

DIN ISO 6980-2
(VDE 0412-6980-2)
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 2020-11-25

Entwurf

Kernenergie –
Beta-Referenzstrahlung –
Teil 2: Kalibriergrundlagen für Basisgrößen, die das Strahlungsfeld charakterisieren
(ISO/CD 6980-2:2019);
Text Deutsch und Englisch

Nuclear energy –
 Reference beta-particle radiation –
 Part 2: Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field
 (ISO/CD 6980-2:2019);
 Text in German and English

Énergie nucléaire –
 Rayonnement bêta de référence –
 Partie 2: Concepts d'étalonnage en relation avec les grandeurs fondamentales caractérisant le champ du rayonnement
 (ISO/CD 6980-2:2019);
 Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-09-25 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 85 Seiten

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

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist ...

	Inhalt	Seite
Nationales Vorwort.....		5
Vorwort.....		6
1	Anwendungsbereich	7
2	Normative Verweisungen	7
3	Begriffe	7
4	Kalibrierung und Rückverfolgbarkeit von Referenzstrahlungsfeldern	10
5	Allgemeine Grundsätze für die Kalibrierung von Radionuklid-Betastrahlungsfeldern	11
5.1	Allgemeines	11
5.2	Skalierung zur Bestimmung der äquivalenten Dicken verschiedener Materialien	11
5.3	Charakterisierung des Strahlungsfeldes in Bezug auf die Eindringfähigkeit.....	12
6	Kalibrierverfahren mittels einer Extrapolationskammer.....	13
6.1	Allgemeines	13
6.2	Bestimmung der Beta-Referenz-Energiedosisleistung	13
7	Kalibrierungen mit anderen Messgeräten	14
7.1	Kalibrierungen mit Thermolumineszenz-Dosimetern	14
7.2	Kalibrierungen mit thermisch stimulierten Exoelektronenemissions-Dosimetern	15
7.3	Kalibrierungen mit Ionisationskammern	15
7.4	Kalibrierungen mit Szintillationsdetektoren	15
8	Messungen bei nicht senkrechtem Einfall	15
9	Unsicherheiten.....	15
Anhang A (informativ) Liste der Symbole		22
Anhang B (informativ) Messungen mit Extrapolationskammer		25
B.1	Anwärmen des Elektrometers und Stabilitätsprüfungen	25
B.2	Bestimmung des Leckstroms	25
B.3	Messungen mit beiden Polaritäten	25
B.4	Elektrische Feldstärke	26
B.5	Wahl der Kammertiefen.....	26
B.6	Verfahren für die Strommessung	26
B.7	Integrationsdauern.....	26
B.8	Wiederholte Ablesungen	26
B.9	Bestimmung des Nullpunkts und der effektiven Sammelelektrodenfläche	27
B.10	Bestimmung der Grenzsteigung	27
Anhang C (informativ) Korrektionsfaktoren für Messungen mit Extrapolationskammer.....		29
C.1	Art der Korrektion	29
C.2	Korrektion der Differenz der Rückstreuung zwischen Gewebe und dem Material der Sammelelektrode und des Schutzrings, k_{ba}	29

C.3	Korrektur bezüglich Bremsstrahlung aus der Betaquelle, k_{br}	29
C.4	Korrektur für die elektrostatische Anziehung des Eintrittsfensters, k_{el}	29
C.5	Korrektur für den Einfluss der Luftfeuchte im Sammelvolumen auf die mittlere Energie, die zur Erzeugung eines Ionenpaares benötigt wird, k_{hu}	30
C.6	Korrektur von Grenzflächeneffekten zwischen der Luft im Sammelvolumen und dem angrenzenden Eingangsfenster und der Sammelelektrode, k_{in}	30
C.7	Korrektur des Abstands zwischen Quelle und Kammer bei unterschiedlicher Phantomtiefen, k_{ph}	30
C.8	Korrektur für die Inhomogenität der Energiedosisleistung im Sammelvolumen, k_{ih}	31
C.9	Korrektur für Verhältnis der Stoßbremsvermögen bei unterschiedlicher Phantomtiefen, k_{sta}	31
C.10	Korrektur für Schwankungen der Absorption und Streuung von Betateilchen zwischen der Quelle und dem Sammelvolumen und innerhalb des Sammelvolumens aufgrund von Abweichungen von Referenzbedingungen, k_{abs}	31
C.11	Korrektur für die Luftdichte im Sammelvolumen, k_{ad}	32
C.12	Korrektur für den radioaktiven Zerfall der Betaquelle, k_{de}	33
C.13	Korrektur der Störung der Betateilchenflussdichte durch die Seitenwände der Extrapolationskammer, k_{pe}	33
C.14	Korrektur für die Anwendung der Spencer-Attix-Theorie, k_{sa}	33
C.15	Korrektur für Ionisationsverluste durch Rekombination, k_{sat}	34
Anhang D (informativ) Beispiel einer Messunsicherheitsanalyse		39
Literaturhinweise		43
Bilder		
Bild 1 – Tiefendosiskurven, gemessen im Kalibrierabstand y_0 für einige Betastrahlungsquellen.....		17
Bild 2 – Schematischer Querschnitt durch die Hauptteile einer Extrapolationskammer		18
Tabellen		
Tabelle 1 – Berechnete Beta-Skalierungsfaktoren bezogen auf Gewebe für Medien mit niedrigem Z-Wert.....		18
Tabelle 2 – Korrekturfaktoren, die für die Messungen der gesamten Extrapolationskurve konstant sind		19
Tabelle 3 – Korrekturfaktoren, die während der Messungen der Extrapolationskurve variieren können.....		19
Tabelle 4 – Berechnete Quotienten mittleres Massenbremsvermögen in Gewebe durch dasjenige in Luft		20
Tabelle 5 – Beispiele für Unsicherheiten (1σ), die Messungen zugeordnet sind, die zur Bestimmung der Energiedosisleistung mittels einer Extrapolationskammer erforderlich sind		20
Tabelle 6 – Beispiele für Unsicherheiten (1σ), die Parametern zugeordnet sind, die zur Berechnung der Energiedosis aus Messungen mit einer Extrapolationskammer erforderlich sind		21
Tabelle C.1 – Korrekturfaktor k_{ba} für eine Extrapolationskammer aus PMMA mit einer Eintrittsfläche von $\varnothing = 30$ mm, einem Schutzring von $\varnothing = 60$ mm und einem Außendurchmesser von $\varnothing = 140$ mm [5] für mehrere Beta-Radionuklide und Geometrien [17]		35

Tabelle C.2 — Korrektionsfaktor k_{br} für mehrere Beta-Radionuklide und Geometrien [4],[15]	35
Tabelle C.3 — Parameter b und m zur Berechnung von k_{ih} , siehe Gleichung (C.3), für eine Extrapolationskammer aus PMMA mit einer Eintrittsfläche von $\varnothing = 30$ mm, einem Schutzring von $\varnothing = 60$ mm und einem Außendurchmesser von $\varnothing = 140$ mm [5] für mehrere Beta-Radionuklide und Geometrien [17]	35
Tabelle C.4 — Parameter a und b zur Berechnung von k_{Sta} , siehe Gleichung (C.4), für verschiedene Beta-Radionuklide [3]	36
Tabelle C.5 — Typische Werte für die Parameter der Transmissionsfunktionen für $\alpha = 0^\circ$, siehe Gleichung (C.6)	36
Tabelle C.6 — Halbwertszeiten verschiedener Beta-Radionuklide	37
Tabelle C.7 — Koeffizienten für die Berechnung von k_{pe} , siehe Gleichung (C.10), für eine Extrapolationskammer aus PMMA mit einer Eintrittsfläche von $\varnothing = 30$ mm, einem Schutzring von $\varnothing = 60$ mm und einem Außendurchmesser von $\varnothing = 140$ mm [5] für mehrere Beta-Radionuklide und Geometrien [17]	37
Tabelle C.8 — Koeffizienten für die Berechnung von k_{SA} , siehe Gleichung (C.11), für eine Extrapolationskammer aus PMMA mit einer Eintrittsfläche von $\varnothing = 30$ mm, einem Schutzring von $\varnothing = 60$ mm und einem Außendurchmesser von $\varnothing = 140$ mm [5] für mehrere Beta-Radionuklide und Geometrien [22]	38
Tabelle D.1 — Messgrößen, die im Wesentlichen nur die Energiedosisleistung betreffen	40
Tabelle D.2 — Parameter, die nur die Energiedosisleistung betreffen	40
Tabelle D.3 — Gemessene Größen, die im Wesentlichen nur die Grenzsteigung betreffen	41
Tabelle D.4 — Parameter, die die Grenzsteigung beeinflussen	41
Tabelle D.5 — Kombinierte Standard-Messunsicherheit (Unsicherheitsbudget) für die Bestimmung der Oberflächen-Energiedosisleistung für eine ^{147}Pm -Quelle mit einer Extrapolationskammer mit einem Elektrometer mit Rückkoppelkondensators und mit einer festen Integrationsdauer	42

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument ISO/CD 6980-2:2019 „Nuclear energy – Reference beta-particle radiation – Part 2: Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field“ (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 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.

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.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, 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.

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.

Diese zweite Ausgabe der ISO 6980-2 ersetzt, zusammen mit der zweiten Ausgabe der ISO 6980-1 und der zweiten Ausgabe der ISO 6980-3, ISO 6980-2:2006, gegenüber der sie eine technische Überarbeitung darstellt. Die wesentlichen Änderungen sind:

- Einbeziehung der Größen $H_p(3)$ und $H'(3)$;
- Aufnahme der $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$ -Serie-1-Quellen;
- Entfernung der ^{14}C -Quellen;
- Einbeziehung von Korrekturfaktoren für die Primärdosimetrie, basierend auf Strahlungstransportsimulationen.

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

Kernenergie – Beta-Referenzstrahlung – Teil 2: Kalibriergrundlagen für Basisgrößen, die das Strahlungsfeld charakterisieren

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument beschreibt Verfahren zur Messung der Energiedosisleistung in einem gewebeäquivalenten Quaderphantom in den ISO-6980-Referenz-Betastrahlungsfeldern. Der Energiebereich der Betateilchen emittierenden Isotope, die von diesen Referenzstrahlungen abgedeckt werden, beträgt 0,22 MeV bis 3,6 MeV (maximale Energie). Strahlungsenergien außerhalb dieses Bereichs gehen über den Anwendungsbereich dieses Dokuments hinaus. Während Messungen in einer Referenzgeometrie (Tiefe von 0,07 mm oder 3 mm bei senkrechtem Einfall in ein gewebeäquivalentes Quaderphantom) mit einer Extrapolationskammer der Referenzklasse ausführlich behandelt werden, wird auch der Einsatz anderer Messsysteme und Messungen in anderen Geometrien beschrieben, wenn auch weniger detailliert. Die Umgebungs-Äquivalentdosis, $H^*(10)$, wie sie für die Ortsdosisüberwachung verwendet wird, und die Tiefen-Personendosis, $H_p(10)$, wie sie für die Personendosisüberwachung verwendet wird, beides für stark durchdringende Strahlung, sind keine geeigneten Größen für jedwede Betastrahlung, auch nicht für diejenige, die eine 10 mm dicke Schicht aus ICRU-Gewebe (z. B. $E_{\max} > 2$ MeV) durchdringt.

Dieses Dokument richtet sich an Organisationen, die Fähigkeiten für Referenzdosimetrie für Betateilchen aufbauen möchten, und dient in anderen Bereichen als Leitfaden für die Durchführung der Betadosimetrie mit einer Referenz-Extrapolationskammer. Leitlinien werden auch für die Angabe von Messunsicherheiten gegeben.

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).

International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM), BIPM/IEC/IFCC/ISO/IUPAC/IUPAP/OIML

ISO 6980-3, *Nuclear energy – Reference beta-particle radiations – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of beta radiation energy and angle of incidence*

ISO 29661:2012, *Reference radiation fields for radiation protection – Definitions and fundamental concepts* + A1:2015

3 Begriffe

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

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

3.1

Extrapolationskurve

(en: extrapolation curve)

Kurve, die durch eine Darstellung des korrigierten Ionisationsstroms als Funktion der Tiefe der Extrapolationskammer gegeben ist

3.2

Ionisationskammer

(en: ionization chamber)

Detektor für ionisierende Strahlung, bestehend aus einer Kammer, die mit einem geeigneten Gas (fast immer Luft) gefüllt ist, in der ein elektrisches Feld, das für eine Gasvervielfachung nicht ausreicht, vorhanden ist, um an den Elektroden Ladungen zu sammeln, die den im Messvolumen des Detektors durch ionisierende Strahlung erzeugten Ionen und Elektronen zugeordnet sind

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Ionisationskammer beinhaltet das Messvolumen, die Sammel- und Polarisations Elektroden, die Schutz Elektrode, falls vorhanden, die Kammerwand, die dem empfindlichen Volumen benachbarten Teile des Isolators und jedes zusätzliche Material, das vor der Ionisationskammer angeordnet wird, um die Messung in einer Tiefe zu simulieren.

3.3

Extrapolations-(Ionisations-)Kammer

(en: extrapolation (ionization) chamber)

Ionisationskammer, die in der Lage ist, ein Ionisationsvolumen zu haben, das durch Änderung des Elektrodenabstands stufenlos auf einen verschwindend kleinen Wert veränderbar ist und es dem Benutzer ermöglicht, die gemessene Ionisationsdichte auf ein Sammelvolumen von null zu extrapolieren

3.4

Ionisationsdichte

(en: ionization density)

Quotient gemessene Ionisation durch Einheit des Luftvolumens^{N1}

3.5

Leckstrom

I_B

(en: leakage current)

Ionisationskammerstrom, gemessen bei anliegender Betriebsspannung in Abwesenheit von Strahlung

3.6

maximale Betaenergie

$E_{\max}$

(en: maximum beta energy)

höchster Wert der Energie von Betateilchen, die von einem bestimmten Nuklid emittiert werden, das ein oder mehrere kontinuierliche Spektren von Betateilchen mit unterschiedlichen maximalen Energien emittieren kann

3.7

parasitärer Strom

I_p

(en: parasitic current)

negativer Strom, der durch Betateilchen erzeugt wird, die im Sammelbereich der Sammelelektrode gestoppt werden und zu dieser Elektrode oder zu dem Draht, der diese Elektrode mit dem Elektrometeranschluss verbindet, diffundieren

3.8

Phantom

(en: phantom)

Gegenstand, der konstruiert wurde, um die Streueigenschaften des menschlichen Körpers oder von Teilen des menschlichen Körpers, wie den Extremitäten, zu simulieren

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Phantom kann zur Definition einer Größe verwendet werden und aus künstlichem Material bestehen, z. B. ICRU-Gewebe, oder für die Kalibrierung verwendet werden und dann aus physikalisch vorhandenem Material hergestellt werden, bezüglich Details siehe [ISO 29661, 6.6.2](#).

^{N1} Nationale Fußnote: Diese Definition ist so nicht präzise. Vermutlich ist „Quotient gemessene Ionisation durch das Luftvolumen“ oder „gemessene Ionisation je Einheit des Luftvolumens“ gemeint.

Anmerkung 2 zum Begriff: Grundsätzlich sollte das ISO-Wasserquaderphantom, das ISO-Stabphantom oder das ISO-Säulenphantom verwendet werden, siehe [ISO 29661](#). Für die Zwecke dieser Norm genügt jedoch ein Quader aus Polymethylmethacrylat (PMMA) mit einem Querschnitt von 20 cm × 20 cm und mindestens 2 cm Dicke, um die rückstreuenden Eigenschaften des Rumpfs des menschlichen Körpers zu simulieren, während Gewebeersatzstoffe wie Polyethylenterephthalat (PET) ausreichen, um die Absorptionseigenschaften von menschlichem Gewebe zu simulieren (siehe [5.2](#)).

[QUELLE: [ISO 29661](#), 3.1.22, Anmerkung 2 zum Begriff hinzugefügt]

3.9

Bezugspunkt der Extrapolationskammer

(en: reference point of the extrapolation chamber)

Punkt, auf den sich die Messung des Abstands von der Strahlungsquelle zur Kammer bei einer gegebenen Ausrichtung bezieht; der Bezugspunkt ist die Mitte der Rückseite der Hochspannungselektrode der Kammer

3.10

Referenz-Energiedosis

D_R

(en: reference absorbed dose)

Oberflächen-Personen-Energiedosis, $D_p(0,07)$, in einem Quaderphantom aus ICRU-Gewebe mit einer Ausrichtung des Phantoms, bei der die Normale zur Phantomboberfläche mit der (mittleren) Richtung der einfallenden Strahlung übereinstimmt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Oberflächen-Personen-Energiedosis, $D_p(0,07)$, ist im ICRU-Bericht 51 definiert. Für die Zwecke dieser Norm wird diese Definition auf ein Quaderphantom erweitert.

Anmerkung 2 zum Begriff: Das Quaderphantom wird mit ausreichender Genauigkeit durch das Material angenähert, das das Normal-Messgerät (Extrapolationskammer) zur Messung des Betastrahlungsfelds umgibt.

Anmerkung 3 zum Begriff: D_R wird mit ausreichender Genauigkeit durch die Richtungs-Energiedosis in der ICRU-Kugel, $D'(0,07, 0^\circ)$, angenähert.

3.10.1

Beta-Referenz-Energiedosis

$D_{R\beta}$

(en: reference beta-particle absorbed dose)

Referenz-Energiedosis, D_R , in einer Tiefe von 0,07 mm, die nur durch Betateilchen verursacht wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Als erste Näherung wird das Verhältnis $D_{R\beta}/D_R$ durch die Bremsstrahlungskorrektur k_{br} gegeben (siehe Abschnitt [C.3](#)).

3.11

maximale Restenergie

E_{res}

(en: residual maximum energy)

höchster Energie-Wert eines Beta-Spektrums im Kalibrierabstand, nachdem es durch Streuung und Absorption modifiziert wurde

3.12

Standardprüfbedingungen

(en: standard test conditions)

Wertebereich eines Satzes von Einflussgrößen, bei dem eine Kalibrierung oder eine Bestimmung des Ansprechvermögens durchgeführt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Idealfall sollten die Kalibrierungen unter Referenzbedingungen durchgeführt werden. Da dies nicht immer möglich (z. B. für den Umgebungsluftdruck) oder sinnvoll (z. B. für die Umgebungstemperatur) ist, darf ein (kleines) Intervall um die Bezugswerte herum verwendet werden. Die durch diese Abweichungen verursachten Abweichungen des Kalibrierfaktors von seinem Wert unter Referenzbedingungen sollten grundsätzlich korrigiert werden. In der Praxis dient die angestrebte Unsicherheit als Kriterium dafür, ob eine Einflussgröße durch eine explizite Korrektur berücksichtigt werden muss, oder ob ihre Wirkung in die Unsicherheit einbezogen werden kann. Bei Bauartprüfungen werden alle Werte von Einflussgrößen, die nicht Gegenstand der Prüfung sind, innerhalb des Intervalls der Standardprüfbedingungen gehalten.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Wertebereich für Umgebungstemperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchte ist wie folgt:

- Umgebungstemperatur: $T = 291,15 \text{ K}$ bis $295,15 \text{ K}$
- Umgebungsdruck: $p = 86 \text{ kPa}$ bis 106 kPa
- relative Luftfeuchte: $r = 0,30$ bis $0,75$

Arbeiten außerhalb dieses Bereichs kann zu einer reduzierten Genauigkeit führen.

3.13

Gewebeäquivalenz

(en: tissue equivalence)

Eigenschaft eines Materials, das die Strahlungsabsorptions- und Strahlungstreueigenschaften von ICRU-Gewebe annähert

3.14^{N2}

Transmissionsfaktor im Medium m

$T_m(\rho_m d_m; \alpha)$

(en: transmission factor in medium m)

Quotient Energiedosis, $D_m(\rho_m d_m; \alpha)$, in einem Medium, m, bei einer Massenflächendichte, $\rho_m d_m$, und einem Strahlungseinfallswinkel, α , durch Energiedosis, $D_m(0; 0^\circ)$, an der Oberfläche eines Phantoms

3.14.1

Transmissionsfaktor in Gewebe

$T_t(\rho_t d_t; \alpha)$

(en: transmission factor in tissue)

Quotient Energiedosis, $D_t(\rho_t d_t; \alpha)$, in ICRU-Gewebe bei einer Massenflächendichte, $\rho_t d_t$, und einem Strahlungseinfallswinkel, α , durch Energiedosis, $D_t(0; 0^\circ)$, an der Oberfläche eines Quader-Phantoms aus ICRU-Gewebe

3.15

Nullpunkt

(en: zero point)

Anzeige des Messgeräts für die Extrapolationskammer-Tiefe, die einer Kammertiefe von null oder keinem Abstand der Elektroden entspricht

4 Kalibrierung und Rückverfolgbarkeit von Referenzstrahlungsfeldern

Die Referenz-Energiedosisleistung eines Strahlungsfelds, das für eine Kalibrierung in Übereinstimmung mit diesem Dokument errichtet wurde, muss auf ein anerkanntes nationales Normal rückführbar sein. Das Verfahren zur Bereitstellung dieser Kalibrier-Rückführbarkeit ist durch die Verwendung eines TransfERNormals gegeben. Dieses kann eine Radionuklidquelle oder ein zugelassenes TransfERNormal sein. Die Kalibrierung des Felds ist genaunommen nur zum Zeitpunkt der Kalibrierung gültig und muss danach, z. B. aus der Kenntnis der Halbwertszeit und der Isotopenzusammensetzung der Radionuklidquelle, abgeleitet werden.

Die Messtechnik, die von einem Kalibrierlaboratorium zur Kalibrierung eines Messgeräts für Betateilchen verwendet wird, muss ebenfalls entsprechend den nationalen Vorschriften zugelassen sein. Ein Gerät des gleichen oder ähnlichen Typs wie das, das routinemäßig vom Kalibrierlabor kalibriert wird, muss sowohl von einem von der Zulassungsstelle oder -institution eines Landes anerkannten Referenzlabor als auch vom Kalibrierlabor kalibriert werden. Diese Messungen müssen von jedem Labor mit seinen eigenen zugelassenen Kalibrierverfahren durchgeführt werden. Um nachzuweisen, dass eine ausreichende Rückverfolgbarkeit erreicht wurde, sollte das Kalibrierlabor innerhalb der vereinbarten Grenzen den gleichen Kalibrierfaktor erhalten, wie er im Referenzlabor erhalten wurde. Verwendet das Kalibrierlabor standardisierte Quellen und Halterungen, die von einem nationalen Referenzlabor kalibriert wurden, so genügt dies, um die Rückführbarkeit auf das nationale Normal sicherzustellen.

^{N2} Nationale Fußnote: Die Benennungen der Begriffe 3.13 und 3.14 wurden gegenüber dem IEC-Original ergänzt, um der Definition entsprechend spezifisch zu sein.

Die Häufigkeit einer Feldkalibrierung sollte so bemessen sein, dass eine hinreichende Sicherheit besteht, dass sich ihr Wert zwischen aufeinanderfolgenden Kalibrierungen nicht außerhalb der Grenzen ihrer Spezifikation bewegt. Die Kalibrierung des vom Labor zugelassenen Transfer-Messgeräts und die Überprüfung der vom Kalibrierlabor verwendeten Messtechniken sollte mindestens alle fünf Jahre oder bei wesentlichen Veränderungen in der Laborumgebung oder entsprechend den nationalen Vorschriften durchgeführt werden.

Bei Kalibrierungen mit Betastrahlungsfeldern, die von Radionuklidquellen erzeugt werden, ist die Rückverfolgbarkeit entweder durch die Verwendung einer Radionuklidquelle, deren Referenz-Energiedosisleistung von einem Referenzlabor bestimmt wurde, oder durch die Bestimmung der Referenz-Energiedosisleistung an der Prüfposition des Messgeräts unter Verwendung eines vereinbarten Transfer-Messgeräts sicherzustellen, das in einem Referenzlabor kalibriert wurde.

5 Allgemeine Grundsätze für die Kalibrierung von Radionuklid-Betastrahlungsfeldern

5.1 Allgemeines

Orts- und Personendosen durch Betastrahlung sind oft schwer zu messen, da sie eine ausgeprägte Inhomogenität über den Bereich der Haut aufweisen und mit der Tiefe variieren. Um die Energiedosisleistung in einem Betastrahlungsfeld an einem Punkt in einem Phantom korrekt zu messen, benötigt man einen sehr kleinen Detektor mit sehr ähnlichen Absorptions- und Streueigenschaften wie das Medium, aus dem das Phantom besteht. Da es keinen idealen Detektor gibt, ist darauf zu achten, dass sowohl bezüglich der Größe des Detektors als auch bezüglich seiner Zusammensetzung ein Kompromiss gefunden wird. Die Konzepte „Skalierungsfaktor“ und „Transmissionsfaktor“ sind hilfreich, um diesen Kompromissen Rechnung zu tragen.

5.2 Skalierung zur Bestimmung der äquivalenten Dicken verschiedener Materialien

Von Cross [1] wurden Skalierungsfaktoren entwickelt, um die in einem Material bestimmte Energiedosis mit derjenigen in einem anderen Material in Beziehung zu setzen. Diese wurden aus der Beobachtung entwickelt, dass für relativ energiereiche Betateilchenquellen die Dosisverteilungen in verschiedenen Medien die gleiche Form haben und sich nur durch einen Skalierungsfaktor unterscheiden, den Cross als η bezeichnete. Ursprünglich wurde er beim Vergleich von Betastrahlungs-Absorptionskurven in verschiedenen Medien beobachtet, wobei $\eta_{m,a}$ der Skalierungsfaktor von Medium m zu Luft (en: air) ist und aus dem Quotienten der gemessenen Absorption bestimmt wurde. Das Konzept wurde so erweitert, dass für eine ebene Quelle unendlicher lateraler Ausdehnung, sowohl für einen isotropen als auch für einen parallelen Strahl, die Energiedosis bei einer Massenflächendichte $\rho_{m1} d_{m1}$ im Medium m1 mit der Energiedosis in Medium m2 bei gleicher Massenflächendichte $\rho_{m2} d_{m2}$ durch die Skalierung mittels $\eta_{m1,m2} \rho_{m2} d_{m2}$ in Beziehung steht,

$$D_{m1}(\rho_{m1} d_{m1}) = \eta_{m1,m2} \cdot D_{m2}(\eta_{m1,m2} \rho_{m2} d_{m2}) = \eta_{m1,m2} \cdot D_{m2}(\rho_{m2} d_{m2}) \quad (1)$$

Dabei ist vorausgesetzt, dass gilt

$$\rho_{m1} d_{m1} = \rho_{m2} d_{m2} \quad (2)$$

$\eta_{m1,m2}$ ist definiert als der Skalierungsfaktor von Medium m1 zu Medium m2. Dabei ist zu beachten, dass die Skalierungsfaktoren Verhältnisse sind, so dass $\eta_{m1,m2} = 1 / \eta_{m2,m1}$ und $\eta_{m1,m3} = \eta_{m1,m2} \eta_{m2,m3}$ ist.

Der Benutzer sollte beachten, dass dieses Konzept nur für Materialien mit Z beziehungsweise einer effektiven Ordnungszahl $\bar{Z}_m$ von weniger als 18 nachgewiesen wurde. Die für verschiedene Materialien berechneten Werte von $\eta_{m,t}$ in Bezug auf das Gewebe sind in Tabelle 1 [2] angegeben.

Wenn m2 Gewebe ist und m1 ein Medium m, reduziert sich Gleichung (1) auf

$$D_m(\rho_m d_m) = \eta_{m,t} \cdot D_t(\eta_{m,t} \rho_m d_m) \quad (3)$$

Wenn eine andere Tiefe d'_m im Medium m betrachtet wird, erhält man eine ähnliche Gleichung.

$$D_m(\rho_m d'_m) = \eta_{m,t} \cdot D_t(\eta_{m,t} \rho_m d'_m) \quad (4)$$

Das Verhältnis der Energiedosis in beliebiger Tiefe zu der an der Oberfläche ($d'_m = 0$) ist als Transmissionsgrad definiert. Wenn also diese Substitution vorgenommen und Gleichung (3) durch Gleichung (4) dividiert wird, ergibt sich

$$T_m(\rho_m d_m) = \frac{D_m(\rho_m d_m)}{D_m(0)} = \left(\frac{D_t(\eta_{m,t} \rho_m d_m)}{D_t(0)} \right) \quad (5)$$

oder

$$T_m(\rho_m d_m) = T_t(\eta_{m,t} \rho_m d_m) \quad (6)$$

Die Transmission durch eine Schicht der Gewebedicke, $\eta_{m,t} \rho_m d_m$, in Gewebe ist gleich der Transmission durch eine Schicht mit einer Dicke von $\rho_m d_m$ im Medium m . Somit ist die Dicke $\rho_m d_m$ gleichwertig zu Gewebe mit einer Dicke von $\eta_{m,t} \rho_m d_m$, da die Transmissionen gleich ist. Die äquivalente Gewebedicke d_t^m kann definiert werden als

$$d_t^m = \eta_{m,t} \rho_m d_m \rho_t - 1 \quad (7)$$

Im Allgemeinen sind die Dosis und die Transmissionsfaktoren Funktionen sowohl der Tiefe als auch des Einfallswinkels in ein Medium. Wenn sie wie oben ohne Angabe eines Winkels ausgedrückt werden, ist der Winkel als 0° anzunehmen.

5.3 Charakterisierung des Strahlungsfeldes in Bezug auf die Eindringfähigkeit

Die Transmissionsfunktion, $T_t(\rho_t d_t; \alpha)$, ist ein wichtiger Parameter des Beta-Referenzstrahlungsfeldes. Aufgrund der endlichen Dicke aller Detektoren zur Messung der Energiedosisleistung ist es notwendig, das Strahlungsfeld hinsichtlich der Eindringfähigkeit zu charakterisieren, bevor es ordnungsgemäß kalibriert werden kann. Da sich die Energiefluenz der Betateilchen in einem Feld ändert, wenn die Betateilchen in das Medium eindringen, ist die Bestimmung der relativen Dosis als Funktion der Tiefe (oder Tiefendosisfunktion) in einem Medium mit einem Detektor durchzuführen, der auf diese Änderung der Energiefluenz nicht empfindlich reagiert. Aus diesem Grund muss die relative Tiefendosisfunktion mit einer dünnen (2 mm oder weniger) Luftionisationskammer bestimmt werden. Eine empfohlene Methode zur Durchführung dieser Bestimmung mit der Extrapolationskammer ist in den Literaturhinweisen [3] [4] angegeben. Aus den Tiefendosisfunktionen werden dann Transmissionsfunktionen erstellt, von denen in Bild 1 Beispiele dargestellt sind. Die gemessenen Transmissionsfunktionen können in Verbindung mit den vorstehend beschriebenen berechneten gewebeäquivalenten Dicken verwendet werden, um Korrekturen in der gemessenen Energiedosisleistung zu bestimmen, die eine andere Phantomtiefe als 0,07 mm z. B. 3 mm berücksichtigen, sowie für die endliche Detektorgröße und die fehlende Materialäquivalenz des Detektormaterials. Sie können auch verwendet werden, um Schwankungen der Energiedosisleistung am Bezugspunkt aufgrund von Schwankungen der Luftdichte zwischen Quelle und Bezugspunkt zu berücksichtigen, sowie die Absorption durch Material vor dem Detektor zu berücksichtigen, das nicht gewebeäquivalent ist (siehe Anhang C).

Bei dicken Detektoren ist zu berücksichtigen, dass die Energiedosisleistung über das Volumen des Detektors gemittelt wird. Unter Vernachlässigung jeglicher Variation der Energiedosisleistung in der Ebene quer zur Feldrichtung wird die durchschnittliche Energiedosisleistung in einem Detektor mit einer Dicke v und einer Dichte ρ , dessen Vorderfläche in einem Phantom der Dichte eins in einer Tiefe d liegt, wie folgt angegeben

$$\bar{D}_m(d, v, p) = \frac{\int_d^{d+pv} D_m(\delta) d\delta}{pv} = \frac{D_m \int_d^{d+pv} T(\delta) d\delta}{pv} = D_m(0) \bar{T}(d, v, p) \quad (8)$$

Bei dicken Detektoren ($v > 0,1$ mm) kann dieser Effekt kompensiert werden, indem der Bezugspunkt von der Mitte des Detektors zur Quelle hin verschoben wird.

6 Kalibrierverfahren mittels einer Extrapolationskammer

6.1 Allgemeines

Eine Extrapolationskammer ist ein primäres Messgerät zur Bestimmung der Dosisleistung in Betastrahlungsfeldern. Es handelt sich um eine Parallelplattenkammer, die aus Komponenten besteht, die es ermöglichen, durch Bewegung einer der Platten zur anderen hin ein variables Ionisationsvolumen zu erreichen. Eine typische Ausführung [5] ist in Bild 2 dargestellt, das ein festes Eintrittsfenster und eine bewegliche Sammelelektrode verwendet. Das Eintrittsfenster dient gleichzeitig als Hochspannungselektrode und besteht aus einer sehr dünnen leitfähigen Kunststoffolie. Das Fenster muss dünn genug sein, um die Betastrahlung nicht übermäßig abzuschwächen, und dennoch stark genug, um nicht durch Anziehung zur geerdeten Sammelelektrode verformt zu werden. Mit Kohlenstoff beladene/beschichtete PET-Folien von etwa $0,7 \text{ mg cm}^{-2}$ sind heute typisch für handelsübliche Geräte. Die Sammelelektrode wird auf Erdpotential gehalten und definiert die Querschnittsfläche des Ionisationsvolumens. Sie muss aus leitfähigem Material bestehen oder eine leitfähige Beschichtung aufweisen und von einer Schutzelektrode umgeben sein, von der sie elektrisch isoliert ist. Diese Isolierung muss dünn genug sein, um die elektrischen Feldlinien im Kammervolumen, die idealerweise homogen und überall senkrecht zu den beiden Elektroden sind, nicht zu stören. In der in Bild 2 dargestellten Ausführung ist die Sammelelektrode aus Polymethylmethacrylat (PMMA) aufgebaut, das eine dünne Beschichtung aus leitfähigem Material aufweist, in die eine schmale Nut eingefräst ist, um die Sammelfläche zu definieren. Die Vorrichtung muss mit genauen Messmitteln ausgestattet sein, um inkrementelle Änderungen des Abstands zwischen den beiden Elektroden, nachfolgend Kammertiefe genannt, zu bestimmen; üblicherweise wird eine am Kolben befestigte Mikrometerschraube verwendet, die die Sammelelektrode antreibt. Eine bipolare Gleichspannungsquelle mit variabler Spannung wird verwendet, um die Hochspannung für die Sammelelektrode zu erzeugen, und ein rauscharmes Elektrometer wird verwendet, um den von der Sammelelektrode aufgenommenen Strom zu messen. Einzelheiten zur Messung des Ionisationsstroms sind in Anhang B angegeben.

6.2 Bestimmung der Beta-Referenz-Energiedosisleistung

Die Bestimmung der Energiedosisleistung in Gewebe durch Betateilchen mittels einer Messung mit einer Extrapolationskammer ergibt sich aus der folgenden allgemeinen Beziehung:

$$\dot{D}_t = \frac{\bar{W}_0}{e} s_{t,a} \left[\frac{\Delta I}{\Delta m_a} \right]_{BG} \quad (9)$$

wobei ΔI die Erhöhung des Ionisationsstroms und Δm_a die Erhöhung der Luftmasse im Sammelvolumen unter Bragg-Gray-Bedingungen (BG) ist. Leider sind Bragg-Gray-Bedingungen üblicherweise nicht bei Messungen der Beta-Referenzstrahlungsfelder realisiert, und um diese Schwierigkeit zu überwinden, werden verschiedene Korrekturen vorgenommen und die Bestimmung der Beta-Referenz-Energiedosisleistung erfolgt mit Hilfe von

$$D_{r,\beta} = \frac{(\bar{W}_0 / e) s_{t,a}}{\rho_{a0}^a} \left[\frac{d}{d\ell} \{ k k' I(\ell) \} \right]_{\ell=0} \quad (10)$$

Dabei ist

- $(\bar{W}_0 / e)$ der Quotient mittlere Energie, die benötigt wird, um ein Ionenpaar in Luft unter Referenzbedingungen zu erzeugen, durch die Elementarladung e mit einem empfohlenen Wert von $(33,88 \pm 0,05) \text{ J C}^{-1}$ [6] (dieser Wert darf unter Standardprüfbedingungen ohne Korrektur verwendet werden);
- ρ_{a0} die Dichte der Luft unter den Referenzbedingungen von Temperatur, Druck und relativer Luftfeuchte;
- a die effektive Fläche der Sammelelektrode;

$\left[\frac{d}{d\ell} \{kk' I(\ell)\} \right]$ der Grenzwert der Steigung des korrigierter Stroms als Funktion der Kammertiefe ℓ ;

$s_{t,a}$ der Quotient mittleres Massenbremsvermögen in Gewebe durch dasjenige in Luft;

k' das Produkt der Korrektionsfaktoren, die unabhängig von der Kammertiefe sind;

k das Produkt der Korrektionsfaktoren, die mit der Kammertiefe variieren.

Die verschiedenen Korrektionsfaktoren sind in den Tabellen 2 und 3 beschrieben, und die Methoden zu ihrer Bestimmung sind in Anhang C aufgeführt. Die Methoden zur Bestimmung der Grenzsteigung sind in Abschnitt B.10 aufgeführt. Die Größe $s_{t,a}$ ist gegeben durch

$$s_{t,a} = \frac{\int_0^{E_{\max}} (\Phi_E)_t (S/\rho)_{el,t} dE}{\int_0^{E_{\max}} (\Phi_E)_t (S/\rho)_{el,a} dE} \quad (11)$$

wobei $(\Phi_E)_t$ das Spektrum der Elektronen (Elektronenfluenz, differenziert nach der Energie) am Bezugspunkt der Extrapolationskammer ist, $(S/\rho)_{el,t}$ das Massenbremsvermögen für ein Elektron mit der kinetischen Energie E in Gewebeersatz und $(S/\rho)_{el,a}$ die entsprechende Größe für Luft. Dabei wird angenommen, dass Sekundärelektronen (Deltaelektronen) ihre Energie dort deponieren, wo sie erzeugt werden, so dass sie nicht zur Elektronenfluenz beitragen. Die obere Grenze der Integrale wird durch die maximale Energie, $E_{\max}$, der Betateilchen im Fluenzspektrum und die untere Grenze durch die niedrigste Energie im Spektrum, hier mit null angegeben, bestimmt. Im Prinzip beinhaltet dieses Spektrum auch alle Elektronen, die durch Bremsstrahlungsphotonen in Bewegung gesetzt werden, aber diese sind üblicherweise von vernachlässigbarer Bedeutung.

Die Werte für $s_{t,a}$ wurden mit Gleichung (11) für mehrere Beta emittierende Radioisotope berechnet [5], unter der idealisierten Annahme, dass die Betateilchen ihre Energie kontinuierlich abbauen. Messungen von $(\Phi_E)_t$ wurden mit Elektronenspektrometern [2] [7] durchgeführt [6] [7]. Diese Daten wurden nicht bezüglich der Rückstreuverluste (weniger als 10 % der einfallenden Betateilchen werden aufgrund der Rückstreuung von der Detektoroberfläche nicht nachgewiesen) oder der Detektorauflösung korrigiert. Sie können jedoch verwendet werden, um $s_{t,a}$ in einer ausreichend guten Näherung zu berechnen, da $(S/\rho)_{el,m}$ nur geringfügig von der Energie der Betateilchen abhängt. Für die Mittelung wurden die Werte von $(S/\rho)_{el,m}$ von Berger et al. [8] verwendet; die Ergebnisse für 0 µm Gewebetiefe sind in Tabelle 4 [3] dargestellt.

Für die Bestimmung der Referenz-Energiedosisleistung sollte zu der Vorderfläche der Extrapolationskammer eine Schicht von PET mit einer solchen Dicke hinzugefügt werden, so dass die Gesamtdicke einschließlich des Fensters 7,6 mg cm⁻² beträgt. Diese Dicke von PET entspricht einer Dicke von 7 mg cm⁻² Gewebe nach der in 5.2 beschriebenen Skalierungsbeziehung.

7 Kalibrierungen mit anderen Messgeräten

7.1 Kalibrierungen mit Thermolumineszenz-Dosimetern

Dünne (weniger als 25 mg cm⁻²) Thermolumineszenz-Dosimeter (TLDs) von Materialien mit niedriger Ordnungszahl, wie LiF:Mg,Ti, Li₂B₄O₃:Mn, Mg₂B₄O₇:Dy/Tm, Al₂O₃:C usw., können ohne Korrektion bezüglich der Detektordicke zur Kalibrierung von Betastrahlungsfeldern für alle Energien erfolgreich eingesetzt werden. Um die besten Ergebnisse zu erzielen, sollten diese Systeme in Beta-Referenzstrahlungsfeldern kalibriert werden. Mit einer Kalibrierung bezüglich Energiedosis in hochenergetischen Photonenstrahlungsfeldern unter Bedingungen mit Elektronengleichgewicht können jedoch ausreichende Ergebnisse erzielt werden. Es ist möglich, dickere Dosimeter ohne Dickenkorrektion zu verwenden, wenn sie mit einem undurchsichtigen Material beladen sind, um das emittierte Licht effektiv auf nur die Oberfläche des Dosimeters zu begrenzen. Werden dickere Dosimeter verwendet, so muss ein unabhängiges Verfahren zur Bestimmung der Transmissionsfunktion im interessierenden Medium verwendet werden, um den Messwert des Dosimeters bezüglich Volumenmittelwerteffekten zu korrigieren (siehe 5.3). Die Messung der Referenz-Energiedosisleistung sollte so durchgeführt werden, dass sich die Mitte des Dosimeters in einer Tiefe von 7 mg cm⁻² in einem gewebeäquivalenten Phantom befindet.

7.2 Kalibrierungen mit thermisch stimulierten Exoelektronenemissions-Dosimetern

Die thermisch oder optisch stimulierte Exoelektronenemission von BeO kann als Dosimeter für die Betastrahlung bei allen interessierenden Referenzstrahlungsenergien verwendet werden, da die geringe Energie der emittierten Exoelektronen ihre Emission auf nur die äußerste (100 nm oder weniger) Oberfläche des Detektors begrenzt und somit effektiv extrem dünn macht. Wie bei Thermolumineszenz-Dosimetern werden sie am besten in Beta-Referenzstrahlungsfeldern kalibriert.

7.3 Kalibrierungen mit Ionisationskammern

Dünne (einige mm oder weniger) Parallelplatten-Ionisationskammern mit festem Volumen können verwendet werden, um Betastrahlungsfelder für alle Energien zu kalibrieren. Dickere Detektoren sind nur für die höchsten Energien ($E_{\max} > 1$ MeV) geeignet. Bei Kalibrierung in Beta-Referenzstrahlungsfeldern können Festvolumen-Ionisationskammern als Transferinstrumente verwendet werden, um die Rückführbarkeit auf nationale Normale sicherzustellen (siehe [Abschnitt 4](#)). Wenn die Rückwand der Kammer nicht dick genug ist (weniger als 2 cm), um eine vollständige Rückstreuung sicherzustellen, sollten die Messungen auf einem Phantom durchgeführt werden.

7.4 Kalibrierungen mit Szintillationsdetektoren

Für die Betadosimetrie wurden eine Reihe von Detektorsystemen entwickelt, die Szintillatoren als empfindliche Elemente für die Detektion einsetzen. Im Impulszählmodus sind diese Systeme sehr empfindlich und können erfolgreich für die energiereichen Betateilchenfelder eingesetzt werden. Die Abmessungen des Szintillators sind jedoch aufgrund der in [5.3](#) beschriebenen Volumeneffekte eine wichtige Einflussgröße für die Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens. Daher müssen Szintillatorsysteme, die zur Kalibrierung von Betastrahlungsfeldern verwendet werden, in Beta-Referenzstrahlungsfeldern des gleichen Typs kalibriert werden, der auch verwendet werden soll. Bei Verwendung im Impulszählmodus ist bei höheren Energiedosisleistungen besonders darauf zu achten, dass mögliche Zählverluste durch die Totzeit der Impulsverarbeitung berücksichtigt werden.

8 Messungen bei nicht senkrechtem Einfall

Messungen bei nicht senkrechtem Einfall zur Bestimmung der Energiedosisleistung in Abhängigkeit vom Einfallswinkel können sowohl mit einer Extrapolationskammer als auch mit dünnen Thermolumineszenz- oder Exoelektronen-Dosimetern durchgeführt werden. Bei der Verwendung einer Extrapolationskammer für diese Messungen ist die Winkelabhängigkeit einiger der Korrekturfaktoren zu berücksichtigen, die auf die gemessenen Ströme angewendet werden. Die empfindlichste Korrektur ist diejenige bezüglich Störungen durch die Seitenwände, die für jeden interessierenden Winkel nach der Methode von Böhm [\[9\]](#) bestimmt werden sollte. Beim Einsatz dünner Thermolumineszenz-Dosimetern eignen sich aufgrund der komplizierten winkelabhängigen Volumeneffekte in dickeren Dosimetern nur die dünnsten Detektoren (effektive Dicken kleiner als 25 μm) [\[10\]](#).

9 Unsicherheiten

Die Kalibrierung eines Strahlungsfelds mit einem Messgerät muss von einer Angabe über die Unsicherheit des angegebenen Werts begleitet werden. Bei der Bestimmung dieses Werts müssen alle Unsicherheiten aller Messungen und Faktoren, die zum angegebenen Wert beitragen, berücksichtigt werden. Die Bestimmung von Werten dieser Unsicherheiten [\[11\]](#) kann entweder auf statistischen Methoden (Typ A) beruhen oder auf andere Weise (Typ B) erfolgen. Für beide Arten der Bestimmung werden die Unsicherheiten als Standardunsicherheiten angegeben. Standardunsicherheiten vom Typ A werden aus der Standardabweichung (σ) des Mittelwerts geschätzt, der sich aus einem Mittelungsverfahren oder einer geeigneten Regressionsanalyse ergibt.

Im Allgemeinen können Messungen auf zwei Arten fehlerhaft sein: Es kann eine konstante Differenz zwischen der Messgröße und der wahren Größe (Offset) geben und/oder eine nicht konstante Differenz, die entweder von dem Wert der zu messenden Größe und/oder von anderen Einflussgrößen wie Zeit oder Temperatur (Verstärkung) abhängt. Bei Messungen mit der Extrapolationskammer, die über einen Bereich von Kammertiefen durchgeführt werden, aus denen eine Grenzsteigung bestimmt wird, sind die Auswirkungen

von Verstärkungsfehlern besonders signifikant. Die für die Bestimmung der Energiedosisleistung mit der Extrapolationskammer erforderlichen Messungen sind diejenigen, die mit der Konfiguration des Geräts verbunden sind, und diejenigen, die mit der Ladungssammlung in den verschiedenen Kammertiefen verbunden sind. Die Messungen zur Konfiguration beinhalten Folgendes:

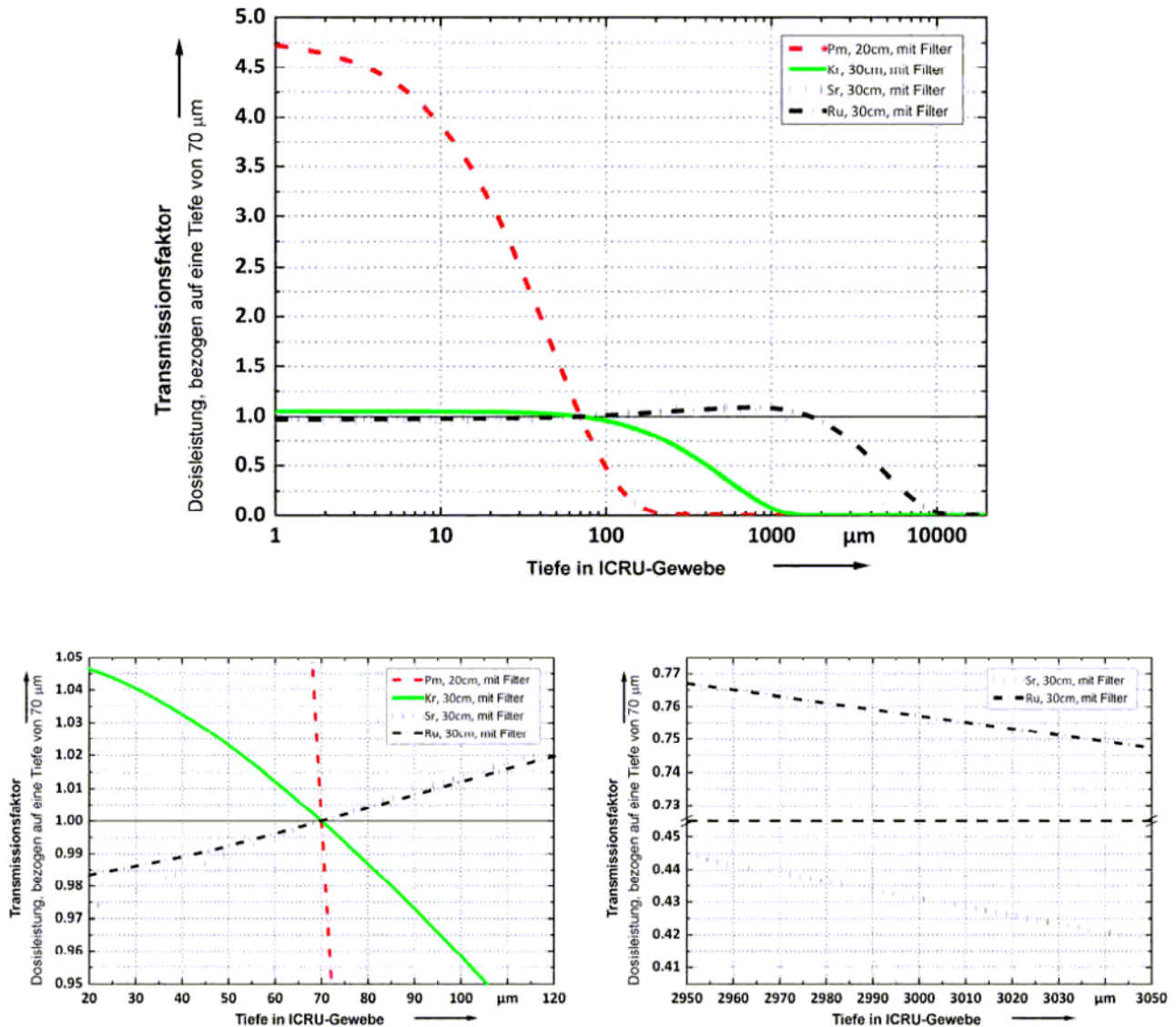
- y_0 den Abstand zwischen der Quellenoberfläche und dem Referenzpunkt der Extrapolationskammer;
- z den Abstand senkrecht zur Strahlachse zwischen der Mitte der Extrapolationskammer und der Strahlachse, idealerweise 0;
- α den Winkel zwischen der Strahlachse und der Extrapolationskammerachse, idealerweise 0° ;
- d_{PET} die Dicke von Eintrittsfenster plus zusätzlichem Material, um eine Dicke von 7 mg cm^{-2} zu erreichen;
- C die Kapazität des Elektrometer-Rückkoppelkondensators;
- a die effektive Fläche der Sammelelektrode.

Die mit der Ladungssammlung verbundenen Messungen betreffen die folgenden Größen:

- l die Kammertiefen;
- U_1, U_2 die Spannungen, die durch den aufgenommenen Strom am Rückkoppelkondensator erzeugt werden;
- t die Integrationsdauer zwischen den Messungen von U_1 und U_2 ;
- T die Umgebungstemperatur;
- p den atmosphärischen Umgebungsdruck;
- r die relative Luftfeuchte der Umgebung;
- $t_m - t_0$ die Zeit zwischen der Messung und der Bezugszeit;
- U die Polarisationsspannung.

Jede dieser Messungen kann grundsätzlich mit Unsicherheiten aufgrund von Offset und Verstärkung behaftet sein, und ihre Kennntnis ist in die vollständige Analyse der Unsicherheit einzubeziehen (siehe [Anhang D](#)).

Darüber hinaus sind die Unsicherheiten aufgrund der Anwendung der verschiedenen in [Anhang C](#) genannten Korrekturfaktoren zu berücksichtigen, insbesondere die Auswirkungen der Unsicherheiten auf die Grenzsteigung. Die Methoden zur Durchführung einer solchen Ermittlung sind in [Anhang D](#) erörtert. Die mit den verschiedenen Komponenten von [Gleichung \(10\)](#) (siehe [6.2](#)) verbundenen Unsicherheiten sind in [Tabelle 6](#) dargestellt, zusammen mit einem Hinweis darauf, wie die Unsicherheiten für die verschiedenen Größen erhalten wurden.

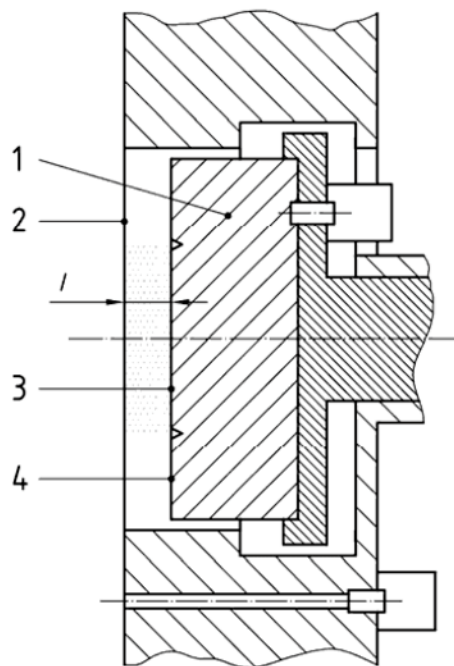


Oberer Teil: Gesamte Tiefendosiskurven mit logarithmischer Skala für Gewebetiefe.

Unterer Teil: Teile der Tiefendosiskurven mit linearer Skala, jeweils für einen Bereich von $\pm 50 \mu\text{m}$ die Gewebetiefen von $70 \mu\text{m}$ und $3000 \mu\text{m}$, jeweils nach links und rechts. Der rechte Teil hat eine unterbrochene Ordinate. Seine Skalengröße entspricht jedoch der des linken Teils.

ANMERKUNG Die Tiefendosiskurve für ^{204}Tl ist der für ^{85}Kr sehr ähnlich.

Bild 1 – Tiefendosiskurven, gemessen im Kalibrierabstand y_0 für einige Betastrahlungsquellen



Legende

- | | | |
|--------------------|-------------------|----------------------|
| 1 Kolben | 3 Sammelelektrode | <i>l</i> Kammertiefe |
| 2 Eintrittsfenster | 4 Schutzring | |

Bild 2 – Schematischer Querschnitt durch die Hauptteile einer Extrapolationskammer

Tabelle 1 – Berechnete Beta-Skalierungsfaktoren bezogen auf Gewebe für Medien mit niedrigem Z-Wert

Medium, m	$\eta_{m,t}$
A-150 Kunststoff	0,983
Luft	0,915
Aluminium	0,915
Aluminiumoxid	0,908
Berylliumoxid	0,849
Calciumfluorid	0,958
Calciumsulfat	0,989
Kohlenstoff	0,875
ICRU-Gewebe	1,000
Lithiumfluorid	0,840
Lithiumtetraborat	0,864
Magnesiumtetraborat	0,883
Plastikszintillator (basierend auf Vinyltoluol)	0,971
Polycarbonate	0,942
Polyethylene	1,012
Polyethylenterephthalat (PET)	0,933
Polyimid	0,916
Polymethylmethacrylate (PMMA)	0,963
Polystyren	0,952
Polytetrafluorethylen (PTFE)	0,884
Silikon	0,958
Haut	0,997
Wasser	1,015

Tabelle 2 – Korrektionsfaktoren, die für die Messungen der gesamten Extrapolationskurve konstant sind

Symbol	Beschreibung	Beeinflussung des Parameters durch			
		Extrapolationskammer	Einsatzbedingungen	Quelle	Bestrahlungsbedingungen
k_{ba}	Korrektionsfaktor für Rückstreuunterschiede zwischen Gewebe und dem Material der Sammelelektrode	+		+	+
k_{brf}	Korrektionsfaktor für die Auswirkung der Bremsstrahlung aus der Betaquelle			+	
k_{el}	Korrektionsfaktor für die elektrostatische Anziehung des Eintrittsfensters durch die Sammelspannung	+	+		
k_{hu}	Korrektionsfaktor für den Einfluss der Luftfeuchte im Sammelvolumen auf die durchschnittliche Energie, die zur Erzeugung eines Ionenpaares benötigt wird		+		
k_{in}	Korrektionsfaktor für Grenzflächeneffekte zwischen der Luft im Sammelvolumen sowie dem angrenzenden Eingangsfenster und der Sammelelektrode	+			
k_{ph}	Korrektionsfaktor für die Änderung des Abstands zwischen Quelle und Kammer durch Absorber, die vor der Kammer platziert sind (zur Erhöhung der Phantomtiefen)			+	+
k_{Sta}	Korrektionsfaktor für die Änderung des Verhältnisses des Bremsvermögens bei unterschiedlichen Phantomtiefen		+	+	+

Tabelle 3 – Korrektionsfaktoren, die während der Messungen der Extrapolationskurve variieren können

Symbol	Beschreibung	Beeinflussung des Parameters durch			
		Extrapolationskammer	Einsatzbedingungen	Quelle	Bestrahlungsbedingungen
k_{abs}	Korrektionsfaktor für Schwankungen in der Abschwächung von Betateilchen zwischen Quelle und Sammelvolumen und im Sammelvolumen aufgrund von Abweichungen von den Referenzbedingungen	+	+	+	+
k_{ad}	Korrektionsfaktor für Abweichungen der Luftdichte im Sammelvolumen von den Referenzbedingungen		+		
k_{de}	Korrektionsfaktor für radioaktiven Zerfall der Betaquelle			+	
k_{ih}	Korrektionsfaktor für Inhomogenität der Energiedosisleistung innerhalb des Sammelvolumens	+		+	+
k_{pe}	Korrektionsfaktor für Störung der Beta-Teilchenflussdichte durch die Seitenwände der Extrapolationskammer	+		+	+
k_{SA}	Korrektionsfaktor für Änderung des Bremsvermögens durch Verwendung der Spencer-Attix-Theorie statt der Bragg-Gray-Theorie			+	+
k_{sat}	Korrektionsfaktor für Ionisationsverluste durch Ionenrekombination	+	+		+

Tabelle 4 – Berechnete Quotienten mittleres Massenbremsvermögen in Gewebe durch dasjenige in Luft

Wert von $s_{t,a}$ in 0 μm Tiefe für das Radionuklid					Relative Standardmessunsicherheit (%)
	^{147}Pm	$^{204}\text{Tl}, ^{85}\text{Kr}$	$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	$^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$	
	1,124	1,121	1,110	1,099	0,6

Tabelle 5 – Beispiele für Unsicherheiten (1σ), die Messungen zugeordnet sind, die zur Bestimmung der Energiedosisleistung mittels einer Extrapolationskammer erforderlich sind

Korrektionsfaktor oder Größe	Einheit	Literaturhinweis für den angegebenen Wert	Methode zur Bestimmung der Standardmessunsicherheit	Wert der Standardmessunsicherheit für das Radionuklid				
					^{147}Pm	^{204}Tl und ^{85}Kr	$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	$^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$
y_0	mm		B				0,3	
Z	mm		B				0,3	
α	Grad		B				0,1	
$\rho_{\text{PET}} d_{\text{PET}}$	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$		A				0,000 1	
C	pF		A-B				0,1	
a	cm^2	[3]	A-B				0,005	
ℓ	mm		B				0,001	
U_1	V		A				a	
			B				0,003	
U_2	V		A				a	
			B				0,003	
t	s		B				0,001	
T	K		B				0,1	
p	kPa		B				0,05	
r			B				0,02	
$t_m - t_0$	s		B				0,1	
U	V		B				0,1	

^a Die Größe der statistischen Unsicherheit hängt vom Signalpegel ab.

Tabelle 6 – Beispiele für Unsicherheiten (1σ), die Parametern zugeordnet sind, die zur Berechnung der Energiedosis aus Messungen mit einer Extrapolationskammer erforderlich sind

Korrektionsfaktor oder Größe	Einheit	Wert des Korrektionsfaktors oder der Größe	Methode zur Bestimmung der Standardmessunsicherheit (A oder B)	Wert der Standardmessunsicherheit für das Radionuklid				
				⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	²⁰⁴ Ti; ⁸⁵ Kr	¹⁴⁷ Pm		¹⁰⁶ Ru+hRh
^s _{t,a}	—	1,110 – 1,133	B	0,007				
($\bar{W}_0/e$)	J·C ⁻¹	33,88	B	0,05				
<i>a</i>	cm ²	7,251 ^b	B	0,005				
ρ_{a0}	kg·m ⁻³	1,197 40	B	0,000 5				
<i>I</i> ₊	fA	a	A – B	0,2 (A) und 0,4 (B)				
<i>I</i> ₋	fA	a	A – B	0,2 (A) und 0,4 (B)				
<i>l</i>	mm	0,25 – 2,5	B	0,001				
<i>k</i> _{ba}	—	1,0 – 1,01	B	0,003	0,003	0,004		0,003
<i>k</i> _{br}	—	0,995	B	0,002				
<i>k</i> _{el}	—	1	B	0,001				
<i>k</i> _{hu}	—	1		0,000 5	0,000 5	0,001		0,000 5
<i>k</i> _{in}	—	1	B	0,000 1				
<i>k</i> _{ph}	—	1,0 – 0,67	B	0,001				
Steigung <i>d</i> / <i>dℓ</i>	fA·mm ⁻¹	300	B	0,4	0,6	0,9		0,6
<i>k</i> _{abs}	—	0,84 – 1,25	B	0,003	0,002	0,006		0,002
<i>k</i> _{ad}	—	0,95 – 1,10	B	0,006				
<i>k</i> _{de}	—	1	B	0,000 1	0,000 1	0,000 2		0,002
<i>k</i> _{ih}	—	1,005	B	0,001				
<i>k</i> _{pe}	—	1,002	B	0,001				
<i>k</i> _{SA}	—	1,005	B	0,002				
<i>k</i> _{sat}	—	1,005	B	0,002				
^a Für Werte von <i>I</i> ₊ und <i>I</i> ₋ zwischen 5 fA und 400 0 fA.								
^b Typischer Wert für ein häufig verwendetes Gerät.								

Anhang A (informativ)

Liste der Symbole

a	wirksame Fläche der Extrapolationskammer-Sammelelektrode
BG	Bragg-Gray-Bedingungen
C	externe Rückkoppelkapazität
C_k	Kapazität der Extrapolationskammer
c_i	Koeffizient der polynomialen Anpassungsfunktionen
d_{abs}	Dicke des Absorbers vor der Extrapolationskammer
d_m	Tiefe in einem Medium m
d_t	Tiefe in ICRU-Gewebe
d_t^m	gewebeäquivalente Dicke des Mediums m
d_0	Bezugstiefe im Gewebe von 0,07 mm oder 3 mm
$D_m(d_m)$	Energiedosis in der Tiefe d_m im Medium m
D_R	Referenz-Energiedosis
$D_{R\beta}$	Beta-Referenz-Energiedosis
$\tilde{D}(z, \varphi)$	relative Energiedosis, gemessen bei (z, φ) in einer Ebene senkrecht zur Strahlachse
$\bar{D}(d_m, v, \rho_m)$	volumengemittelte Dosis in einem Detektor der Dicke v , der Dichte ρ_m in der Tiefe d_m
$D_p(d)$	Personen-Energiedosis in einer Tiefe d in ICRU-Gewebe
$D'(d; \vec{\Omega})$	Richtungs-Energiedosis in einer Tiefe d , auf einem Radius mit Richtung $\vec{\Omega}$
E	Energie eines Elektrons
E_1	Konstante in der Gleichung zur Sättigungskorrektur
E_{max}	maximale Energie eines Betaspektrums
E_{res}	maximale Restenergie eines Betaspektrums
e	Ladung eines Elektrons
f_i	Koeffizienten, die für die Berechnung von k_{pe} verwendet werden
$H_p(d)$	Personen-Äquivalentdosis in der Tiefe d in ICRU-Gewebe
$H'(d; \vec{\Omega})$	Richtungs-Äquivalentdosis in der Tiefe d , auf einem Radius der Richtung $\vec{\Omega}$
I	Ionisationsstrom
I_L	Leckstrom, nicht durch Vorbestrahlung der Kammer induziert
I_{br}	Ionisationsstrom, verursacht durch Bremsstrahlung
I_p	parasitärer Strom
I_+	Strom, gemessen mit positiver Polarität der Sammelspannung
I_-	Strom, gemessen mit negativer Polarität der Sammelspannung
ICRU	Internationale Kommission für Strahlungseinheiten und Messungen (en: International Commission on Radiation Units and Measurements)
ISO	Internationale Organisation für Normung
k	Produkt der Extrapolationskammer-Korrekturfaktoren, die während der Messung der Extrapolationskurven variieren
k'	Produkt der Extrapolationskammer-Korrekturfaktoren, die während der Messung der Extrapolationskurven konstant sind

k_{abs}	Korrektionsfaktor für Schwankungen von Absorption und Streuung von Betateilchen zwischen Quelle und Sammelvolumen sowie innerhalb des Sammelvolumens aufgrund von Abweichungen von Referenzbedingungen
k_{ad}	Korrektionsfaktor für Abweichungen der Luftdichte im Sammelvolumen von Referenzbedingungen
k_{ba}	Korrektionsfaktor für die Differenz der Rückstreuung zwischen Gewebe und dem Material der Sammelelektrode und des Schutzrings
k_{br}	Korrektionsfaktor für den Effekt der Bremsstrahlung aus der Betaquelle
k_{de}	Korrektionsfaktor für den radioaktiven Zerfall der Betaquelle
k_{el}	Korrektionsfaktor für die elektrostatische Anziehung des Eingangsfensters durch die Sammelspannung
k_{hu}	Korrektionsfaktor für den Einfluss von Luftfeuchte im Sammelvolumen auf $\bar{w}_0$
k_{ih}	Korrektionsfaktor für die Inhomogenität der Energiedosisleistung innerhalb des Sammelvolumens
k_{in}	Korrektionsfaktor für Grenzflächeneffekte zwischen der Luft des Sammelvolumens und dem angrenzenden Eingangsfenster und der Sammelelektrode
k_{pe}	Korrektionsfaktor für Störung der Betaflussdichte durch die Seitenwände der Extrapolationskammer
k_{ph}	Korrektionsfaktor für die Änderung des Abstands zwischen Quelle und Kammer, sobald Absorber vor der Kammer platziert sind (zur Erhöhung der Phantomtiefe)
k_{SA}	Korrektionsfaktor für das Bremsvermögen durch Verwendung der Spencer-Attix-Theorie anstelle der Bragg-Gray-Theorie
k_{sat}	Korrektionsfaktor für Ionisationssammelverluste durch Ionenrekombination
k_{Sta}	Korrektionsfaktor für Änderung des Bremsvermögens bei unterschiedlichen Phantomtiefen
k^*	Boltzmann-Konstante
ℓ	Tiefe der Extrapolationskammer, der Luftspalt zwischen der Sammelelektrode und dem Eintrittsfenster
ℓ_0	Schnittpunkt der Extrapolationskurve mit der Kammertiefenachse
m_{a}	Masse der Luft im Sammelvolumen einer Extrapolationskammer
p	Umgebungsluftdruck
p_0	Bezugswert für den Umgebungsluftdruck
PMMA	Polymethylmethacrylate
PET	Polyethylenterephthalat
PTFE	Polytetrafluorethylen
q_{m}	gemessene Ionisationsdichte
r	relative Luftfeuchte der Umgebung
r_0	Bezugswert für die relative Luftfeuchte der Umgebung
$(S/\rho)_{\text{el,m}}$	Massenbremsvermögen im Material m
$s_{\text{t,a}}$	Quotient Massenbremsvermögen von ICRU-Gewebe durch dasjenige von Luft
T	Umgebungstemperatur
T_0	Bezugswert der Umgebungstemperatur
$T_{\text{m}}(\rho_{\text{m}} d_{\text{m}}; \alpha)$	Transmissionsfaktor $D_{\text{m}}(\rho_{\text{m}} d_{\text{m}}; \alpha)/D_{\text{m}}(0; 0^\circ)$ im Medium m
$T_{\text{t}}(\rho_{\text{t}} d_{\text{t}}; \alpha)$	Transmissionsfaktor $D_{\text{t}}(\rho_{\text{t}} d_{\text{t}}; \alpha)/D_{\text{t}}(0; 0^\circ)$ in Gewebe
t	Integrationsdauer für eine Strommessung
t_{m}	Zeitpunkt, zu dem eine Messung durchgeführt wird

t_0	Bezugszeit, auf die die Messungen korrigiert werden, um den radioaktiven Zerfall zu berücksichtigen
$t_{1/2}$	Halbwertszeit eines Radioisotops
U	Absolutwert der Sammelspannung in der Extrapolationskammer
U_1, U_2	Anfangs- und Endspannung über dem Rückkoppelkondensator, der mit Strom aus der Extrapolationskammer geladen wird
v	Dicke eines Detektors
$\bar{W}_0$	mittlere Energie zur Erzeugung eines Ionenpaares in Luft unter Referenzbedingungen
x_c	Durchmesser der geometrischen Fläche der Sammelelektrode
x_g	Breite des Isolierspalts zwischen Sammel- und Schutzelektrode
y_0	Abstand von der Quelle zum Bezugspunkt des Detektors
z	Abstand von der Strahlachse, gemessen senkrecht zu dieser Achse
$\bar{Z}_m$	effektive Ordnungszahl des Mediums m
α	Winkel zwischen der Richtung der Strahlachse und der Normalen auf die Oberfläche des Phantoms
Γ_0	Konstante in der Gleichung für den Sättigungskorrektionsfaktor
ε_a	Dielektrizitätskonstante für Luft
$\eta_{m1,m2}$	Skalierungsfaktor für Beta-Absorption des Mediums m1 relativ zu Mediums m2
ρ_a	Dichte der Luft bei Umgebungsbedingungen
ρ_{a0}	Dichte der Luft bei Referenzbedingungen
ρ_m	Dichte des Mediums m
ρ_t	Dichte von ICRU-Gewebe
σ	Standardabweichung
τ_{br}	Beitrag zur Dosis durch Bremsstrahlung, d. h. $\tau_{br} = 1 - k_{br}$
Φ_E	spektrale Verteilung der Fluenz der Betateilchen
φ	Winkel in einer Ebene senkrecht zur Strahlachse

Anhang B (informativ)

Messungen mit Extrapolationskammer

B.1 Anwärmen des Elektrometers und Stabilitätsprüfungen

Im Idealfall sollte das Elektrometer, das für die Strommessung mit der Referenz-Extrapolationskammer verwendet wird, kontinuierlich mit Strom versorgt werden. Wenn die Stromversorgung unterbrochen wird, sollte das Elektrometer bei Wiederkehr der Stromversorgung mindestens 4 h lang warmlaufen und sich stabilisieren können. Aufzeichnungen über aktuelle Messungen mit Standard-Betaquellen sollten als Qualitätskontrolle des gesamten Strommesssystems geführt werden.

B.2 Bestimmung des Leckstroms

Bei Messungen in Geometrien oder mit Quellen, die zu niedrigen Ionisationsströmen in der Extrapolationskammer (< 100 fA) führen, sollte der Leckstrom häufig gemessen werden, um seine Größe und ggf. Polaritätsabhängigkeit zu überprüfen. Dies sollte vorzugsweise mit der aus dem Stativ entfernten Quelle erfolgen, um den Beitrag zum Leckstrom (siehe Abschnitt B.3) aufgrund von Bremsstrahlung aus dem Verschluss der Quelle zu entfernen. Bei Quellen mit geringer Aktivität (< 200 MBq) von ^{204}Tl oder ^{147}Pm ist es oft ausreichend genau, die Quellen während dieser Messungen an Ort und Stelle zu belassen, insbesondere bei automatisierten Messungen über lange Integrationsdauern.

B.3 Messungen mit beiden Polaritäten

In jeder Kammertiefe werden Strommessungen sowohl bei positiven als auch bei negativen Polaritäten durchgeführt. Dies liegt an der Wechselwirkung des Betateilchenstrahls mit der Sammelelektrode, wodurch dem polaritätsabhängigen Ionisationsstrom immer ein negativer Strom überlagert wird. Wenn der bei positiver Polarität gemessene Strom mit I_+ und der bei negativer Polarität mit I_- bezeichnet wird, ist der Strom durch Ionisation im Kammervolumen gegeben durch

$$I = (I_+ - I_-) / 2 \quad (\text{B.1})$$

Diese Gleichung geht davon aus, dass

- der parasitäre Strom I_p unabhängig von der Polarität ist,
- alle zusätzlichen, nicht von der Quelle induzierten Ströme, wie z. B. aus Leckagen oder elektrischem Hintergrund, nachstehend Leckstrom, I_L , genannt, ebenfalls unabhängig von der Polarität der Sammelspannung sind; und
- alle anderen Störströme aufgrund von strahlungsinduzierten Leckagen oder Ionisationen, die durch Bremsstrahlung oder Betateilchen in der Luft des Vorverstärkers oder in kleinen Luftspalten in unmittelbarer Nähe der Leitung, die die Sammelelektrode mit dem Vorverstärker verbindet, erzeugt werden, vernachlässigt werden können.

Für Betaquellen niedriger Dosisleistung müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden, um sicherzustellen, dass der Leckstrom relativ konstant und polaritätsunabhängig ist. Es muss beachtet werden, dass die Summe der parasitären und Leckströme nach

$$I_p + I_L = (I_+ + I_-) / 2 \quad (\text{B.2})$$

bestimmt werden kann, wenn der Ableitstrom zeitlich nur langsam und polaritätsunabhängig variiert. Bei abnehmenden Luftspalten ist mit einem leichten Anstieg des parasitären Stroms zu rechnen. Abweichungen von diesem Verhalten sind symptomatisch für Probleme im Zusammenhang mit variablem Ableitstrom; daher ist der parasitäre Strom ein nützlicher Parameter zur Qualitätskontrolle.

Ist der Leckstrom von der Polarität der Sammelspannung abhängig, müssen I_+ und I_- getrennt hinsichtlich Leckstrom korrigiert werden.

B.4 Elektrische Feldstärke

Da einige Korrekturen des gemessenen Stroms, wie z. B. bezüglich der Rekombination, Funktionen der elektrischen Feldstärke sind, wird empfohlen, in jeder Kammertiefe eine konstante elektrische Feldstärke zu verwenden. Dabei wird die Hochspannung bei jeder Änderung der Kammertiefe verändert. Die Wahl der verwendeten Feldstärke wird durch den Wunsch bestimmt, die Rekombination auf ein Minimum zu beschränken, jedoch keine Verformung der Hochspannungselektrode auf Grund von Anziehung durch die Sammelelektrode zu verursachen oder das Niveau der Ionenvervielfachung zu überschreiten. Zur Erreichung dieser Ziele wird eine elektrische Feldstärke von 10 V mm^{-1} empfohlen.

B.5 Wahl der Kammertiefen

Der Bereich der Kammertiefen sollte so gewählt werden, dass die Steigung der Extrapolationskurve eindeutig festgelegt wird. Die kleinste Kammertiefe sollte so nah wie möglich an null gewählt werden, aber groß genug, so dass der Strom messbar ist. Es sollten mindestens fünf Kammertiefen gewählt werden, die einen Bereich überspannen, über den der gemessene Strom linear mit der Kammertiefe ist. Die kleinste Kammertiefe sollte nicht größer als 0,5 mm sein, während die größte nicht größer als 2,5 mm sein sollte. Die empfohlene Wahl der Kammertiefe liegt zwischen 0,25 mm und 2,5 mm in Schritten von 0,125 mm.

B.6 Verfahren für die Strommessung

Das Verfahren der Ladungsmessung mit einem externen Rückkoppelkondensator wird wegen seiner höheren Empfindlichkeit und Anzeigegenauigkeit gegenüber der direkten Messung des Stroms mit einem Ampere-meter empfohlen. Um dies richtig zu nutzen, muss der externe Kondensator genau kalibriert und die Integrationsdauer genau bekannt und kontrolliert sein. Der gemessene Strom ist dann gegeben durch

$$I_{+,-} = C (U_2 - U_1) / t \quad (\text{B.3})$$

Dabei ist

C die äußere Kapazität (einschließlich derjenigen des Elektrometers);

t die Integrationsdauer;

U_1 und U_2 sind die vom Elektrometer im externen Rückkoppelmodus zu Beginn und am Ende der Integrationsperiode gemessenen Spannungen.

B.7 Integrationsdauern

Die Integrationsdauern sollten entsprechend dem gemessenen Signalpegel gewählt werden. Offensichtlich sind bei sehr kleinen Strömen längere Integrationsdauern notwendig, um Fluktuationen aufgrund von Schwankungen des Leckstroms auszugleichen. Typische Werte des Leckstroms liegen in der Größenordnung von 0,5 fA, was für eine Quelle mit einer Dosisleistung von $1 \text{ } \mu\text{Gy/s}$ bei einer Extrapolationskammer mit einem Sammelelektroden Durchmesser von 30 mm und einer Kammertiefe von 0,25 mm etwa 10 % des Messsignals beträgt. Eine gute Faustregel ist, dass Integrationsdauern verwendet werden sollten, die ausreichen, um mindestens 0,5 pC zu sammeln. Daher wird für das oben genannte Beispiel eine Integrationsdauer von 100 s empfohlen. Während es bequem ist, die gleiche Integrationsdauer unabhängig von der Kammertiefe zu verwenden, ist es oft effizienter, die Integrationsdauer in Abhängigkeit von der Kammertiefe zu variieren, indem kürzere Integrationsdauern für größere Kammertiefen entsprechend der oben genannten Faustregel verwendet werden.

B.8 Wiederholte Ablesungen

Es ist immer notwendig, wiederholte Ablesungen bei jeder Kammertiefe und jeder Polarität durchzuführen, um die statistische Unsicherheit der Messung zu ermitteln. Bei der Bestimmung der Anzahl der notwendigen Wiederholungen muss der Signalpegel und der Einfluss eines Polaritätswechsels auf die Stabilität der Ionisationskammer berücksichtigt werden. Für sinnvolle Standardabweichungen sollten bei jeder Polarität und jeder