

DIN ISO 12789-1

ICS 17.240

**Referenzstrahlungsfelder –
Simulierte Arbeitsplatz-Neutronenfelder –
Teil 1: Eigenschaften und Erzeugungsverfahren (ISO 12789-1:2008)**

Reference radiation fields –
Simulated workplace neutron fields –
Part 1: Characteristics and methods of production (ISO 12789-1:2008)

Champs de rayonnement de référence –
Champs de neutrons simulant ceux de postes de travail –
Partie 1: Caractéristiques et méthodes de production (ISO 12789-1:2008)

Gesamtumfang 31 Seiten

Normenausschuss Radiologie (NAR) im DIN

Inhalt

Seite

Nationales Vorwort	4
Nationaler Anhang (informativ) Literaturhinweis	4
Einleitung.....	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Simulierte Arbeitsplatz-Neutronenfelder	8
5 Allgemeine Anforderungen an die Erzeugung von simulierten Arbeitsplatz-Neutronenspektren	9
6 Charakterisierung der simulierten Arbeitsplatz-Neutronenfelder	10
7 Fluenz-Äquivalentdosis-Konversionsfaktoren	12
8 Unsicherheitsquellen	12
9 Angabe und Dokumentation der Unsicherheiten	13
Anhang A (informativ) Beispiele für simulierte Arbeitsplatz-Neutronenfelder	14
Literaturhinweise	29

Bilder

Bild A.1 — Schematische Darstellung der PTB-Bestrahlungseinrichtung (senkrechter Querschnitt)	18
Bild A.2 — Neutronenflussdichte-Spektren hinter einem Abschattungsobjekt für unterschiedliche Kalibrierquellen in der PTB.....	19
Bild A.3 — Schematische Ansicht des Querschnitts der Einrichtung im IRSN-Laboratorium in Cadarache/Frankreich zum Simulieren von Arbeitsplatz-Neutronenfeldern.....	20
Bild A.4 — An der IRSN-Einrichtung in Cadarache gemessene und berechnete Neutronenspektren (^{238}U -induzierte Spaltung durch 14,6-MeV-Neutronen mit zusätzlicher Moderation).....	21
Bild A.5 — An der IRSN-Einrichtung in Cadarache gemessenes Neutronenspektrum.....	22
Bild A.6 — GRENF-Einrichtung (waagerechter Querschnitt in der Strahlenbündelebene)	23
Bild A.7 — Entfaltete spektrale Neutronenfluenz je logarithmischem Energieintervall in der GRENF-Einrichtung	24
Bild A.8 — Draufsicht der SILÉNE-Reaktoreinrichtung (Grundriss)	25
Bild A.9 — Neutronenspektren, erzeugt an der Bezugsposition mit unterschiedlichen Abschirmungen in der SILÉNE-Einrichtung	26
Bild A.10 — Querschnittsdarstellung der CERN-Referenzneutroneneinrichtung (senkrechter Querschnitt)	27
Bild A.11 — Berechnete und gemessene Neutronenenergiespektren, die in der CERN-Einrichtung erzeugt wurden.....	28

Tabellen

Tabelle 1 — Umgebungs-Äquivalentdosis und Personendosis je Neutronenfluenz $h_{\phi}^*(10)$	
und $h_{p,slab \phi(10,\alpha)}$ in der Einheit $pSv \cdot cm^2$ für monoenergetische Neutronen, die auf dem ICRU-Kugelphantom beziehungsweise dem ICRU-Plattenphantom einfallen	10

Nationales Vorwort

Die Internationale Norm ISO 12789-1:2008 „Reference radiation fields — Simulated workplace neutron fields — Part 1: Characteristics and methods of production“ ist unverändert in diese Norm übernommen worden.

Die Internationale Norm wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 85 „Nuclear energy“, Unterkomitee SC 2 „Radiation protection“, der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet.

Diese erste Ausgabe der Norm ISO 12789-1 ersetzt ISO 12789:2000, die geringfügig überarbeitet wurde.

Das zuständige deutsche Gremium ist der Arbeitsausschuss NA 080-00-01 AA „Dosimetrie“ des Normenausschusses Radiologie (NAR) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. in Arbeitsgemeinschaft mit der Deutschen Röntgengesellschaft und in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin e. V. (DGN), der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik e. V. (DGMP) und der Deutschen Gesellschaft für Radioonkologie e. V. (DEGRO).

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 ISO 12789, *Referenzstrahlungsfelder — Simulierte Arbeitsplatz-Neutronenfelder* besteht aus:

- *Teil 1: Eigenschaften und Erzeugungsverfahren*
- *Teil 2: Grundlagen der Kalibrierung mit Bezug auf Grundgrößen*

Nationaler Anhang (informativ)

Literaturhinweis

DIN 6802-1:1991-11, *Neutronendosimetrie — Teil 1: Spezielle Begriffe und Benennungen*

DIN 6814-2:2000-07, *Begriffe in der radiologischen Technik — Teil 2: Strahlenphysik*

DIN 6814-3:2001-01, *Begriffe in der radiologischen Technik — Teil 3: Dosisgrößen und Dosiseinheiten*

Referenzstrahlungsfelder — Simulierte Arbeitsplatz-Neutronenfelder — Teil 1: Eigenschaften und Erzeugungsverfahren

Einleitung

ISO 8529-1, ISO 8529-2 und ISO 8529-3 behandeln die Erzeugung, Charakterisierung und Anwendung von Neutronenstrahlungsfeldern für die Kalibrierung von Personendosimetern und Überwachungsmonitoren (Ortsdosimetern). Diese Internationalen Normen beschreiben Referenzstrahlungsfelder mit Neutronenenergiespektren, die hinreichend genau definiert und für die Anwendung im Kalibrierlaboratorium gut geeignet sind. Die in gewöhnlichen Strahlenschutz-Situationen üblicherweise anzutreffenden Neutronenspektren unterscheiden sich jedoch in vielen Fällen deutlich von den Spektren, die entsprechend diesen Internationalen Normen erzeugt werden. Da Personen- und, in geringerem Umfang, Ortsdosimeter für Neutronen in ihrem Äquivalentdosis-Ansprechvermögen im Allgemeinen deutlich energieabhängig sind, ist es unter Umständen nicht möglich, eine angemessene Kalibrierung für ein Gerät zu erzielen, das an einem Arbeitsplatz verwendet wird, an dem sich das Neutronenenergiespektrum und die Winkelverteilung deutlich von denen der für die Kalibrierung angewendeten Referenzstrahlung unterscheiden. ISO 8529-1 beschreibt ausführlich vier auf Radionuklidquellen beruhende Neutronen-Referenzstrahlungsfelder. Der vorliegende Teil von ISO 12789 enthält die Spezifikationen der Neutronen-Referenzstrahlungsfelder, die entwickelt wurden, um die in der Praxis anzutreffende Strahlung nahezu gleich wiederzugeben. Zur Veranschaulichung sind in Anhang A Beispiele von simulierten Arbeitsplatz-Neutronenquelleneinrichtungen angegeben.

1 Anwendungsbereich

Der vorliegende Teil von ISO 12789 enthält eine Anleitung zur Erzeugung und Charakterisierung von simulierten Arbeitsplatz-Neutronenfeldern, die für die Kalibrierung von Neutronen-Messgeräten für den Strahlenschutz verwendet werden sollen. Es werden sowohl Berechnungen als auch spektrometrische Messverfahren behandelt. Die Neutronenenergien in diesen Referenzfeldern umfassen den Bereich zwischen thermischen Neutronenenergien und mehreren hundert GeV. Die Verfahren zur Erzeugung der verschiedenen Arten von Neutronenfelder werden behandelt einschließlich der Überwachungstechniken und der Verfahren zur Bewertung und Angabe der Messunsicherheiten.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente 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).

ISO 8529-1:2001, *Reference neutron radiations — Part 1: Characteristics and methods of production*

ISO 8529-2:2000, *Reference neutron radiations — Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field*

ISO 8529-3:1998, *Reference neutron radiations — Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of response as a function of energy and angle of incidence*

ISO/IEC 98:1995, *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ANMERKUNG 1 Die Begriffsdefinitionen folgen den internationalen Empfehlungen des ICRU Report 51 [8] und des ICRU Report 33 [4]^{N1)}.

ANMERKUNG 2 Im gesamten vorliegenden Teil von ISO 12789 werden Vielfache oder Teile von SI-Einheiten verwendet.

3.1 Neutronenfluenz

Φ

dN geteilt durch da , wobei dN die Anzahl der auf eine Kugel mit der Querschnittsfläche da einfallenden Neutronen ist

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

ANMERKUNG Die Einheit der Neutronenfluenz ist Meter hoch minus 2 (m^{-2}).

N1) Nationale Fußnote: Die Begriffsdefinitionen folgen außerdem den Normen DIN 6802-1:1991-11, DIN 6814-2:2000-07 und DIN 6814-3:2001-01.

3.2

Neutronenflussdichte

φ

$d\Phi$ geteilt durch dt , wobei $d\Phi$ das Inkrement der Neutronenfluenz im Zeitintervall dt ist

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2N}{da dt}$$

ANMERKUNG Die Einheit der Neutronenflussdichte ist Meter hoch minus 2 mal Sekunde hoch minus 1 ($\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

3.3

spektrale Verteilung der Neutronenfluenz

Φ_E

$d\Phi$ geteilt durch dE , wobei $d\Phi$ das Inkrement der Neutronenfluenz im Energieintervall dE zwischen E und $(E + dE)$ ist

$$\Phi_E = \frac{d\Phi}{dE}$$

ANMERKUNG Die Einheit der spektralen Verteilung der Neutronenfluenz ist Meter hoch minus 2 mal Joule hoch minus 1 ($\text{m}^{-2}\cdot\text{J}^{-1}$).

3.4

Umgebungs-Äquivalentdosis

$H^*(d)$

Äquivalentdosis an einem Punkt im Strahlungsfeld, die vom zugehörigen aufgeweiteten und ausgerichteten Feld in der ICRU-Kugel in der Tiefe d am Radius in entgegen gesetzter Richtung zum ausgerichteten Feld erzeugt werden würde^{N2)}

ANMERKUNG 1 Bei stark durchdringender Strahlung wird derzeit eine Tiefe von 10 mm empfohlen.

ANMERKUNG 2 Die Einheit der Umgebungs-Äquivalentdosis ist Joule mal Kilogramm hoch minus 1 ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) mit der speziellen Bezeichnung Sievert (Sv).

3.5

Personendosis

$H_p(d)$

Äquivalentdosis in Weichteilgewebe bei einer angegebenen Tiefe d unterhalb einer bestimmten Körperstelle^{N2)}

ANMERKUNG 1 Bei stark durchdringender Strahlung wird derzeit eine Tiefe von 10 mm empfohlen.

ANMERKUNG 2 Die Einheit der Personendosis ist Joule mal Kilogramm hoch minus 1 ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) mit der speziellen Bezeichnung Sievert (Sv).

ANMERKUNG 3 ICRU Report 39 [5] definiert die Massenzusammensetzung von Weichteilgewebe mit: 76,2 % O, 10,1 % H, 11,1 % C und 2,6 % N.

ANMERKUNG 4 Im ICRU Report 47 [7] hat die ICRU die Definition der Personendosis erweitert, um die Äquivalentdosis in der Tiefe d in einem Phantom mit der ICRU-Gewebezusammensetzung einzubeziehen. Demnach entspricht $H_p(10)$ für die Kalibrierung von Personendosimetern der Äquivalentdosis in der Tiefe d in einem Phantom mit ICRU-Gewebezusammensetzung, jedoch mit der für die Kalibrierung verwendeten Phantomgröße und -form (Quader von 30 cm × 30 cm × 15 cm).

N2) Nationale Fußnote: In Deutschland gilt die Definition nach DIN 6814-3:2001-01.

3.6

Neutronenfluenz-Äquivalentdosis-Konversionsfaktor h_ϕ

Äquivalentdosis dividiert durch Neutronenfluenz

$$h_\phi = \frac{H}{\Phi}$$

ANMERKUNG 1 Die Einheit des Neutronenfluenz-Äquivalentdosis-Konversionsfaktors ist Sievert mal Quadratmeter (Sv·m²).

ANMERKUNG 2 Jegliche Angabe eines Neutronenfluenz-Äquivalentdosis-Konversionsfaktors erfordert die Angabe der Art der Äquivalentdosis, z. B. Umgebungs-Äquivalentdosis oder Personendosis.

4 Simulierte Arbeitsplatz-Neutronenfelder

Seit einiger Zeit sind Neutronenfluenz-Spektren für eine Vielzahl von Neutronenfeldern verfügbar [9] [10]. Die an Arbeitsplätzen und in simulierten Arbeitsplatz-Kalibrierfeldern gemessenen Neutronenfluenz-Spektren sind in einem Katalog enthalten, der das Ergebnis einer von der Europäischen Kommission geförderten Arbeit ist [11]. Zusätzlich zu den Neutronenfluenz-Äquivalentdosis-Konversionsfaktoren enthält dieser Katalog auch Ansprechfunktionen gebräuchlicher Detektoren und Dosimeter.

Messungen in Kernkraftwerken [12] [13] [14] [15], in der Nähe von Transportbehältern, mit darin enthaltenen verbrauchten Brennelementen [14] [15] und in Betrieben, die Radionuklid-Neutronenquellen herstellen [15] [16] und Brennelemente wiederaufbereiten [17], haben gezeigt, dass Neutronenenergie-Spektren in derartigen Umgebungen als eine Überlagerung folgender Komponenten beschrieben werden können: eine Hochenergie-Komponente, die nichtkollidierte Neutronen wiedergibt, eine Streukomponente mit einer Abhängigkeit der spektralen Fluenz von annähernd $1/E_n$ (wobei E_n die Neutronenenergie ist) und eine thermische Neutronenkomponente. Für diese Art Spektren erfordert die Konzeption von simulierten Arbeitsplatz-Neutronenfeldern die Kenntnis und Berücksichtigung der oben angeführten Komponenten, da sich deren relative Anteile in verschiedenen Situationen beträchtlich unterscheiden können.

In anderen Strahlungsumgebungen können viel energiereichere Neutronen auftreten. Zum Beispiel wurden in der Nähe von Hochenergieeteilchenbeschleunigern [18] [19] und in Flugzeugen, die in Höhen von 10 km bis 15 km flogen [20], Neutronen mit Energien über 10 MeV gefunden, die 30 % bis 50 % zur Umgebungs-Äquivalentdosis und Personendosis beitragen.

Aufgrund der Eigenschaften erhältlicher Neutronendosimeter und Überwachungsmonitore (Ortsdosimeter) ist es schwierig, am Arbeitsplatz richtige Messwerte auf Grundlage der in ISO 8529-1 festgelegten Referenzstrahlungsfelder zu erhalten, wenn sich deren Spektren deutlich von dem an einem Arbeitsplatz unterscheiden. Dies kann zu einem fehlerhaften Schätzwert der Äquivalentdosis führen, wenn derartige Geräte verwendet werden. Zur Verbesserung der Situation bestehen mindestens zwei Möglichkeiten. Erstens kann das Neutronenspektrum des Feldes am Arbeitsplatz gemessen und ein Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des energieabhängigen Ansprechvermögens des Detektors berechnet werden. Zweitens kann eine Einrichtung konstruiert werden, um ein Neutronenfeld zu erzeugen, welches das am Arbeitsplatz vorgefundene Energiespektrum simuliert. Wenn dieses Feld genau charakterisiert wurde, kann es für die direkte Kalibrierung von Personendosimetern und Ortsdosimetern genutzt werden. Dieser zweite Ansatz wurde von mehreren Laboratorien angewendet. Der vorliegende Teil von ISO 12789 gibt die Anleitung für die Erzeugung und Charakterisierung von simulierten Arbeitsplatz-Neutronenspektren zum Zweck der Kalibrierung von Dosimetern und Überwachungs-Strahlungsmessgeräten.

Die Erzeugung simulierter Arbeitsplatz-Neutronenspektren im Kalibrierlaboratorium ist notwendig, da die Laborumgebung die Möglichkeit der Kontrolle der meisten Einflussgrößen bietet. Die Umgebungsparameter wie Temperatur und Luftfeuchte können auf konstante Niveaus eingestellt werden. Die im Aufbau der verschiedenen Anlagen verwendeten Materialien können außerdem festgelegt und überprüft werden. Des Weiteren können der allgemeine Aufbau sowie die Ursachen der Neutronenstreuung im Kalibrierlaboratorium kontrolliert oder zumindest konstant gehalten werden.

Im Kalibrierlaboratorium erzeugte simulierte Arbeitsplatz-Neutronenspektren können für die Untersuchung der Auswirkungen von Änderungen im Neutronenspektrum auf das Ansprechvermögen von Personendosimetern und Ortsdosimetern verwendet werden. Außerdem dürfen mit derartigen Quellen in Verbindung mit den in ISO 8529-1 empfohlenen Radionuklidquellen Dosimeter-Algorithmen überprüft werden. Aus diesen Gründen sollten für die Untersuchung und Kalibrierung von Neutronen-Personaldosimetern und -Ortsdosimetern, die in einer der oben angeführten Arbeitsplatz-Situationen verwendet werden, simulierte Arbeitsplatz-Neutronenspektren bereitgestellt werden.

5 Allgemeine Anforderungen an die Erzeugung von simulierten Arbeitsplatz-Neutronenspektren

Es gibt drei Grundverfahren für die Erzeugung von simulierten Arbeitsplatz-Neutronenspektren. Bestrahlungseinrichtungen können unter Verwendung von Radionuklid-Neutronenquellen, Teilchenbeschleunigern und Kernreaktoren entwickelt werden. In Jedem Fall kann zwischen der Primärquelle und dem Detektor eine Auswahl von Absorbermaterialien und Streukörpern angeordnet werden, um das ursprüngliche Quellspektrum zu verändern und somit ein Arbeitsplatz-Neutronenspektrum zu simulieren. Für die Charakterisierung der in derartigen Einrichtungen erzeugten Neutronenfelder ist es notwendig, das Energiespektrum zu messen und zu berechnen und die spektrale und winkelbezogene Neutronenfluenz sowie die Äquivalentdosisleistungen an den Bezugspositionen zu bestimmen.

Außerdem ist die Bestimmung der Gleichmäßigkeit des Feldes innerhalb des Volumens, in dem sich der Detektor befindet, notwendig. In einigen Fällen kann diese Bestimmung leichter durch Berechnung als durch experimentelle Verfahren erfolgen. Die Quellstärke der Quellen, von denen erwartet wird, dass sie sich mit der Bestrahlungsdauer verändern (z. B. Teilchenbeschleuniger oder Kernreaktoren), muss überwacht werden. Bei dieser Überwachung muss ein bekannter Anteil des Neutronenfelds erfasst, ein ungenutzter Teil des Felds gemessen oder ein Parameter, der nachweislich direkt proportional zur Neutronenerzeugung ist (z. B. der Strom eines Strahls geladener Teilchen oder die Teilchenflussdichte assoziierter, an der Reaktion teilnehmender Teilchen), gemessen werden. Wenn die Teilchenflussdichte des Neutronenfelds über einen großen Bereich geändert werden kann, wie dies bei Verwendung eines Teilchenbeschleunigers oder Reaktors oft der Fall ist, kann es notwendig sein, mehr als eine Überwachungseinrichtung zur Verfügung zu haben, um eine gute Zählstatistik bei geringen Teilchenflussdichten sicherzustellen und gleichzeitig Probleme mit Totzeitverlusten bei hohen Teilchenflussdichten zu vermeiden. Zwischen dem Überwachungsanzeigewert und der Äquivalentdosis an der Bezugsposition müssen dann funktionale Zusammenhänge aufgestellt werden.

Die Neutronenflussdichte kann entweder durch Absolutmessungen bestimmt werden oder, in einigen Fällen, durch Bestimmung der Emissionsrate der Neutronen-Primärquelle und der Kenntnis der Auswirkung des Streumaterials, das zum Modifizieren des Spektrums verwendet wird. Die Äquivalentdosisleistung an der Kalibrierposition kann dann aus dem Neutronen-Energiespektrum und der Neutronenflussdichte an dieser Position mit Hilfe des für das Spektrum geltenden Neutronenfluenz-Äquivalentdosis-Konversionsfaktors (siehe Tabelle 1) bestimmt werden. Wenn $H_p(10)$ die zu bestimmende Größe ist, muss die Richtungsverteilung der Fluenz bekannt sein. Diese Information kann auch für die Überwachungsmessgeräte erforderlich sein, um jegliche Anisotropie ihrer Ansprechcharakteristik zu berücksichtigen.

Die Charakterisierung des simulierten Arbeitsplatz-Neutronenfelds sollte vorzugsweise auch die Bestimmung des Anteils der auftretenden Fremdstrahlungsphotonen einschließen, da diese Photonen den Anzeigewert des exponierten Überwachungsmonitors (Ortsdosimeters) oder Personendosimeters beeinflussen können. Außerdem kann sich der im Kalibrierfeld auftretende relative Anteil der von Photonen erzeugten Äquivalentdosis vom Anteil im tatsächlichen Arbeitsplatz-Neutronenfeld unterscheiden. Die Verfahren für die Messung des Anteils der Photonen an der Umgebungs-Äquivalentdosis oder Personendosis umfassen die Verwendung von Multielement-Thermolumineszenz-Dosimetern (TLD), kombinierten Ionisationskammern (Zweikammersysteme), Geiger-Müller-Zählrohren, Rekombinationskammern und gewebeäquivalenten Proportionalzählern, die zwischen Neutronen- und Photonenergieereignissen unterscheiden können [13] [14] [30].

6 Charakterisierung der simulierten Arbeitsplatz-Neutronenfelder

6.1 Berechnungsverfahren

Für die Auslegung, Erzeugung und Charakterisierung von simulierten Arbeitsplatz-Neutronenfeldern werden Monte-Carlo-Computercodes genutzt [21]. Es gibt einige Leitlinien für die Anwendung der Rechenverfahren, die befolgt werden sollten. Erstens wird empfohlen, dass nur international getestete Computercodes oder solche Programme verwendet werden, die sich beim Vergleich mit Messungen als vorteilhaft erwiesen haben^{N3)}. Die Version oder Update-Nummer des Codes sollte angegeben werden. Zweitens ist es wichtig, die zur Berechnung verwendeten Anfangsbedingungen zu dokumentieren. Dies erleichtert den Vergleich der einzelnen Ergebnisse von Laboratorien untereinander. Da bewertete Dateien mit Nukleardaten regelmäßig aktualisiert werden, ist es auch wichtig, die Version des verwendeten Wirkungsquerschnittsdatensatzes anzugeben. Die Befolgung dieser Leitlinien verbessert die Übereinstimmung in der Berechnung und Angabe von Neutronenspektren. Es ist außerdem vernünftig, die eigenen Berechnungen mit Ergebnissen zu vergleichen, die mit anderen gebräuchlichen Codes erhalten wurden.

Es ist schwierig, die Gesamtunsicherheit abzuschätzen, die mit Monte-Carlo-Berechnungen verbunden ist. Trotzdem ist es wichtig, eine quantitative Bestimmung der Unsicherheit für eine bestimmte Berechnung zu versuchen, insbesondere wenn das Spektrum zum Berechnen von Referenzdaten, wie Neutronenfluenz-Äquivalentdosis-Konversionsfaktoren, verwendet wird. Die statistische Unsicherheit kann verhältnismäßig klein sein, wenn genügend Teilchen transportiert wurden, jedoch verweist ein niedriger Wert für die statistische Unsicherheit nicht unbedingt auf eine geringe Gesamtunsicherheit. Abschnitt 8 behandelt die Quellen der Unsicherheit.

Tabelle 1 — Umgebungs-Äquivalentdosis und Personendosis je Neutronenfluenz $h_{\phi}^*(10)$ und $h_{p,slab \phi}(10, \alpha)$ in der Einheit pSv·cm² für monoenergetische Neutronen, die auf dem ICRU-Kugelphantom beziehungsweise dem ICRU-Plattenphantom einfallen

Energie (MeV)	$h_{\phi}^*(10)$	$h_{p,slab \phi}(10,0^{\circ})$	$h_{p,slab \phi}(10,15^{\circ})$	$h_{p,slab \phi}(10,30^{\circ})$	$h_{p,slab \phi}(10,45^{\circ})$	$h_{p,slab \phi}(10,60^{\circ})$	$h_{p,slab \phi}(10,75^{\circ})$
$1,00 \times 10^{-9}$	6,60	8,19	7,64	6,57	4,23	2,61	1,13
$1,00 \times 10^{-8}$	9,00	9,97	9,35	7,90	5,38	3,37	1,50
$2,53 \times 10^{-8}$	10,6	11,4	10,6	9,11	6,61	4,04	1,73
$1,00 \times 10^{-7}$	12,9	12,6	11,7	10,3	7,84	4,7	1,94
$2,00 \times 10^{-7}$	13,5	13,5	12,6	11,1	8,73	5,21	2,12
$5,00 \times 10^{-7}$	13,6	14,2	13,5	11,8	9,40	5,65	2,31
$1,00 \times 10^{-6}$	13,3	14,4	13,9	12,0	9,56	5,82	2,40
$2,00 \times 10^{-6}$	12,9	14,3	14,0	11,9	9,49	5,85	2,46
$5,00 \times 10^{-6}$	12,0	13,8	13,9	11,5	9,11	5,71	2,48
$1,00 \times 10^{-5}$	11,3	13,2	13,4	11,0	8,65	5,47	2,44
$2,00 \times 10^{-5}$	10,6	12,4	12,6	10,4	8,10	5,14	2,35
$5,00 \times 10^{-5}$	9,90	11,2	11,2	9,49	7,32	4,57	2,16
$1,00 \times 10^{-4}$	9,40	10,3	9,85	8,64	6,74	4,10	1,99
$2,00 \times 10^{-4}$	8,90	9,84	9,41	8,22	6,21	3,91	1,83
$5,00 \times 10^{-4}$	8,30	9,34	8,66	7,66	5,67	3,58	1,68
$1,00 \times 10^{-3}$	7,90	8,78	8,20	7,29	5,43	3,46	1,66
$2,00 \times 10^{-3}$	7,70	8,72	8,22	7,27	5,43	3,46	1,67
$5,00 \times 10^{-3}$	8,00	9,36	8,79	7,46	5,71	3,59	1,69
$1,00 \times 10^{-2}$	10,5	11,2	10,8	9,18	7,09	4,32	1,71

N3) Nationale Fußnote: Ein Beispiel ist das Programm MCNP. Diese Information dient nur der Unterstützung der Anwender dieser Norm und stellt keine Anerkennung dieses Produkts durch das DIN dar.