-zu-Mess-Äquivalentdosis-Konversionskoeffizienten, die in der ICRP-Publikation 74 und im ICRU-Bericht 57 als Funktion der Neutronenenergie angegeben sind.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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).

ISO 8529-2, *Reference neutron radiations – Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field*

ISO 8529-3, *Reference neutron radiations – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of response as a function of energy and angle of incidence*

ICRP Publication 74, *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, Annals of the ICRP, Vol. 26, No.3/4 (1996)*

ICRU-Bericht 85a:2011, *Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation (Revised)*

ICRU-Bericht 51:1993, *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*

ICRU-Bericht 57:1998, *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiation*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe in **ISO 29661** und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC führen unter den folgenden Adressen Begriffs-Datenbanken zur Verwendung in Normen:

- ISO Online browsing platform: erreichbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: erreichbar unter <http://www.electropedia.org/>

3.1

Neutronenemissionsrate einer Neutronenquelle

B

(en: neutron emission rate of a neutron source)

Quotient dN^* durch dt , wobei dN^* der Erwartungswert der Anzahl der von der Quelle emittierten Neutronen in alle Richtungen im Zeitintervall dt ist

$$B = \frac{dN^*}{dt}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit der Neutronenemissionsrate ist s^{-1} .

3.2

Richtungsverteilung der Neutronenemissionsrate

Winkelverteilung der Neutronenemissionsrate

B_{Ω}^{N1}

(en: direction distribution of the neutron emission rate, angular distribution of the neutron emission rate)

Quotient dB durch $d\Omega$, wobei dB die Anzahl der Neutronen je Zeiteinheit ist, die sich innerhalb eines Raumwinkels $d\Omega$ um eine bestimmte Richtung ausbreiten

$$B_{\Omega} = \frac{dB}{d\Omega}$$

^{N1} Nationale Fußnote: Im englischen Original steht B_W , gemeint ist jedoch offensichtlich B_{Ω} . Aus dem W wird Ω , wenn statt Arial (oder Cambria) die Schriftart Symbol gewählt wird. Hier und an vielen weiteren Stellen und für viele andere Buchstaben (a statt α , g statt γ usw.) ist im englischen Original offensichtlich die Schriftart Symbol durch Arial (oder Cambria) ersetzt wurden, wodurch diese Vertauschungen erzeugt wurden. Da diese Vertauschungen aus dem Kontext klar ersichtlich sind, wurden sie bei der Übersetzung durch die beabsichtigten griechischen Buchstaben ersetzt.

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit der Richtungsverteilung der Neutronenemissionsrate ist $\text{s}^{-1} \times \text{sr}^{-1}$.

3.3

spektrale Neutronenemissionsrate

Energieverteilung der Neutronenemissionsrate

B_E

(en: spectral neutron emission rate, energy distribution of the neutron emission rate)

Quotient dB durch dE , wobei dB die Zunahme der Neutronenemissionsrate innerhalb des Energieintervalls zwischen E und $E + dE$ ist

$$B_E = \frac{dB}{dE}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit der spektralen Emissionsrate von Neutronen ist $\text{s}^{-1} \times \text{J}^{-1}$; eine häufig verwendete Einheit ist $\text{s}^{-1} \times \text{MeV}^{-1}$.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Benennungen „Spektrum“ und „Energieverteilung“ werden als gleichwertig betrachtet.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Emissionsrate B der Neutronenquelle wird wie folgt aus B_E bestimmt.

$$B = \int_0^{\infty} B_E dE$$

Anmerkung 4 zum Begriff: In einer Entfernung l von einer Punktquelle ist die Energieverteilung der Flussdichte φ_E aufgrund der isotrop von der Punktquelle emittierten Neutronen mit einer spektralen Neutronenemissionsrate B_E (unter Vernachlässigung des Einflusses der Luft und des umgebenden Materials) gegeben durch

$$\varphi_E = \frac{B_E}{4\pi l^2}$$

3.4

fluenzgemittelte Neutronenenergie

$\bar{E}$

(en: fluence-averaged neutron energy)

über die Energieverteilung der Fluenz gemittelte Neutronenenergie

$$\bar{E} = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\infty} E \cdot \Phi_E(E) dE$$

4 Neutronen-Referenzstrahlungsfelder mit breitem Spektrum, die mit Radionuklidquellen erzeugt werden

4.1 Einleitung

In diesem Abschnitt werden Neutronen-Referenzstrahlungsfelder von Neutronen-Radionuklidquellen spezifiziert, die besonders für die Kalibrierung von Neutronenmessgeräten geeignet sind (siehe ISO 8529-3).

Thermische Neutronenfelder sind durch moderierte Radionuklidquellen erzielbar, werden aber durch [Abschnitt 6](#) abgedeckt.

4.2 Charakteristika von Kalibrierquellen

4.2.1 Arten

Zur Erzeugung von Neutronen-Referenzstrahlungsfeldern müssen die in [Tabelle 1](#) angegebenen Neutronenquellen verwendet werden. Die in [Tabelle 1](#) angegebenen Zahlenwerte sind nur als Anhaltspunkt für die

Hauptmerkmale der Quellen zu verstehen, da die Eigenschaften einer bestimmten Quelle variieren, und zwar mit der Konstruktion der Quelle, aufgrund der Streuung und Absorption von Neutronen und γ -Strahlen sowie mit den Isotopenverunreinigungen der verwendeten radioaktiven Stoffe. Daher werden Einzelheiten der Quellenumhüllung (siehe 4.2.2) und die Methode zur Bestimmung der Anisotropie der Neutronenemission festgelegt (siehe 4.2.5).

^{252}Cf hat eine hohe spezifische Neutronenemissionsrate und ^{252}Cf -Quellen sind daher vergleichsweise klein. Wegen ihrer Halbwertszeit von 2,645 Jahren müssen sie regelmäßig ausgetauscht werden.

Die D_2O -moderierte ^{252}Cf -Quelle besteht im Idealfall aus einer punktförmigen ^{252}Cf -Quelle, die sich im Zentrum einer Schwerwasserkugel mit 300 mm Durchmesser befindet und erstens von einer Eisenhülle und zweitens einer Cadmiumhülle mit einer Dicke von 0,8 mm bzw. 1 mm umgeben ist. In der Praxis wurden in den Referenzlaboren eine Reihe von Konstruktionen entwickelt, die sich in konstruktiven Details leicht unterscheiden, dies betrifft z. B. die Führung zur Positionierung der Quelle im Kugelzentrum, das Material zur Aufnahme des Schwerwassers und die Struktur zur Aufhängung oder zum Fixieren der Moderatorkugel. Darüber hinaus hat jede Moderatoranordnung eine spezifische D_2O -Reinheit und eine ^{252}Cf -Quellkapsel. Die Erfahrung von Referenzlaboren zeigt, dass die Variabilität in der Konstruktion von D_2O -moderierten ^{252}Cf -Quellen zu nicht vernachlässigbaren Unterschieden in den erzeugten Neutronenspektren führt [1]. Labore sollten ihre D_2O -moderierten ^{252}Cf -Quellen durch Simulationen und spektrale Messungen charakterisieren. Die Spektren und spektral gemittelten Größen dieser Felder sollten durch Vergleiche überprüft werden. Ein repräsentatives Spektrum der D_2O -moderierten ^{252}Cf -Quelle wurde für die Zwecke dieser Norm durch Monte-Carlo-Simulationen abgeleitet. In diesem Modell werden 11,4 % der Neutronen der Quelle in der Moderatoranordnung absorbiert. Zu Einzelheiten siehe den informativen Anhang B.

^{241}Am -Be(α ,n)-Neutronenquellen enthalten, je nach Ausführung, geeignete Legierungen, Mischungen oder Verbindungen von Americium, wie z. B. eine komprimierte Mischung aus Americiumoxid und Beryllium.

Zusätzlich zu den in Tabelle 1 aufgeführten Quellen werden auch Quellen wie Am-B(α ,n), Pu-Li(α ,n), Pu-Be(α ,n) und Am-Li(α ,n) verwendet, sie werden aber in dieser Norm nicht speziell behandelt.

Tabelle 1 – Neutronen-Referenz-Radionuklidquellen zur Kalibrierung von Neutronenmessgeräten

Quelle	Halbwertszeit	Fluenzgemittelte Energie ^a	Typische Quellenemissionsrate ^c	Quotient Photonen- durch Neutronen-Umgebungs-Äquivalentdosisleistung ^b
	a ^d	MeV	s ⁻¹ · kg ⁻¹	
²⁵² Cf (D ₂ O moderiert)	2,645	0,57	2,1 · 10 ¹⁵	< 0,18 ^e
²⁵² Cf	2,645	2,13	2,4 · 10 ¹⁵	0,05 ^f
			s ⁻¹ Bq ⁻¹	
²⁴¹ Am-Be(α,n)	432,6			
Kleine Quelle ^g		4,17	66,6 · 10 ⁻⁵	< 0,03 ^h
Große Quelle		4,05		

^a Die Definition der fluenzgemittelten Neutronenenergie ist in 3.4 angegeben.

^b Berechnet auf der Grundlage der in Anhang A angegebenen Neutronenspektren und der in ICRU-Bericht 57 angegebenen Konversionskoeffizienten.

^c Für ²⁵²Cf-Quellen ist die spezifische Emissionsrate auf die Masse des Kaliforniums bezogen. Für die ²⁴¹Am-Be Quellen ist sie auf die ²⁴¹Am-Aktivität bezogen. Informationen zu den Quellen sind in den Literaturhinweisen [1] bis [3] für moderiertes ²⁵²Cf, Literaturhinweis [4] für ²⁵²Cf und den Literaturhinweisen [5] und [6] für ²⁴¹Am-Be angegeben.

^d 1 a = 1 mittleres Sonnenjahr = 31 556 926 s oder 365,242 20 Tage. Die Unsicherheit der Halbwertszeit von ²⁵²Cf und ²⁴¹Am beträgt etwa 0,1 [7].

^e Daten aus den Literaturhinweisen [3], [8].

^f Für etwa 2,5 mm dicke Stahluhüllungen. Das niederenergetische Gammaspektrum von ²⁵²Cf wird schon durch geringe Stahlmenngen abgeschirmt. Andere konstruktive Details werden das Verhältnis wahrscheinlich beeinflussen [9], [10].

^g Bezüglich der Definition von „kleinen“ und „großen“ ²⁴¹Am-Be-Quellen siehe Anhang A.

^h Für Quellen, die in einer etwa 2 mm dicken zusätzlichen Bleiabschirmung eingeschlossen sind, zu weiteren Informationen siehe 4.2.3.

4.2.2 Quellenform und Quellenumhüllung

Die Form der Quelle wäre idealerweise kugelförmig, aber die meisten praktischen Quellen sind zylindrisch. Im letzteren Fall ist es vorzuziehen, dass Durchmesser und Länge ungefähr gleich sind. Die Dicke der Umhüllung sollte gleichmäßig und klein im Vergleich zum Außendurchmesser sein. Bei einer ²⁴¹Am-Be(α,n)-Quelle hängt die spektrale Verteilung, hauptsächlich im Energiebereich unterhalb von etwa 2 MeV, bis zu einem gewissen Grad von der Größe und der Zusammensetzung der Quelle ab [6]. Zu weiteren Einzelheiten siehe Anhang A.

Die Quellen sollten die Anforderungen der ISO 2919 an die Umhüllung [11] erfüllen.

4.2.3 Photonenkomponente des Neutronenfelds

Für ²⁵²Cf ist das Verhältnis von Photonen- zu Neutronen-Umgebungs-Äquivalentdosisleistung wegen der Bildung von γ-emittierenden Spaltprodukten vom Alter der Quelle sowie von der Umhüllung der Quelle abhängig. Der in Tabelle 1 angegebene Wert von 5 % bezieht sich auf neue Quellen. In den ersten 20 Jahren wird dieser Wert wahrscheinlich unter 10 % bleiben [9].

Die $^{241}\text{Am-Be}(\alpha,n)$ -Quelle kann mit einer Bleiabschirmung umhüllt werden. Eine Dicke von 2 mm reduziert den Quotienten von Photonen- durch Neutronen-Umgebungs-Äquivalentdosisleistung auf etwa 3 % [8], [9]. Dieses Verhältnis hängt nicht von der Am-Aktivität und der Umhüllung der Quelle ab. Die Bleiabschirmung erzeugt eine vernachlässigbare Änderung (weniger als 1 %) der Neutronen-Mess-Äquivalentdosisleistung. Ohne den Bleischild hängt der Quotient von Photonen- durch Neutronen-Umgebungs-Äquivalentdosisleistung (hauptsächlich von γ -Strahlen mit einer Energie von 59,5 keV) von der Konstruktion der Quelle ab. Basierend auf Daten im Literaturhinweis [9] nimmt das Verhältnis mit zunehmender physikalischer Größe der Quelle ab. Typische Werte für ungeschirmte Quellen sind 50 % für kleine Quellen (in der Größenordnung von 37 GBq), 30 % und 20 % für größere Quellen (370 GBq bzw. 555 GBq).

4.2.4 Energieverteilung der Emissionsrate der Neutronenquelle

Die Energieverteilungen der Neutronenemissionsrate für $^{241}\text{Am-Be}$ -, ^{252}Cf - und D_2O -moderierte ^{252}Cf -Quellen sind in [Anhang A](#) (Tabellen [A.1 bis A.3](#) und [Bilder A.1 bis A.3](#)) angegeben.

Für $^{241}\text{Am-Be}$ beziehen sich die in [Anhang A](#) angegebenen Neutronenspektren auf zwei Spektralkategorien, die als „kleine“ und „große“ Quellen bezeichnet werden. Während die „kleine“ Quelle für Americium-Aktivitäten bis etwa 37 GBq gelten kann, kann die „große“ Quelle für 370 GBq und darüber gelten.

Für die ^{252}Cf - oder D_2O -moderierte ^{252}Cf -Quellen sind die in [Anhang A](#) angegebenen Neutronenspektren diejenigen, die für dünn umhüllte Quellen empfohlen sind (siehe [4.2.2](#)). Im Falle dicker Umhüllung können sich die Spektren erheblich ändern.

Das Spektrum der D_2O -moderierten ^{252}Cf -Quelle wird auch durch die Konstruktionsdetails der moderierenden Kugel und die D_2O -Reinheit beeinflusst (siehe informativer [Anhang B](#)).

Die spektral gemittelten Fluenz-zu-Mess-Äquivalentdosis-Konversionskoeffizienten, h_ϕ , können aus den verwendeten Spektren abgeleitet werden:

$$h_\phi = \frac{1}{\phi} \int_0^\infty h_\phi(E) \Phi_E dE$$

Dabei wird Φ_E als proportional zu BE angenommen und $h_\phi(E)$ ist der energieabhängige Fluenz-zu-Mess-Äquivalentdosis-Konversionskoeffizient.

4.2.5 Von einer Neutronenquelle erzeugte Neutronen-Flussdichte

Die von einer Neutronenquelle erzeugte Flussdichte wird in erster Linie von der Emissionsrate der Neutronenquelle und dem Abstand zwischen dem Zentrum der Quelle und dem Prüfort bestimmt. Neutronenquellen zeigen im Allgemeinen eine anisotrope Neutronenemission in einem Koordinatensystem, das im geometrischen Zentrum der Quelle fixiert ist. Bei zylindrischen Quellen hängt die Richtungsverteilung der Quellen-Emissionsrate, B_Ω , in einer Richtung Ω , die durch die Winkel θ und α charakterisiert ist (siehe [Bild 1](#)), nicht merklich vom Azimutwinkel α , sondern nur vom Winkel θ ab.

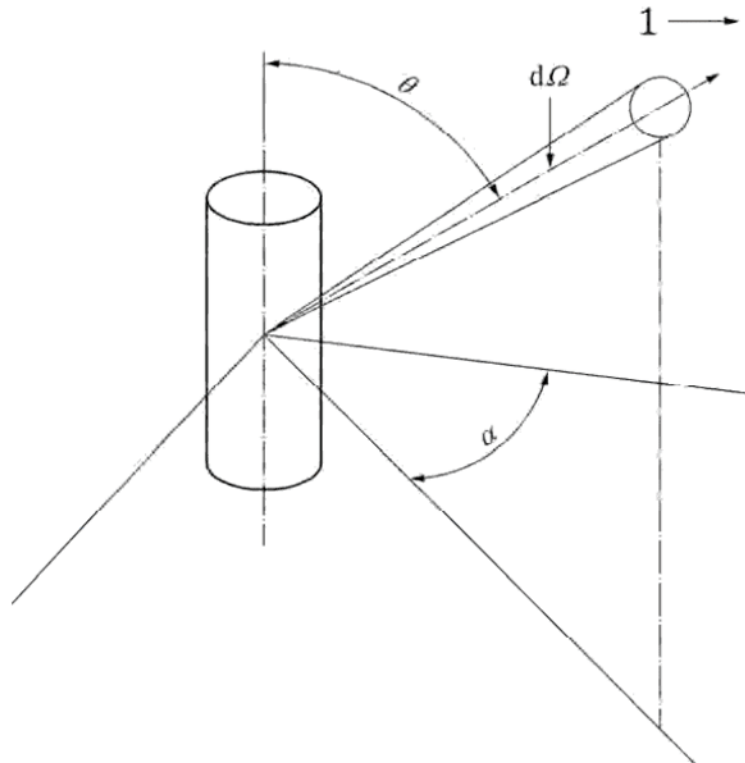
Da sich die Richtungsverteilung der Quell-Emissionsrate $dB/d\Omega$ für $\theta = 90^\circ$ am wenigsten ändert, sollte diese Richtung für Kalibrierungen verwendet werden. Die Neutronenquellenstärke, B , und ihre Richtungsverteilung, $dB/d\Omega$, müssen in der für Kalibrierungen verwendeten Richtung bestimmt werden (siehe auch informativer [Anhang C](#)).

Zur Bestimmung der Richtungsverteilung [12] sollte die Messeinrichtung den kleinsten Raumwinkel erfassen, der mit der Erzielung guter Statistik vereinbar ist, und eine ausreichend kleine Energieabhängigkeit des Fluenz-Ansprechvermögens aufweisen, um eine Empfindlichkeit gegenüber Änderungen der Energie mit dem Winkel zu vermeiden. Anisotropiemessungen sollten um den Beitrag der gestreuten Neutronen korrigiert werden.

Ist dies geschehen, kann die Neutronen-Flussdichte in einem Abstand l vom Zentrum der Quelle in einer Richtung, für die $\theta = 90^\circ$ ist, wie folgt angenommen werden:

$$\varphi(l, 90^\circ) = \frac{dB}{d\Omega} \times \frac{1}{l^2}$$

Die aus diesem Ausdruck erhaltene Neutronen-Flussdichte muss noch um die Luftschwächung und die Streuung an Luft und am umgebenden Material korrigiert werden. Diese Korrekturen, die nur in Ausnahmefällen vernachlässigbar sind, sind in ISO 8529-2 ausführlich beschrieben.



Legende

1 Richtung Ω

Bild 1 – Koordinatensystem für den Fall einer anisotrop emittierenden Quelle

4.2.6 Bestimmung der Emissionsrate der Neutronenquelle

Die Emissionsrate von $^{241}\text{Am-Be}(\alpha, n)$ - und ^{252}Cf -Quellen muss vor der Verwendung durch ein Referenzlabor gemessen werden. Referenzlabore können die Emissionsrate von Neutronenquellen im Allgemeinen mit einer relativen Standardunsicherheit von etwa 1,5 % ($k = 1$) messen.

Bei Americium-Beryllium-Quellen besteht die Möglichkeit, dass sich die Bestandteile mit der Zeit gegeneinander verschieben, was zu einer Änderung der Emissionsrate der Neutronenquelle führt.

Die Quellen-Emissionsrate einer ^{252}Cf -Quelle ist um den radioaktiven Zerfall auf täglicher Basis zu korrigieren. Es ist wichtig, den Zerfall aller Komponenten der Quelle, einschließlich ^{250}Cf und ^{248}Cm , in verfügbaren ^{252}Cf -Quellen zu berücksichtigen [7]. Daher muss der Hersteller eine Bescheinigung über die Isotopenzusammensetzung vorlegen.

Es wird empfohlen, dass alle Neutronenquellen alle fünf Jahre neu kalibriert werden. Für ^{252}Cf -Quellen, von denen aufgrund der Kombination von ^{250}Cf und ^{248}Cm erwartet wird, dass sie mehr als 5 % Neutronenemission aufweisen, sollte die Rekalibrierung häufiger erfolgen.

4.2.7 Bestrahlungseinrichtung

In der Regel haben Bestrahlungsräume zur Abschirmung dicke Wände (z. B. Beton). In diesem Fall sollten die Innenmaße so groß wie praktisch möglich sein. Die Größe der Korrektur für raum- und luftgestreute Neutronen und die daraus resultierende Unsicherheit der Feldgrößen hängen entscheidend von der Raumgröße ab. In allen Fällen kann die Wirkung der gestreuten Neutronen durch Messungen mit einem Schattenkegel und Untersuchungen von Abweichungen von der $1/l^2$ -Beziehung charakterisiert werden (wobei l der Abstand zwischen Neutronenquelle und Detektor ist). Einzelheiten zu den empfohlenen Kalibrierverfahren werden in ISO 8529-2 behandelt.

5 Neutronen-Referenzstrahlungsfelder zur Bestimmung des Ansprechvermögens von Neutronenmessgeräten als Funktion der Neutronenenergie

5.1 Einleitung

In diesem Abschnitt werden Neutronen-Referenzstrahlungsfelder, die von Teilchenbeschleunigern und Kernreaktoren erzeugt werden, spezifiziert. Solche nahezu monoenergetischen Spektren können besonders geeignet sein, um das Ansprechvermögen von Neutronenmessgeräten als Funktion der Neutronenenergie zu bestimmen. Diese Felder können auch verwendet werden, um die Abhängigkeit des Ansprechvermögens von der Mess-Äquivalentdosisleistung und der Einfallsrichtung zu bestimmen. Die in diesem Abschnitt angegebenen Strahlungsfelder dürfen auch für die Kalibrierung von Neutronenmessgeräten verwendet werden.

Thermische Neutronenfelder sind an Reaktoren und durch Moderation von Neutronen aus Teilchenbeschleunigern oder Radionuklid-Neutronenquellen möglich, werden aber durch [Abschnitt 6](#) abgedeckt.

5.2 Allgemeine Eigenschaften

Die empfohlenen Neutronenenergien und die zu ihrer Erzeugung verwendeten Verfahren sind in [Tabelle 2](#) zusammen mit entsprechenden Hinweisen aufgeführt. Diese Energien wurden aus praktischen Gründen gewählt, u. a. wegen der Ausbeute, der gleichmäßigen Abstände in einer logarithmischen Energieskala, der Möglichkeit, sie auf vielfältige Weise zu realisieren, und der Verfügbarkeit von Daten aus internationalen Vergleichen.

Andere Energien können verwendet werden, sofern sie gut charakterisiert sind. Verfahren zur Erzeugung dieser Energien und zur Charakterisierung der Felder finden sich in den Literaturhinweisen [\[13\]](#) und [\[14\]](#).

Mit Beschleunigern kann der Energiebereich zwischen 2 keV und 19 MeV prinzipiell abgedeckt werden, mit Ausnahme des Bereichs der Lücke (6 MeV bis 13 MeV).

Die Erzeugung von monoenergetischen Neutronen bei 0° ist in der Regel vorteilhaft, da sie ein Maximum in der Ausbeute und ein Minimum in der Variation von Energie und Ausbeute mit dem Winkel aufweist. Es können aber auch Winkel größer als 0° verwendet werden [\[15\]](#), vorausgesetzt, dass spezifische Probleme berücksichtigt werden, wie der größere Beitrag der Streuung am Target, die starke Variation von Ausbeute und Energie mit dem Winkel und der erhöhte relative Photonenbeitrag.

Tabelle 2 – Neutronenstrahlungen zur Bestimmung des Ansprechvermögens von Neutronenmessgeräten als Funktion der Neutronenenergie

Neutronen-energie MeV	Erzeugungsverfahren	Referenzen (siehe Literaturhinweise)
0,002	Scandium-gefilterter Reaktorneutronenstrahl oder Beschleunigerneutronen aus der Reaktion $^{45}\text{Sc}(p,n)^{45}\text{Ti}$	[16]
0,008	Beschleunigerneutronen aus der Reaktion $^{45}\text{Sc}(p,n)^{45}\text{Ti}$	[17]
0,024 ^a	Stahl/Aluminium-gefilterter Reaktorneutronenstrahl oder Beschleunigerneutronen aus den Reaktionen $^{45}\text{Sc}(p,n)^{45}\text{Ti}$ und $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$. Durch Variation des Winkels kann $^{45}\text{Sc}(p,n)^{45}\text{Ti}$ sowohl 0,024 MeV als auch 0,027 MeV erzeugen. 0,0228-MeV-Neutronen können auch mittels einer $^{124}\text{Sb-Be}(\gamma,n)$ -Radionuklidquelle erzeugt werden	[15] bis [18] [19]
0,144 ^a	Silizium-gefilterter Reaktorneutronenstrahl oder Beschleunigerneutronen aus den Reaktionen $\text{T}(p,n)^3\text{He}$ und $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$	[16], [20], [21]
0,25 ^a	Beschleunigerneutronen aus den Reaktionen $\text{T}(p,n)^3\text{He}$ und $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$	} [20], [21]
0,565 ^a	Beschleunigerneutronen aus den Reaktionen $\text{T}(p,n)^3\text{He}$ und $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$	
1,2 ^a	Beschleunigerneutronen aus der Reaktion $\text{T}(p,n)^3\text{He}$	
2,5 ^a	Beschleunigerneutronen aus der Reaktion $\text{T}(p,n)^3\text{He}$	
2,8 ^{a, b}	Beschleunigerneutronen aus der Reaktion $\text{D}(d,n)^3\text{He}$	
5,0 ^a	Beschleunigerneutronen aus der Reaktion $\text{D}(d,n)^3\text{He}$	
14,8 ^{a, b}	Beschleunigerneutronen aus der Reaktion $\text{T}(d,n)^3\text{He}$	
19,0	Beschleunigerneutronen aus der Reaktion $\text{T}(d,n)^3\text{He}$	
^a Energien, bei denen internationale Vergleiche von Neutronenflussmessungen durchgeführt wurden [22] bis [24].		
^b Beschleunigerneutronen, mit Energie der Deuteronen bis zu einigen hundert keV.		

5.3 Mit Teilchenbeschleunigern erzeugte Neutronen-Referenzstrahlungsfelder

5.3.1 Allgemeine Anforderungen

Um Neutronen mit allen in Tabelle 2 angegebenen Energien zu erzeugen, ist ein Beschleuniger erforderlich, der Protonen und Deuteronen mit einer Energie von bis zu 3,5 MeV liefert. Für die Erzeugung von Neutronen mit Energien von 2,8 MeV und 14,8 MeV ist jedoch ein kleiner Beschleuniger mit einer Beschleunigungsspannung von bis zu einigen hundert Kilovolt ausreichend. Werden diese Neutronen zur Kalibrierung von Geräten verwendet, so müssen folgende Parameter ermittelt werden:

- die Energie geladener Teilchen;
- der Winkel relativ zum Strahl der geladenen Teilchen;
- Neutronenflussmessungen und -monitoring;
- Neutronenspektrum;
- Quellen von gestreuten und verunreinigenden Neutronen;
- Alter und Dicke des Targets.

5.3.2 Energie von geladenen Teilchen

Mit Hilfe von Computercodes oder aus Datenbanken wird die Energie der geladenen Teilchen ermittelt, die für eine vorgegebene Neutronenenergie erforderlich ist [20], [21].

Die Energie des einfallenden Strahls der geladenen Teilchen muss bestimmt werden. Zur Auswahl des Impulses des Teilchenstrahls kann ein stabilisierter Analysemagnet verwendet werden, der mit Hilfe einiger bekannter Schwellwerte von Kernreaktionen kalibriert wird. Der Energieverlust der geladenen Teilchen im Target muss bei der Berechnung der zur Erzeugung der gewünschten Neutronenenergie erforderlichen Beschussenergie berücksichtigt werden. Relevante Werte für das Bremsvermögen in verschiedenen Materialien sind in den Literaturhinweisen [25] und [26] zu finden.

5.3.3 Neutronenspektrum

Aufgrund von Energieverlusten im Target und anderen Einflüssen erzeugen beschleunigte geladene Teilchen unter einem gegebenen Winkel Neutronen mit einer schmalen, aber endlichen Energiebreite um die angegebene Bezugsenergie herum. Bei dünnen Targets [13] ist es nicht notwendig, diese Energieverteilung bei der Anwendung derjenigen Fluenz-zu-Mess-Äquivalentdosis-Konversionskoeffizienten zu berücksichtigen, die für die Berechnung der Mess-Äquivalentdosisgrößen verwendet werden. In diesem Fall werden die Konversionskoeffizienten für die „monoenergetischen“ Neutronen bei der angegebenen Energie verwendet.

Bei endothermen Reaktionen entstehen zwei Neutronengruppen nahe der Schwelle bezogen auf den einfallenden Protonenstrahl. Dies ist bei der $T(p,n)^3\text{He}$ -Reaktion der Fall, wenn sie unter 0° zur Erzeugung von Neutronen mit Energien von entweder 0,144 MeV oder 0,25 MeV verwendet wird. Um monoenergetische Neutronen dieser Energien zu erhalten, sollten größere Winkel der Neutronenemission verwendet werden, bei entsprechend höherer Energie der geladenen Teilchen. Bei der exothermen $T(d,n)$ -Reaktion müssen die Neutronen berücksichtigt werden, die durch die $D(d,n)$ -Reaktion mit niedrigerer Energie erzeugt werden, die durch die Deuteriumimplantation während der Bestrahlung entsteht, oder durch eine bereits vorhandene Kontamination des Tritiums durch Deuterium. Um die Auswirkungen der Deuteriumimplantation zu begrenzen, wird nicht empfohlen, die Verwendung desselben Targets für mehr als eine Energie mit der $T(d,n)$ -Reaktion zu verwenden.

Anregungszustände der Restkerne werden für Scandium und Lithium für unter 0° erzeugte Neutronen mit Energien über 0,053 MeV bzw. 0,65 MeV gebildet. Diese höheren Teilchenenergien sollten nur verwendet werden, wenn das Ansprechvermögen des Messgeräts auf die resultierende zusätzliche Gruppe von Neutronenenergien sowie die relative Intensität der Sekundärgruppe zu derjenigen der Primärgruppe bekannt sind.

5.3.4 Parasitärer und gestreuter Neutronenuntergrund

Der parasitäre und gestreute Neutronenuntergrund muss berücksichtigt werden:

- a) bei der Messung der Neutronenfluenz;
- b) beim Monitoring der Neutronenerzeugung;
- c) bei der Bewertung der Leistung des zu untersuchenden Messgeräts.

Um die Wirkung der gestreuten Neutronen zu verringern, muss der für die Messungen genutzte Raum möglichst groß gewählt werden (siehe 4.2.7).

Um den Einfluss des Untergrunds durch Neutronenstreuung auf eine Messung zu reduzieren, sollte möglichst ein Reaktionswinkel von 0° verwendet werden, und die Targetbaugruppe sollte eine möglichst geringe Masse haben.

Der Einfluss von parasitären neutronenerzeugenden Reaktionen im Target auf die Neutronenenergieverteilung muss bestimmt werden. Dies gilt auch für Neutronen, die in der Targetanordnung gestreut werden.

Der Untergrund, der sich aus Reaktionen des Strahls im Targetträger oder in dem Material ergibt, das zur Absorption des Reaktions-Elements verwendet wird, z. B. Titan bei Tritium- und Deuterium-Targets, kann mit „Blank Target“-Messungen berücksichtigt werden, bei denen ein nicht aktives Target mit den gleichen Konstruktionsdetails und Materialien bestrahlt wird. Die Streuung von Neutronen in der Targetanordnung wird am besten mit Berechnungen des Neutronentransports berücksichtigt.

Die Eigenschaften des Targets sollten durch Neutronenspektrometrie überwacht werden, um Tiefenprofile von Reaktions-Isotopen, Verunreinigungen und Deuteriumimplantation zu untersuchen [27].

5.3.5 Messung und Monitoring der Neutronenfluenz

Praktische Hinweise zur Messung der Neutronenfluenz finden sich im Literaturhinweis [14] und können von Neutronenreferenzlaboren erhalten werden. Zu den geeigneten Verfahren und Instrumenten können gehören:

- a) Zähler zur Messung von Rückstoßprotonen (wasserstoffgefüllte Proportionalzähler, Rückstoßprotonen-Teleskope, Szintillationsdetektoren);
- b) Aktivierung von Schwellen- und Resonanzdetektoren;
- c) Spaltfragmentdetektoren;
- d) Detektoren mit bekannter, kalibrierter Effizienz (z. B. ein Precision Long Counter).

Die Neutronenfluenz muss am Ort des zu kalibrierenden Messgeräts bestimmt werden. Während der Kalibrierung muss/müssen ein oder mehrere Fluenzmonitore an anderen Positionen verwendet werden [28]. Die Monitore zeigen dann die Fluenz am Ort der Kalibrierung an. Dabei muss die mögliche Störung der Monitoranzeige durch das Vorhandensein des Referenzgeräts oder des zu kalibrierenden Geräts zu berücksichtigt werden. Um diesen Effekt zu korrigieren, können „Freifeld“-Messungen erforderlich sein.

5.4 Mit Reaktoren erzeugte Neutronen-Referenzstrahlungsfelder

5.4.1 Allgemeine Anforderungen

Für die Kalibrierung müssen unidirektionale Neutronenstrahlen verwendet werden. Ist der Strahldurchmesser klein im Vergleich zu den Abmessungen des zu untersuchenden Messgeräts, kann eine Bestrahlung mit einem Breitstrahl durch geeignetes Abscannen des Messgeräts mit dem Strahl simuliert werden [29].

5.4.2 Erzeugung und Monitoring

Die Erzeugung quasi-monoenergetischer Neutronenstrahlungsfelder mittels gefilterter Reaktorneutronenstrahlen macht sich die Existenz tiefer relativer Minima in den Gesamt-Wirkungsquerschnitten bestimmter Materialien bei unterschiedlichen Energien zunutze (z. B. 0,002 MeV in Scandium, 0,024 MeV in Eisen und Aluminium und 0,144 MeV in Silizium). Es gibt noch weitere sogenannte „Neutronenfenster“ bei anderen Energien. Daher sollten Spektrumsmessungen der Neutronenstrahlungen durchgeführt werden, um die relative Intensität dieser Neutronengruppen zu bestimmen. Im Falle von Scandium (0,002 MeV) müssen die Filter in einem Strahlrohr tangential zum Reaktorkern angeordnet werden [16]. Die gleiche Geometrie kann auch für die anderen gefilterten Reaktorstrahlen vorteilhaft sein. Auch dann muss der Einfluss anderer Neutronengruppen berücksichtigt werden.

Für die Spektrometrie der Neutronenstrahlung können Rückstoß-Protonen-Proportionalzähler und ^3He -Proportionalzähler verwendet werden. Ein Bortrifluorid- oder ein ^3He -Proportionalzähler darf zur Messung der absoluten Flussdichte der Strahlen niedrigerer Energie (Neutronenergien von $E_n \leq 0,024$ MeV) und ein Rückstoß-Protonenzähler für Strahlen höherer Energie (Neutronenergien von $E_n > 0,024$ MeV) verwendet werden.

Als Monitore und Messgeräte zur Weitergabe können Bortrifluorid-Proportionalzähler oder ^3He -Proportionalzähler verwendet werden.

6 Thermische Neutronen-Referenzstrahlungsfelder

In diesem Abschnitt werden thermische Neutronen-Referenzstrahlungsfelder spezifiziert. Für die Zwecke dieser Norm werden Neutronen im Energiebereich unterhalb der Cadmium-Grenzenergie (entsprechend etwa 0,51 eV für 1 mm Cadmium [30]) als „thermisch“ bezeichnet.

Thermische Neutronen-Referenzstrahlungsfelder können durch die Moderation von Neutronen aus Radionuklidquellen [31] oder Teilchenbeschleunigern [32] oder durch Kernreaktoren [33] erzeugt werden.

Bestehende thermische Neutronenstrahlungsfelder unterscheiden sich hinsichtlich des Erzeugungsverfahrens, der konstruktiven Details, der Feldgröße, des Vorhandenseins unerwünschter Strahlung (Photonen, epithermale Neutronen) und der Energie- und Richtungsverteilung des Neutronenstrahlungsfelds. Ein Referenzlabor sollte so viel wie möglich über das thermische Feld wissen. Nachfolgend ist eine Reihe von Parametern aufgeführt, die spezifiziert werden sollten, um ein thermisches Feld als Referenzfeld zu qualifizieren:

- Erzeugungsverfahren, konstruktive Details und zeitliche Struktur des Strahls
- Methode zur Erzeugung des Standards
- Bezugspositionen
- Energie- und Richtungsverteilungen
- mittlere fluenzgewichtete Energie
- Fluenz und Mess-Äquivalentdosisleistung
- Feldhomogenität
- Anteil von epithermischen und unmoderierten Neutronen
- Photonen-Komponente
- Methoden zur Berücksichtigung von Feldveränderungen durch das zu bestrahlende Gerät

Die „richtige Flussdichte thermischer Neutronen“, ϕ_{th} ist die Größe, aus der sich die Mess-Äquivalentdosisleistung mit dem entsprechenden Konversionskoeffizienten h_{ϕ} bestimmen lässt.

Die richtige Flussdichte thermischer Neutronen muss entweder direkt aus einer Messung der spektralen Flussdichte (z. B. durch Flugzeitspektrometrie) oder aus der „richtigen Neutronenflussdichte“ (siehe normativen [Anhang D](#)) nach der Definition in Literaturhinweis [\[30\]](#) bestimmt und, z. B. durch die Aktivierung von Goldfolie [\[34\]](#), gemessen werden.

Im speziellen Fall eines Maxwell'schen Spektrums thermischer Neutronen bekannter Temperatur kann die richtige Neutronenflussdichte direkt aus der gemessenen Aktivierung für einen $1/\nu$ -Detektor abgeleitet werden (siehe normativer [Anhang D](#)).

Anhang A (normativ)

Tabellarische und grafische Darstellung der Neutronenspektren für Radionuklidquellen

A.1 Tabellarische Darstellung der Daten

Die Spektren für die in [Tabelle 1](#) aufgeführten Radionuklidquellen sind in den [Tabellen A.1 bis A.3](#) als gruppierte Quellenemissionsrate B_i in bestimmten Energieintervallen dargestellt, d. h. als Quellen-Emissionsrate zwischen E_i und E_{i+1} :

$$B_i = \int_{E_i}^{E_{i+1}} B_E dE$$

Dabei ist B_E die spektrale Emissionsrate.

Die B_i wurden nach Literaturhinweis [\[35\]](#) für ^{252}Cf -Spontanspaltungsneutronen bestimmt.

Für $^{241}\text{Am-Be}(\alpha, n)$ -Quellen gilt: Auswertungen, die hochauflösende Daten mit Bonner-Kugel-Messungen kombinieren, zeigen, dass die Spektren und spektral integrierten Größen in Abhängigkeit von der Quellenumhüllung und der Menge des aktiven Materials leicht variieren [\[6\]](#). Wahrscheinlich ist insbesondere der niederenergetische Teil des Spektrums ($E < 0,1$ MeV) betroffen. Für die Zwecke dieses Dokuments wurden zwei spektrale Kategorien identifiziert: „kleine“ und „große“ Quellen. Während die „kleine“ Quelle für Americium-Aktivitäten bis etwa 37 GBq gelten kann, kann die „große“ Quelle für 370 GBq und darüber gelten. Siehe [Tabelle A.3](#) für tabellarische Spektren. Diese beziehen sich auf Quellen, die durch gründliches Mischen feiner Americium- und Beryllium-Pulver erhalten werden. Unterschiedliche Konstruktionsmethoden können zu unterschiedlichen Spektren führen. Labore sollten untersuchen, ob ihre Quellen nicht ähnlich aufgebaut sind.

Ein repräsentatives Spektrum der D_2O -moderierten ^{252}Cf -Quelle wurde für die Zwecke dieses Dokuments durch Monte-Carlo-Simulationen bestimmt. Einzelheiten sind in [Anhang B](#) aufgeführt.

In den [Tabellen A.1 bis A.3](#) ist die für jede Gruppe von Werten der Emissionsrate, B_i , angegebene Energie die Untergrenze, E_i , des Energieintervalls, i ; die letzte in jeder Tabelle angegebene Energie ist die Obergrenze des letzten Energieintervalls. Die Gruppenwerte der Quellen-Emissionsrate werden für alle Quellen auf eine Gesamtemissionsrate $B = 1 \text{ s}^{-1}$ normiert, d. h.,

$$\sum_{i=1}^n B_i = 1 \text{ s}^{-1}$$

Bei der D_2O -moderierten ^{252}Cf -Quelle wird ein Teil der Quellneutronen in der Moderatoranordnung absorbiert. Bei der in [Anhang B](#) beschriebenen Berechnung beträgt dieser Anteil 11,4 %.

Die Zahlen in den [Tabellen A.1 bis A.3](#) ermöglichen die Berechnung des Anteils der Quellenemissionsrate zwischen den Energien E_a und E_b durch einfache Addition der jeweiligen gruppierten Quellenemissionsraten:

$$B_{E_a}^{E_b} = \sum_a^{b-1} B_i$$

A.2 Grafische Darstellung

Während die Werte der gruppierten Quellenemissionsraten die grundlegenden physikalischen Daten sind, die aus Messungen oder Berechnungen stammen und für weitere Berechnungen von Integralen verwendet werden sollen, sind sie für die grafische Darstellung der Spektren ungeeignet, da ihre Werte von der (beliebigen) Breite der Energieintervalle abhängen.