

DIN 6800-2

ICS 17.240

Ersatz für
DIN 6800-2:2008-03 und
DIN 6800-2
Berichtigung 1:2010-04

**Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und
Elektronenstrahlung –
Teil 2: Dosimetrie hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung
mit Ionisationskammern**

Procedures of dosimetry with probe-type detectors for photon and electron radiation –
Part 2: Ionization chamber dosimetry of high energy photon and electron radiation

Méthodes dosimétriques à l'aide de sondes pour les rayonnements photonique et
électronique –

Partie 2: Dosimétrie des rayonnements photonique et électronique à haute énergie avec
chambres d'ionisation

Gesamtumfang 96 Seiten

DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR)

Inhalt

	Seite
Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Messprinzip und Messverfahren	14
5 IONISATIONSKAMMERN und PHANTOME	14
5.1 Auswahl der Bauart von IONISATIONSKAMMERN	14
5.1.1 Allgemeines	14
5.1.2 Hochenergetische PHOTONENSTRAHLUNG	15
5.1.3 Hochenergetische ELEKTRONENSTRAHLUNG	15
5.2 Daten von IONISATIONSKAMMERN	15
5.3 PHANTOME	17
6 Allgemeines zur Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS	18
6.1 Gleichung zur Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS	18
6.2 Positionierung von IONISATIONSKAMMERN bei der Messung	19
6.3 KALIBRIERFAKTOR, EINFLUSSGRÖßEN und BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG	20
6.4 KORREKTIONSFAKTOREN für PHOTONEN- und ELEKTRONENSTRAHLUNG	22
6.4.1 Allgemeines	22
6.4.2 KORREKTIONSFAKTOR k_p zur Berücksichtigung des Einflusses der Luftdichte	22
6.4.3 KORREKTIONSFAKTOR k_h zur Berücksichtigung des Einflusses der Luftfeuchte	22
6.4.4 KORREKTIONSFAKTOR k_s zur Berücksichtigung der unvollständigen Sättigung durch Rekombination	23
6.4.5 KORREKTIONSFAKTOR k_p zur Berücksichtigung der Polarität der Kammerspannung	24
6.4.6 KORREKTIONSFAKTOR k_r zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Positionierung von IONISATIONSKAMMERN bei der Kalibrierung und bei der Messung	25
6.4.7 KORREKTIONSFAKTOR k_T zur Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur, außer auf die Luftdichte	26
7 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei PHOTONENSTRAHLUNG	26
7.1 Allgemeines	26
7.2 REFERENZBEDINGUNGEN für die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei PHOTONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern	27
7.3 Kennzeichnung und Ermittlung der STRAHLUNGSQUALITÄT der einfallenden PHOTONENSTRAHLUNG	28
7.4 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZBEDINGUNGEN	29
7.4.1 Allgemeines	29
7.4.2 Werte des KORREKTIONSFAKTORS $k_{Q,R}$	29
7.5 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN	31
7.5.1 Allgemeines	31
7.5.2 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS auf dem ZENTRALSTRAHL in anderen Tiefen	31
7.5.3 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS im Referenzpunkt bei Variation der FELDDGRÖßE	31
7.5.4 Messung von Dosis-Querprofilen	31
8 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei ELEKTRONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern	32

8.1	Allgemeines	32
8.2	REFERENZBEDINGUNGEN für die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei ELEKTRONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern.....	33
8.3	Kennzeichnung und Ermittlung der STRAHLUNGSQUALITÄT der einfallenden ELEKTRONENSTRAHLUNG und der Referenztiefe	33
8.4	Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZBEDINGUNGEN	34
8.4.1	Allgemeines	34
8.4.2	Werte des KORREKTIONSFAKTORS $k_{E,R}$	34
8.5	Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN	35
8.5.1	Allgemeines	35
8.5.2	Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS auf dem ZENTRALSTRAHL in anderen Tiefen	35
8.5.3	Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS im Referenzpunkt bei Variation der FELDDGRÖÖE	37
9	Bestimmung der MESSUNSICHERHEIT	39
9.1	Allgemeines	39
9.2	MESSUNSICHERHEIT bei der Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS	39
9.3	MESSUNSICHERHEITEN der Eingangsgrößen.....	40
9.3.1	KALIBRIERFAKTOR N	40
9.3.2	Um die NULLANZEIGE verminderte ANZEIGE des DOSIMETERS $M - M_0$	40
9.3.3	Korrektur für den Einfluss der Luftdichte k_ρ	41
9.3.4	Korrektur für den Einfluss der Luftfeuchte k_h	42
9.3.5	Korrektur für den Einfluss der unvollständigen Sättigung k_S	42
9.3.6	Korrektur für den Einfluss der Polarität der Kammeranspannung k_p	43
9.3.7	Korrektur zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Positionierung von IONISATIONSKAMMERN bei der Kalibrierung und bei der Messung k_r	43
9.3.8	Korrektur für andere Temperatureffekte als die Änderung der Luftdichte k_T	43
9.3.9	KORREKTIONSFAKTOR zur Berücksichtigung des Einflusses der STRAHLUNGSQUALITÄT der PHOTONENSTRAHLUNG $k_{Q,M}$	43
9.3.10	KORREKTIONSFAKTOR zur Berücksichtigung des Einflusses der STRAHLUNGSQUALITÄT der ELEKTRONENSTRAHLUNG $k_{E,M}$	44
9.4	Beispiele für Messunsicherheitsbudgets	45
Anhang A (informativ) EFFEKTIVER MESSPUNKT, BEZUGSPUNKTVERSCHIEBUNG und KORREKTIONSFAKTOR k_r		50
A.1	EFFEKTIVER MESSPUNKT und BEZUGSPUNKTVERSCHIEBUNG.....	50
A.2	Die BEZUGSPUNKTVERSCHIEBUNG bei KOMPAKTKAMMERN	51
A.3	Der KORREKTIONSFAKTOR k_r	52
Anhang B (normativ) Umrechnung von Strahlungsqualitäts-Korrekturfaktoren $k_{Q,R}$		53
B.1	Allgemeines	53
B.2	Umrechnung von k_Q -Werten.....	53
B.3	Bestimmung des relativen Anstiegs der Tiefendosiskurve	55
Anhang C (informativ) Ermittlung der KORREKTIONSFAKTOREN für den Einfluss der STRAHLUNGSQUALITÄT $k_{Q,M}$ und $k_{E,M}$		58
C.1	Theoretische Ermittlung aus der Hohlraumtheorie.....	58
C.1.1	BRAGG-GRAY-BEDINGUNGEN.....	58
C.1.2	Verhältnisse der MASSEN-STOÖBREMSVERMÖGEN nach Spencer-Attix.....	58
C.2	Korrekturfaktoren $k_{Q,M}$ für den Einfluss der Strahlungsqualität bei Photonenstrahlung	59
C.2.1	Einführung eines STÖRUNGSFAKTORS	59
C.2.2	STÖRUNGSFAKTOR und Korrektur für den Einfluss der STRAHLUNGSQUALITÄT unter REFERENZBEDINGUNGEN	60

C.2.3	STÖRUNGSFAKTOR und Korrektion für den Einfluss der STRAHLUNGSQUALITÄT unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN.....	61
C.3	KORREKTIONSFAKTOREN $k_{E,M}$ für den Einfluss der STRAHLUNGSQUALITÄT bei ELEKTRONENSTRAHLUNG.....	62
C.3.1	Messungen unter REFERENZBEDINGUNGEN (ELEKTRONENSTRAHLUNG).....	62
C.3.2	Messungen unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN (ELEKTRONENSTRAHLUNG)	63
C.4	Berechnung von STÖRUNGSFAKTOREN mittels Monte-Carlo-Methoden	64
C.4.1	Allgemeines	64
C.5	Experimentelle Ermittlung von $k_{Q,M}$ und $k_{E,M}$	66
Anhang D (normativ) Korrektion der unvollständigen Sättigung.....		68
D.1	Allgemeines	68
D.2	Experimentelle Bestimmung des KORREKTIONSFAKTORS k_S	69
D.2.1	Gepulste Strahlung.....	69
D.2.2	Kontinuierliche Strahlung.....	72
Anhang E (normativ) Die STÖRUNGSFAKTOREN p_V und p_{sp}		74
E.1	Allgemeines	74
E.2	LATERALE DOSISANSPRECHFUNKTION einer IONISATIONSKAMMER	74
E.3	Messung der LATERALEN DOSIS-ANSPRECHFUNKTION einer IONISATIONSKAMMER.....	77
E.4	Korrektion der Wirkung des VOLUMENEFFEKTES durch den STÖRUNGSFAKTOR p_V	78
E.4.1	Allgemeines	78
E.4.2	Bestimmung von p_V im Maximum eines lateralen Dosisprofils.....	78
E.4.3	Rekonstruktion eines lateralen Dosisprofils	80
E.5	STÖRUNGSFAKTOR p_{sp} zur Berücksichtigung der Änderungen des energieabhängigen ANSPRECHVERMÖGENS von IONISATIONSKAMMERN unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN	81
E.5.1	Definition und Berechnung von p_{sp}	81
E.5.2	Werte von p_{sp}	82
Anhang F (informativ) Der Einfluss der Luftfeuchte auf das ANSPRECHVERMÖGEN von IONISATIONSKAMMERN.....		83
Literaturhinweise.....		85
Stichwortverzeichnis.....		94

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 080-00-01 AA „Dosimetrie“ im DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR) in Arbeitsgemeinschaft mit der Deutschen Röntgengesellschaft und in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik, der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin sowie der Deutschen Gesellschaft für Radioonkologie erarbeitet.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

DIN 6800 besteht unter dem allgemeinen Titel *Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung* aus folgenden Teilen:

- Teil 1: Allgemeines
- Teil 2: Dosimetrie hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung mit Ionisationskammern
- Teil 4: Filmdosimetrie

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

Änderungen

Gegenüber DIN 6800-2:2008-03 und DIN 6800-2 Berichtigung 1:2010-04 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Der Anwendungsbereich wurde hinsichtlich der minimalen FELDGROÖßE und der maximalen Strahlungsenergie eingeschränkt. Dieses Dokument ist anwendbar in Photonenstrahlungsfeldern mit FELDGROÖßEN größer gleich $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ mit einer maximalen Erzeugungsspannung von 25 MV und in Elektronenstrahlungsfeldern mit FELDGROÖßEN größer gleich $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ mit einer maximalen Elektronenenergie von 25 MeV.
- b) Es werden auch klinische Beschleuniger ohne AUSGLEICHSFILTER berücksichtigt (sogenannte „flattening filter free beams“).
- c) Die Begriffsdefinitionen wurden überarbeitet und erweitert. Der Begriff VERDRÄNGUNGSEFFEKT wird als Sammelbegriff für den GRADIENTENEFFEKT und den VOLUMENEFFEKT verwendet.
- d) Die Liste der Ionisationskammertypen, für die in diesem Dokument Daten angegeben sind, wurde verkleinert. Es sind nur noch solche Ionisationskammertypen berücksichtigt, die in Deutschland in nennenswertem Umfang für die klinische Dosimetrie eingesetzt werden.
- e) Für FLACHKAMMERN wird (ähnlich wie für Zylinderkammern) eine POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT angegeben; die Methode der Frontwandskalierung entfällt. Bei FLACHKAMMERN wird ebenfalls der KORREKTIONSFAKTOR k_r für den Einfluss der unterschiedlichen Positionierung bei der Kalibrierung und der Messung angewandt.
- f) Es werden Daten für die Verwendung von FLACHKAMMERN in Photonenstrahlungsfeldern angegeben.
- g) Die Symbole k_Q und k_E wurden durch $k_{Q,R}$ und $k_{E,R}$ ersetzt.
- h) Die in diesem Dokument angegebenen Werte der KORREKTIONSFAKTOREN $k_{Q,R}$ und $k_{E,R}$ beruhen auf Monte-Carlo-Rechnungen, die durch Messungen verifiziert wurden.

- i) Bei DOSISMESSUNGEN unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN, insbesondere am Feldrand, wird der KORREKTIONSFAKTOR $k_{NR,Q}$ benötigt. Die Ermittlung der Zahlenwerte von $k_{NR,Q}$ erfordert die Berücksichtigung des VOLUMENEFFEKTES der IONISATIONSKAMMER. In diesem Dokument werden erstmalig Methoden und Ergebnisse zur Lösung dieser Aufgabe bereitgestellt.

Frühere Ausgaben

DIN 6800-2: 1980-06, 1997-10, 2008-03

DIN 6800-2 Berichtigung 1: 2010-04

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument definiert Festlegungen zur Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS und WASSER-ENERGIEDOSISLEISTUNG in Wasser mit offenen, luftgefüllten IONISATIONSKAMMERN nach der Sondenmethode bei DOSISMESSUNGEN für die Teletherapie mit ^{60}Co -Gammastrahlung und mit Bremsstrahlung bei Erzeugungsspannungen im Bereich von 1 MV bis 25 MV und FELDGRÖßEN von mindestens $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ sowie mit ELEKTRONENSTRAHLUNG bei Energien von 3 MeV bis 25 MeV und FELDGRÖßEN von mindestens $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$. Messaufgaben sind die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZBEDINGUNGEN und unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN sowie die Messung von relativen Dosisverteilungen in Wasser einschließlich Tiefendosisverteilungen und Dosis-Querprofilen. Dieses Dokument ist auch anwendbar für DOSISMESSUNGEN in Photonen-Strahlungsfeldern, die von klinischen Beschleunigern ohne AUSGLEICHSFILTER erzeugt werden (sogenannte „flattening filter free beams“).

Geschlossene IONISATIONSKAMMERN sind für die Messaufgaben nach diesem Dokument nicht zu verwenden.

Allgemeine Festlegungen zum Sondenverfahren in der Dosimetrie sowie zur Umrechnung der WASSER-ENERGIEDOSIS in die materialspezifische ENERGIEDOSIS für andere, die IONISATIONSKAMMER umgebende Materialien enthält DIN 6800-1.

Maßnahmen zur Qualitätssicherung in der Dosimetrie für die Strahlentherapie sind in diesem Dokument nicht festgelegt.

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).

DIN 6809-8, *Klinische Dosimetrie — Teil 8: Dosimetrie kleiner Photonen-Bestrahlungsfelder*

DIN 6814-3, *Begriffe in der radiologischen Technik — Teil 3: Dosimetrie*

DIN V ENV 13005, *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*

DIN EN 60731:2014-10, *Medizinische elektrische Geräte — Dosimeter mit Ionisationskammern zur Anwendung in der Strahlentherapie (IEC 60731:2011); Deutsche Fassung EN 60731:2012*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe im Stichwortverzeichnis und die folgenden Begriffe.

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

— DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>

— DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

ANSPRECHVERMÖGEN

<Sondenmethode> Quotient aus der um die NULLANZEIGE M_0 verminderten UNKORRIGIERTEN ANZEIGE M und dem Wert der sie verursachenden WASSER-ENERGIEDOSIS D

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.1, modifiziert - Anmerkung 1 gelöscht, Symbol D_w durch D ersetzt]

3.2

ANZEIGE

M

von einem MESSGERÄT oder MESSSYSTEM gelieferter Größenwert

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei der ANZEIGE kann es sich um die UNKORRIGIERTE ANZEIGE oder die KORRIGIERTE ANZEIGE handeln.

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.2, modifiziert – *M* hinzugefügt]

3.3

BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG

BEZUGSBEDINGUNGEN

Bedingungen, unter denen alle EINFLUSSGRÖßEN und GERÄTEPARAMETER ihre BEZUGSWERTE annehmen

Anmerkung 1 zum Begriff: Der KALIBRIERFAKTOR bezieht sich auf den Betrieb des DOSIMETERS unter BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG.

Anmerkung 2 zum Begriff: Von den BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG zu unterscheiden sind die REFERENZBEDINGUNGEN FÜR DIE DOSISMESSUNG.

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.3, modifiziert - Anmerkung 2 hinzugefügt]

3.4

BEZUGSPUNKT

festgelegter Punkt der DOSIMETERSONDE, durch dessen Koordinaten im Raum die Position der DOSIMETERSONDE beschrieben wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Zusätzlich zur Lage des BEZUGSPUNKTES spielt bei DOSISMESSUNGEN auch die Orientierung der Sonde im STRAHLUNGSFELD eine Rolle.

3.5

BEZUGSPUNKTVERSCHIEBUNG

Δz

Abstand zwischen dem EFFEKTIVEN MESSPUNKT einer IONISATIONSKAMMER und ihrem BEZUGSPUNKT

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Zahlenwert von Δz hängt von der Bauweise der IONISATIONSKAMMER ab.

Anmerkung 2 zum Begriff: Zur messtechnischen Berücksichtigung der BEZUGSPUNKTVERSCHIEBUNG dient die POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT (siehe 6.2).

3.6

BEZUGSWERT

einzelner Wert einer EINFLUSSGRÖßE oder GERÄTEPARAMETER, der für Bezugszwecke ausgewählt wurde

Anmerkung 1 zum Begriff: D. h., ein Wert einer EINFLUSSGRÖßE (oder GERÄTEPARAMETER), bei dem der KORREKTIONSFAKTOR bezüglich der Abhängigkeit von dieser EINFLUSSGRÖßE (oder GERÄTEPARAMETER) den Wert eins annimmt

[QUELLE: DIN EN 60731:2014-10, 3.9]

3.7

Einflussgröße

<Sondenmethode> Größe, die nicht Gegenstand der Messung ist, und deren Änderung die Beziehung zwischen der UNKORRIGIERTEN ANZEIGE und dem MESSERGESBIS beeinflusst

Anmerkung 1 zum Begriff: EINFLUSSGRÖßEN können als Störgrößen von außen einwirken (Temperatur, Luftfeuchte, Netzspannung usw.), als Geräteeigenschaften aus dem Gerät selbst stammen (Nullpunktwanderung, Alterung der Bauteile, Anlaufzeit usw.) oder als einstellbare Hilfsgrößen, die zur Ausführung der Messung notwendig sind, in Erscheinung treten (z. B. die STRAHLUNGSQUALITÄT oder die Strahleneinfallrichtung bei der Messung der DOSIS). Bei der Messung der Dosis können beispielsweise auch die Pulsdosis, die Pulswiederholfrequenz, die Pulsdauer und die mittlere DOSISLEISTUNG EINFLUSSGRÖßEN sein.

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.10, modifiziert - letzten Satz der Anmerkung hinzugefügt]

3.8

EFFEKTIVER MESSPUNKT

EPOM, en: effective point of measurement

<Sondenmethode> Punkt einer DOSIMETERSONDE, der bei DOSISMESSUNGEN an den MESSORT zu bringen ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Mit Hilfe der Positionierung des EFFEKTIVEN MESSPUNKTES am MESSORT erhält man den MESSWERT der WASSER-ENERGIEDOSIS für den betreffenden MESSORT durch Anwendung der Gleichung (2) und Gleichung (3).

Anmerkung 2 zum Begriff: Der EFFEKTIVE MESSPUNKT legt den Ort, an dem die mit der IONISATIONSKAMMER gemessene mittlere LUFT-ENERGIEDOSIS in einer für praktische Anwendungen hinreichend guten Näherung mit der mit einem idealen punktförmigen Bragg-Gray-Detektor gemessenen LUFT-ENERGIEDOSIS übereinstimmt, fest.

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.9, modifiziert - ursprüngliche Anmerkungen 1 und 2 entfernt (sind nun neue Definition BEZUGSPUNKTVERSCHIEBUNG), Gleichungsnummern in Anmerkung 1 angepasst, Anmerkung 2 hinzugefügt]

3.9

FELDEBENE

Ebene senkrecht zum ZENTRALSTRAHL in einem anzugebenden Abstand vom FOKUS

3.10

FELDGRÖßE

Beschreibung eines STRAHLENFELDES durch Angabe der Maße der STRAHLENFELD-FLÄCHE in einer charakteristischen Feldebene

Anmerkung 1 zum Begriff: In diesem Dokument wird die charakteristische Fläche durch die Wendepunkte der lateralen Dosisprofile mit den steilsten Gradienten in einer bestimmten FELDEBENE begrenzt. Bei Beschleunigern *mit AUSGLEICHSFILTER* für alle FELDGRÖßEN und bei Beschleunigern *ohne AUSGLEICHSFILTER* bis zu FELDGRÖßEN von höchstens 10 cm × 10 cm darf zur Bestimmung der charakteristischen Fläche anstelle der Wendepunkte der lateralen Dosisprofile auch die 50 %-Isodosenkurve verwendet werden. Der Fehler der so bestimmten FELDGRÖßE ist für die Anwendung dieses Dokuments vernachlässigbar.

[QUELLE: DIN 6814-8:2016-08, 3.8, modifiziert - Anmerkung 1 ersetzt und Anmerkung 2 gelöscht]

3.11

FLACHKAMMER

IONISATIONSKAMMER mit einem Messvolumen von typischerweise 0,01 cm³ bis 0,5 cm³, deren Elektroden planparallel zueinander angeordnet sind, wobei die Abmessung des Messvolumens in Strahlungseinfallrichtung wesentlich kleiner ist als in der dazu senkrechten Richtung

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.13]

3.12

GRADIENTENEFFEKT

in Tiefenrichtung verminderte Wechselwirkung der PHOTONENSTRAHLUNG und der Sekundärelektronen im endlich ausgedehnten Luftvolumen der IONISATIONSKAMMER im Vergleich zur Dichte dieser Wechselwirkungen im ungestörten Phantommaterial (Wasser)

Anmerkung 1 zum Begriff: Der GRADIENTENEFFEKT kann bei der Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS mit IONISATIONSKAMMERN entweder durch einen STÖRUNGSFAKTOR (üblicherweise mit p_{dis} bezeichnet) oder durch eine Verschiebung des BEZUGSPUNKTES der IONISATIONSKAMMER gegenüber dem MESSORT im PHANTOM berücksichtigt werden. In diesem Dokument wird der GRADIENTENEFFEKT durch die in 6.2 angegebene POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT berücksichtigt, durch die festgelegt ist, dass der EFFEKTIVE MESSPUNKT der IONISATIONSKAMMER am MESSORT positioniert wird.

3.13

HALBWERTTTIEFE

R_{50}

Tiefe in Wasser, in der unter gegebenen Messbedingungen die WASSER-ENERGIEDOSIS 50 % des Maximalwertes der TIEFENDOSISVERTEILUNG beträgt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die HALBWERTTTIEFE dient zur Charakterisierung der STRAHLUNGSQUALITÄT bei ELEKTRONENSTRAHLUNG.

[QUELLE: DIN 6809-1:2010-03, 3.12, modifiziert - Anmerkung 1 geändert, Anmerkung 2 gelöscht]

3.14

IONISATIONSDOSIMETER

Dosis- oder Dosisleistungsmessgerät, das aus einer IONISATIONSKAMMER mit angeschlossener Messvorrichtung für Strom oder Ladung besteht

3.15

IONISATIONSKAMMER

Detektor für ionisierende Strahlung, bestehend aus einer luftgefüllten Kammer, in der ein elektrisches Feld anliegt, das keine Gasverstärkung bewirkt und das an den Elektroden die Ladungen sammelt, die sich aus den im Messvolumen des Detektors durch IONISIERENDE STRAHLUNG erzeugten Ionen und Elektronen ergeben

[QUELLE: DIN EN 60731:2014-10, 3.1.1.1, modifiziert – Anmerkung 1 und Anmerkung 2 gelöscht]]

3.16

KALIBRIERFAKTOR

N

<IONISATIONSDOSIMETER> Faktor zur Umrechnung der unter BEZUGSBEDINGUNGEN erhaltenen UNKORRIGIERTEN ANZEIGE des IONISATIONSDOSIMETERS in den richtigen Wert der WASSER-ENERGIEDOSIS am Ort des BEZUGSPUNKTES der IONISATIONSKAMMER bei Abwesenheit der IONISATIONSKAMMER

Anmerkung 1 zum Begriff: Der KALIBRIERFAKTOR ist der Kehrwert des ANSPRECHVERMÖGENS unter BEZUGSBEDINGUNGEN.

Anmerkung 2 zum Begriff: Wenn die IONISATIONSKAMMER und das Anzeigegerät separat kalibriert wurden, dann ergibt sich der KALIBRIERFAKTOR des IONISATIONSDOSIMETERS als Produkt der KALIBRIERFAKTOREN der IONISATIONSKAMMER und des Anzeigeegerätes.

Anmerkung 3 zum Begriff: Im Folgenden ist mit der Bezeichnung KALIBRIERFAKTOR stets der KALIBRIERFAKTOR für das IONISATIONSDOSIMETER gemeint.

3.17**KALIBRIERFAKTOR*****N***

<IONISATIONSKAMMER> Faktor zur Umrechnung der unter BEZUGSBEDINGUNGEN gemessenen Ionisationsladung oder des Ionisationsstroms auf den richtigen Wert der WASSER-ENERGIEDOSIS bzw. WASSER-ENERGIEDOSISLEISTUNG am Ort des BEZUGSPUNKTES der IONISATIONSKAMMER bei Abwesenheit der IONISATIONSKAMMER

Anmerkung 1 zum Begriff: Der KALIBRIERFAKTOR ist der Kehrwert des ANSPRECHVERMÖGENS unter BEZUGSBEDINGUNGEN.

Anmerkung 2 zum Begriff: Wenn die IONISATIONSKAMMER und das Anzeigergerät separat kalibriert wurden, dann ergibt sich der KALIBRIERFAKTOR des IONISATIONSDOSIMETERS als Produkt der KALIBRIERFAKTOREN der IONISATIONSKAMMER und des Anzeigergerätes.

Anmerkung 3 zum Begriff: Im Folgenden ist mit der Bezeichnung KALIBRIERFAKTOR stets der KALIBRIERFAKTOR für das IONISATIONSDOSIMETER gemeint.

3.18**KOMPAKTKAMMER**

IONISATIONSKAMMER mit einem Messvolumen von typischerweise 0,01 cm³ bis 1,0 cm³, das von einer festen äußeren Elektrode begrenzt wird, die an einem Stiel befestigt ist und üblicherweise symmetrisch zur Achse des Stiels angeordnet ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Bezeichnung „Stiel“ dient hier als Oberbegriff für die zur Halterung der Kammer und zum elektrischen Anschluss dienende mechanische Konstruktion, die starr oder auch flexibel sein kann.

3.19**KORREKTIONSFAKTOR**

<Sondenmethode> Zahlenfaktor, mit dem das unberichtigte Messergebnis (Produkt aus der um die NULLANZEIGE M_0 verminderten UNKORRIGIERTEN ANZEIGE M und dem KALIBRIERFAKTOR N) zum Ausgleich einer systematischen Messabweichung multipliziert wird

Anmerkung 1 zum Begriff: KORREKTIONSFAKTOREN werden durch Messung oder Rechnung ermittelt und sind mit einer UNSICHERHEIT behaftet. Daher ist ein vollständiger Ausgleich nicht möglich.

Anmerkung 2 zum Begriff: Systematische Messabweichungen entstehen durch Abweichung der Messbedingungen von den BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG, z. B. bezüglich der Luftdichte, der Luftfeuchte, der Sättigung, der Polarität der Kammerspannung, der Kammerpositionierung, der Temperatur oder der STRAHLUNGSQUALITÄT.

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.19, modifiziert - Anmerkung 2 hinzugefügt]

3.20**KORRIGIERTE ANZEIGE**

ANZEIGE, in der gegebenenfalls der KALIBRIERFAKTOR sowie einige KORREKTIONSFAKTOREN bereits berücksichtigt sind

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.20]

3.21**LATERALE DOSIS-ANSPRECHFUNKTION**

Faltungskern, welcher das in dem ungestörten Medium in Abwesenheit des Detektors erzeugte ein- oder zweidimensionale DOSISPROFIL in das von dem Detektor angezeigte, durch den VOLUMENEFFEKT des Detektors beeinflusste Messwertprofil überführt

3.22**MESSORT**

Punkt in dem durch die Messsonde ungestörten PHANTOM, für den der MESSWERT der ENERGIEDOSIS ermittelt wird

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.28]

3.23

MESSTIEFE

Tiefenkoordinate des MESSORTES

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei einem nicht wasseräquivalenten oder aus verschiedenen Materialschichten aufgebauten PHANTOM wird zwischen der tatsächlichen MESSTIEFE und der wasseräquivalenten MESSTIEFE unterschieden.

3.24

NENNGEBRAUCHSBEREICH

Wertebereich einer EINFLUSSGRÖßE oder eines Geräteparameters, in dem das Gerät innerhalb der GARANTIEFEHLERGRENZEN arbeitet

3.25

NULLANZEIGE

M_0

UNKORRIGIERTE ANZEIGE eines DOSIMETERS in Abwesenheit der NUTZSTRAHLUNG

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.21]

3.26

OFFENE KAMMER

IONISATIONSKAMMER, die so gebaut ist, dass sich die Luft im Ionisationsvolumen frei mit der Umgebungsluft ausgleichen kann und die Korrektion des ANSPRECHVERMÖGENS bezüglich der Luftdichte erforderlich ist

[QUELLE: DIN EN 60731:2014-10]

3.27

PHANTOM

<Dosimetrie> Objekt, das einen menschlichen Körper oder einen Teil desselben so nachbildet, dass es sich bei einem betrachteten dosimetrischen Verfahren in ausreichender Näherung physikalisch so verhält wie der Körper oder dessen Teil

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.32]

3.28

POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT

<Sondenmethode> im Umgebungsmedium herzustellende Lagebeziehung des BEZUGSPUNKTES einer Sonde zum MESSORT

Anmerkung 1 zum Begriff: Durch die POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT wird ein Detektor so platziert, dass sein EFFEKTIVER MESSPUNKT mit dem MESSORT im Umgebungsmedium zusammenfällt.

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.33, modifiziert - in Anmerkung „beabsichtigten“ entfernt]

3.29

REFERENZBEDINGUNGEN FÜR DIE DOSISMESSUNG

REFERENZBEDINGUNGEN

Bedingungen, unter denen alle EINFLUSSGRÖßEN und GERÄTEPARAMETER vereinbarte, anwendungsnahe Referenzwerte annehmen

Anmerkung 1 zum Begriff: Von den REFERENZBEDINGUNGEN FÜR DIE DOSISMESSUNG zu unterscheiden sind die BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG.

3.30**SONDENMETHODE**

Methode der Dosimetrie zur Bestimmung der ENERGIEDOSIS in einem Material an einem bestimmten Punkt, bei dem eine Dosimetersonde in das interessierende Material eingebracht oder an diesem befestigt und mit diesem zusammen bestrahlt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Nicht alle Verfahren der Dosimetrie beruhen auf der Sondenmethode. Beispiele hierfür sind die Verwendung von Dosis- oder Dosisleistungsmonitoren, die bei Aufstellung im Strahlenfeld außerhalb des bestrahlten Körpers ein zur Dosis bzw. Dosisleistung an einem Punkt im bestrahlten Körper proportionales Signal liefern oder die Verfahren der Strahlenschutzdosimetrie, bei denen Personen- oder Ortsdosimeter verwendet werden, um dosimetrische Strahlenschutzgrößen zu ermitteln oder Organ- und Effektivdosen abzuschätzen.

3.31**STÖRUNGSFAKTOR** **p**

Faktor, mit dem die Einflüsse der Abweichungen von den BRAGG-GRAY-BEDINGUNGEN korrigiert werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Der STÖRUNGSFAKTOR wird oftmals als Produkt aus Einzelstörungsfaktoren p_i dargestellt, die jeder für sich und unabhängig voneinander eine bestimmte Störung berücksichtigen.

Anmerkung 2 zum Begriff: STÖRUNGSFAKTOREN sind oftmals in den KORREKTIONSFAKTOREN zur Berücksichtigung des Einflusses der STRAHLUNGSQUALITÄT enthalten.

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.41, modifiziert - „strahlungsqualitätsabhängigen“ und „Gleichgewichtsbedingungen“ entfernt]

3.32**STRAHLUNGSQUALITÄT**

Parameter zur Klassifizierung der RELATIVEN SPEKTRALEN TEILCHENFLUSSDICHTEN einer STRAHLUNGSART für einen betrachteten Ort.

Anmerkung 1 zum Begriff: Die SPEKTRALE TEILCHENFLUSSDICHTEN als Verteilungsfunktion kann nur mit erheblichem Aufwand ermittelt werden. Eine repräsentative Kennzeichnung durch geeignet gewählte einzelne Parameter ist in der Praxis im allgemeinen ausreichend.

Anmerkung 2 zum Begriff: Zur Charakterisierung der STRAHLUNGSQUALITÄT der einfallenden Strahlung wird bei PHOTONENSTRAHLUNG der STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q , bei ELEKTRONENSTRAHLUNG die HALBWERTTIEFE R_{50} unter REFERENZBEDINGUNGEN verwendet.

Anmerkung 3 zum Begriff: Zur Charakterisierung der STRAHLUNGSQUALITÄT einer PHOTONENSTRAHLUNG an einem beliebigen MESSORT im PHANTOM wird die über die SPEKTRALE TEILCHENFLUSSDICHTEN gemittelte Photonenenergie $\bar{E}$ verwendet.

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.43, modifiziert - Anmerkungen 2 und 3 ergänzt]

3.33**STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX** **Q**

Parameter, durch den die RELATIVE SPEKTRALE TEILCHENFLUSSDICHTEN einer einfallenden hochenergetischen PHOTONENSTRAHLUNG charakterisiert wird

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.44, modifiziert - „einfallenden“ hinzugefügt, Anmerkung 1 und Anmerkung 2 gelöscht]

3.34**UNKORRIGIERTE ANZEIGE** **M**

ANZEIGE, in der der KALIBRIERFAKTOR und die KORREKTIONSFAKTOREN noch nicht berücksichtigt sind

[QUELLE: DIN 6800-1:2016-08, 3.46]

3.35

VERDRÄNGUNGSEFFEKT

<Sondenmethode> die durch das Material der Sonde und die Verdrängung von Phantommaterial bedingte Abweichung der MESSWERTE der WASSER-ENERGIEDOSIS einer DOSIMETERSONDE und eines punktförmigen Detektors am Ort des BEZUGSPUNKTES der Sonde

Anmerkung 1 zum Begriff: Der VERDRÄNGUNGSEFFEKT umfasst die Einflüsse der endlichen Abmessung des Detektors in Strahlrichtung (GRADIENTENEFFEKT) sowie den VOLUMENEFFEKT.

3.36

VOLUMENEFFEKT

Einfluss der vom Ideal des punktförmigen Detektors abweichenden Form und Größe einer IONISATIONSKAMMER auf die der Luft im Messvolumen zugeführte, über das Messvolumen gemittelte ENERGIEDOSIS (zusätzlich zum GRADIENTENEFFEKT)

Anmerkung 1 zum Begriff: Der VOLUMENEFFEKT beruht zum einen auf der Entstehung des Ionisationskammersignals aus Beiträgen aller Volumenelemente des räumlich ausgedehnten Messvolumens, zum anderen auf der Störung des STRAHLUNGSFELDES durch die Anwesenheit der IONISATIONSKAMMER im Umgebungsmedium.

Anmerkung 2 zum Begriff: Da der Einfluss der Ausdehnung der IONISATIONSKAMMER in Tiefenrichtung durch den GRADIENTENEFFEKT berücksichtigt wird, legt der VOLUMENEFFEKT den Einfluss der IONISATIONSKAMMER in einer Ebene senkrecht zur Strahlachse fest.

3.37

ÄQUIVALENTE WASSERSCHICHTDICKE

$d_{\text{äq}}$

Wasserschichtdicke, die auf die Dosis am MESSORT den gleichen Einfluss hat wie die durchstrahlte Schicht eines anderen Materials

4 Messprinzip und Messverfahren

Bei der Ionisationsdosimetrie wird die Ladung der Ionen eines Vorzeichens gemessen, die durch ionisierende Strahlung in einer IONISATIONSKAMMER erzeugt wurden. Die Ionen werden durch ein elektrisches Feld gesammelt, dessen Feldstärke einerseits so groß ist, dass alle Ionen erfasst werden (Sättigung) oder dass ihre Ladung durch Extrapolation auf Sättigung bestimmt werden kann; die Feldstärke ist andererseits so klein, dass Vervielfachung der Ladung durch Gasverstärkung ausgeschlossen ist. Die gesammelte Ladung, die die UNKORRIGIERTE ANZEIGE bewirkt, ist unter diesen Bedingungen proportional zur mittleren LUFT-ENERGIEDOSIS im Messvolumen, zur Größe des Messvolumens und zur Luftdichte. Nach Kalibrierung wird mit der an ein Anzeigegerät angeschlossenen, luftgefüllten IONISATIONSKAMMER die WASSER-ENERGIEDOSIS oder, mit Bezug auf die Zeit, die WASSER-ENERGIEDOSISLEISTUNG gemessen.

Das Messverfahren zur Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS am MESSORT in Wasser beruht auf der Verwendung von IONISATIONSDOSIMETERN, die mit ^{60}Co -Gammastrahlung im Wasserphantom zur ANZEIGE der WASSER-ENERGIEDOSIS in der Einheit Gray (Gy) kalibriert sind. Messungen der WASSER-ENERGIEDOSIS bei anderen Photonenstrahlungsqualitäten als ^{60}Co -Gammastrahlung und bei ELEKTRONENSTRAHLUNG werden durch die Anwendung von KORREKTIONSFAKTOREN ermöglicht.

5 IONISATIONSKAMMERN und PHANTOME

5.1 Auswahl der Bauart von IONISATIONSKAMMERN

5.1.1 Allgemeines

Die Wahl einer geeigneten Bauart von IONISATIONSKAMMERN richtet sich nach

- a) der Messaufgabe,
- b) der STRAHLUNGSQUALITÄT der einfallenden Strahlung,

- c) den geometrischen Bestrahlungsbedingungen (unter anderem der FELDGRÖÖE),
- d) dem Dosisverlauf in der Umgebung des MESSORTES und
- e) der Richtungsverteilung aller zur DOSIS am MESSORT beitragenden Strahlungsanteile.

Typische Messaufgaben sind die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZBEDINGUNGEN, unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN und die Messung von relativen Dosisverteilungen. Die Bauart der Sonde sollte so gewählt werden, dass die durch die IONISATIONSKAMMER verursachte Störung des STRAHLUNGSFELDES möglichst gering ist (siehe auch Anhang A oder Abschnitt C.2). Nach diesem Dokument werden nur OFFENE IONISATIONSKAMMERN verwendet.

In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind für DOSISMESSUNGEN geeignete Ionisationskammertypen angegeben. Andere Ionisationskammertypen dürfen verwendet werden, sofern sie die Anforderungen nach DIN EN 60731:2014-10 erfüllen und alle für die Anwendung dieses Dokuments benötigten Daten einschließlich der zugehörigen MESSUNSICHERHEITEN vorhanden sind.

ANMERKUNG Die benötigten Daten werden entweder experimentell bestimmt (z. B. der KORREKTIONSFAKTOR für die unvollständige Sättigung der Ladungssammlung — siehe Abschnitt D.2) oder aus der Fachliteratur oder Herstellerunterlagen entnommen, sofern diese im Rahmen dieses Dokuments anwendbar sind (z. B. der KORREKTIONSFAKTOR für den Einfluss der STRAHLUNGSQUALITÄT — siehe Anhang B).

5.1.2 Hochenergetische PHOTONENSTRAHLUNG

Für Messaufgaben der Dosimetrie von PHOTONENSTRAHLUNG wird empfohlen, die WASSER-ENERGIEDOSIS an dem jeweiligen MESSORT mit einer KOMPAKTKAMMER zu messen. FLACHKAMMERN dürfen verwendet werden, wobei in der Regel die MESSUNSICHERHEIT bei Verwendung einer FLACHKAMMER größer ist als bei Verwendung einer KOMPAKTKAMMER. Für DOSISMESSUNGEN oder Messungen relativer Dosisverteilungen im Anfangsbereich des Dosisaufbaubereiches unterhalb etwa 80 % des Dosismaximums oder in der Nähe von ebenen Grenzflächen wird die Verwendung von FLACHKAMMERN empfohlen.

5.1.3 Hochenergetische ELEKTRONENSTRAHLUNG

Für Messaufgaben der Dosimetrie von ELEKTRONENSTRAHLUNG wird empfohlen, die WASSER-ENERGIEDOSIS bei allen STRAHLUNGSQUALITÄTEN mit FLACHKAMMERN zu messen. Bei ELEKTRONENSTRAHLUNG mit einer HALBWERTTIEFE R_{50} (siehe 8.3) kleiner als 4 cm (d. h. mittlere Elektronenenergie an der Phantomoberfläche kleiner als etwa 10 MeV) ist die Verwendung von FLACHKAMMERN zwingend vorgeschrieben, bei höheren Energien dürfen für DOSISMESSUNGEN in der Referenztiefe auch KOMPAKTKAMMERN verwendet werden.

ANMERKUNG Die Bauweise einer FLACHKAMMER mit einem geringen Plattenabstand, einem großen Durchmesser der Messelektrode und einer breiten Schutzelektrode bewirkt, dass der Einfluss der Störung der Elektronenfluenz minimiert wird. Obwohl die Bauweise der Markus-Kammer nicht in allen Punkten den Festlegungen für eine FLACHKAMMER nach DIN EN 60731 entspricht, werden die für ihre Anwendung erforderlichen Daten wegen der weiten Verbreitung der Markus-Kammer in diesem Dokument angegeben. Nähere Erläuterungen zu den STÖRUNGSFAKTOREN finden sich in Anhang C.

5.2 Daten von IONISATIONSKAMMERN

In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind Ionisationskammertypen angegeben, die für die Verwendung nach den Festlegungen dieses Dokuments geeignet sind. Für diese Ionisationskammertypen werden die für die DOSISMESSUNG benötigten Daten bereitgestellt.

Tabelle 1 — Geometrische Daten von KOMPAKTKAMMERN, die zur Verwendung nach den Festlegungen dieses Dokuments geeignet sind

HERSTELLER	Typ- bezeichnung	Kammer- name	Nominales Mess- volumen cm ³	Radius des Mess- volumens mm	Länge des Mess- volumens mm	Abstand des BEZUGSPUNKTES von der Kammerspitze ^a mm
Exradin	A1SL	Miniature	0,056	2,02	6,0	4,1
IBA	CC13	Compact	0,13	3,00	5,8	3,5
IBA	FC23-C	Short Farmer	0,23	3,10	8,8	5,8
IBA	FC65-G	Farmer	0,65	3,10	23,1	13,0
IBA	FC65-P	Farmer	0,65	3,10	23,1	13,0
NE	2571	Farmer	0,69	3,15	24,1	13,0
PTW	23331	Rigid	1,0	3,95	22,0	11,5
PTW	23332	Rigid	0,3	2,50	18,0	9,5
PTW	233642	Semiflex	0,125	2,75	6,5	4,5
PTW	30001	Farmer	0,6	3,05	23,0	13,0
PTW	30006	Farmer	0,6	3,05	23,0	13,0
PTW	30010	Farmer	0,6	3,05	23,0	13,0
PTW	30013	Farmer	0,6	3,05	23,0	13,0
PTW	30016	Rigid	0,3	2,50	18,0	9,5
PTW	31002	Semiflex	0,125	2,75	6,5	4,5
PTW	31003	Semiflex	0,3	2,75	16,25	9,5
PTW	31006	PinPoint	0,015	1,00	5,0	3,4
PTW	31010	Semiflex	0,125	2,75	6,5	4,5
PTW	31013	Semiflex	0,3	2,75	16,25	9,5
PTW	31014	PinPoint	0,015	1,00	5,0	3,4
PTW	31016	PinPoint 3D	0,016	1,45	2,9	2,4
PTW	31021	Semiflex 3D	0,07	2,40	4,8	3,45
PTW	31022	PinPoint 3D	0,016	1,45	2,9	2,4
SNC	125c	Scanning	0,108	2,375	7,05	4,15
SNC	600c	Farmer	0,60	3,05	22,7	13,0
^a gemessen entlang der Symmetrieachse der Kammer						

Tabelle 2 — Geometrische Daten von FLACHKAMMERN, die zur Verwendung nach den Festlegungen dieses Dokuments geeignet sind

Hersteller	Typ- bezeichnung	Kammername	Nominales Messvolumen cm ³	Durchmesser des Mess- volumens mm	Abstand des BEZUGSPUNKTES von der Außenseite des Eintrittsfensters mm
IBA	PPC05		0,05	10,0	1,0
IBA	PPC40		0,40	16,0	1,0
PTW	23343	Markus	0,057	5,3	1,30
PTW	34001	Roos	0,39	15,6	1,12
PTW	34045	Advanced Markus	0,02	5,0	1,30
SNC	350p	Parallel plate	0,388	15,6	1,07

5.3 PHANTOME

Bei der Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS in einem Wasserphantom unter REFERENZBEDINGUNGEN müssen die seitlichen Maße des Wasserphantoms mindestens 5 cm größer sein als die verwendete FELDGRÖÖE in der MESSTIEFE. Die Tiefenausdehnung des Wasserphantoms muss mindestens 5 cm größer sein als die maximale MESSTIEFE.

Wird bei horizontaler Einstrahlung in das Wasserphantom eine Phantomwand der Schichtdicke d_{Wand} durchstrahlt, so geht deren ÄQUIVALENTE WASSERSCHICHTDICKE, siehe Gleichung (1)

$$d_{\text{äq}} = \frac{\rho_{\text{e,Wand}}}{\rho_{\text{e,w}}} \cdot d_{\text{Wand}} \quad (1)$$

in die MESSTIEFE ein. Dabei sind $\rho_{\text{e,Wand}}$ und $\rho_{\text{e,w}}$ die volumenbezogenen Elektronendichten von Wandmaterial und Wasser (siehe Tabelle 3).

Das PHANTOM ist so zu positionieren, dass der Fokus-Messort-Abstand unverändert bleibt, in aller Regel muss dazu der Fokus-Phantomoberflächen-Abstand angepasst werden.

ANMERKUNG Hinweise zur Dosimetrie in Festkörperphantomen finden sich in DIN 6800-1.

Tabelle 3 — Elektronendichte (Elektronenzahl/Volumen) $\rho_e = (\rho/\mu)(Z/A_r)_{\text{eff}}$ für einige Stoffe^a

Stoff	Chemische Bruttoformel oder Massenanteile	Dichte ^b ρ g cm ⁻³	$(Z/A_r)_{\text{eff}}$	ρ_e 10 ²³ cm ⁻³	$\rho_e/\rho_{e,w}$
Wasser (20 °C)	H ₂ O	0,998	0,5551	3,336	1,000
Polystyrol	C ₈ H ₈	1,060	0,5377	3,432	1,029
RW3	98 % Polystyrol + 2 % TiO ₂	1,045	0,5364	3,376	1,012
Polyethylen niedriger Dichte	CH ₂	0,92	0,5703	3,160	0,947
Polyethylen hoher Dichte	CH ₂	0,94	0,5703	3,228	0,968
Org. Solid Water (457)	H: 0,084; C: 0,685; N: 0,022; O: 0,185; Cl: 0,001; Ca: 0,023; Mg: >0	1,040	0,5409	3,388	1,02
HE Solid Water (557)	H: 0,081; C: 0,658; N: 0,022; O: 0,194; Na: 0,002; Mg: 0,011; Si: 0,011; Cl: 0,001; Ca: 0,018; S: > 0; B: > 0; Al: > 0	1,03	0,5395	3,353	1,004
Org. CT Solid Water	H: 0,084; C: 0,686; N: 0,022; O: 0,184; Cl: 0,001; Ca: 0,023; Mg: > 0	1,020	0,5409	3,323	0,996
PMMA	C ₅ H ₈ O ₂	1,19	0,5394	3,865	1,159
^a m_u ist die Atommassenkonstante ($m_u = 1,660\,54 \cdot 10^{-27}$ kg) und A_r ist die relative Atommasse.					
^b Herstellerangaben beachten.					

6 Allgemeines zur Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS

6.1 Gleichung zur Ermittlung der WASSER-ENERGIEDOSIS

Bei der Sondenmethode ist der MESSWERT der Wert der WASSER-ENERGIEDOSIS D am MESSORT in dem durch die Messsonde ungestörten Wasserphantom. Er wird in hochenergetischen Photonenstrahlungsfeldern nach der Gleichung (2):

$$D = (M - M_0) \cdot N \cdot k_\rho \cdot k_h \cdot k_s \cdot k_p \cdot k_r \cdot k_T \cdot k_{Q,M} \quad (2)$$

und in hochenergetischen ELEKTRONENSTRAHLUNGsfeldern nach der Gleichung (3):

$$D = (M - M_0) \cdot N \cdot k_\rho \cdot k_h \cdot k_s \cdot k_p \cdot k_r \cdot k_T \cdot k_{E,M} \quad (3)$$

bestimmt. Dabei sind

M die UNKORRIGIERTE ANZEIGE des DOSIMETERS bei Bestrahlung in einem Photonen- oder Elektronenstrahlungsfeld bei der im Kalibrierschein angegebenen Kammerspannung und Polarität und bei Positionierung der IONISATIONSKAMMER nach den Festlegungen dieses Dokuments (siehe 6.2);

M_0 die NULLANZEIGE des DOSIMETERS ohne Bestrahlung;

N	der KALIBRIERFAKTOR für die WASSER-ENERGIEDOSIS bei ^{60}Co -Gammastrahlung;
k_ρ	der KORREKTIONSFAKTOR zur Berücksichtigung des Einflusses der Luftdichte (siehe 6.4.2);
k_h	der KORREKTIONSFAKTOR zur Berücksichtigung des Einflusses der Luftfeuchte (siehe 6.4.3);
k_S	der KORREKTIONSFAKTOR zur Berücksichtigung der unvollständigen Sättigung der Ladungssammlung durch Rekombination von Ladungsträgern (siehe 6.4.4);
k_P	der KORREKTIONSFAKTOR zur Berücksichtigung der Polarität der Kammerspannung (siehe 6.4.5);
k_r	der KORREKTIONSFAKTOR zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Positionierung von Ionisationskammern bei der Kalibrierung und bei der Messung (siehe 6.4.6);
k_T	der KORREKTIONSFAKTOR zur Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur, außer auf die Luftdichte (siehe 6.4.7);
$k_{Q,M}$	der bei <i>PHOTONENSTRAHLUNG</i> anzuwendende KORREKTIONSFAKTOR zur Berücksichtigung des Einflusses der STRAHLUNGSQUALITÄT unter Messbedingungen (siehe 7.1);
$k_{E,M}$	der bei <i>ELEKTRONENSTRAHLUNG</i> anzuwendende KORREKTIONSFAKTOR zur Berücksichtigung des Einflusses der STRAHLUNGSQUALITÄT unter Messbedingungen (siehe 8.1).

ANMERKUNG In der vorherigen Version der Norm wurden die KORREKTIONSFAKTOREN zur Berücksichtigung des Einflusses der STRAHLUNGSQUALITÄT mit k_Q bzw. k_E bezeichnet; hier werden für diese KORREKTIONSFAKTOREN die Symbole $k_{Q,M}$ und $k_{E,M}$ verwendet. Diese neue Bezeichnung verdeutlicht, dass die Werte dieser KORREKTIONSFAKTOREN nicht nur von der STRAHLUNGSQUALITÄT der *einfallenden* PHOTONEN- oder ELEKTRONENSTRAHLUNG bestimmt werden (verdeutlicht durch den Index „Q“ bzw. „E“), sondern auch von den jeweiligen Messbedingungen, wie z. B. der FELDGRÖÖE, der Tiefe im PHANTOM, dem Abstand vom ZENTRALSTRAHL usw. abhängen (verdeutlicht durch den Index „M“).

6.2 Positionierung von IONISATIONSKAMMERN bei der Messung

Die Position einer IONISATIONSKAMMER im Raum wird durch den Ort des BEZUGSPUNKTES beschrieben. Zusätzlich muss die Orientierung der IONISATIONSKAMMER in Bezug auf eine Vorzugsrichtung des Strahlenfeldes (z. B. den ZENTRALSTRAHL) angegeben werden.

Bei FLACHKAMMERN liegt der BEZUGSPUNKT in der Mitte der Grenzfläche zwischen dem Eintrittsfenster und dem Luftvolumen der IONISATIONSKAMMER, aus dem die Ionen gesammelt werden. Bei KOMPAKTKAMMERN liegt der BEZUGSPUNKT auf der Symmetrieachse der IONISATIONSKAMMER in einem vom HERSTELLER angegebenen Abstand von der Kammerspitze (siehe Tabelle 1).

ANMERKUNG 1 In vielen Fällen kann der Ort des im Inneren der IONISATIONSKAMMER liegenden BEZUGSPUNKTES anhand von Markierungen auf der Außenseite der IONISATIONSKAMMER bestimmt werden.

Zur Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS in einem Wasserphantom wird nicht der BEZUGSPUNKT, sondern der EFFEKTIVE MESSPUNKT der IONISATIONSKAMMER in die MESSTIEFE z_M gebracht (siehe Abschnitt A.1). Dies wird erreicht, indem der BEZUGSPUNKT der Kammer in die Tiefe

$$z_B = z_M + \Delta z \quad (4)$$

gebracht wird, siehe Gleichung (4). Werte für die BEZUGSPUNKTVERSCHIEBUNG Δz sind in Tabelle 4 angegeben, diese gelten für alle in diesem Dokument behandelten STRAHLUNGSQUALITÄTEN einschließlich ^{60}Co -Gammastrahlung. Das Vorzeichen von Δz ist zu beachten: Bei KOMPAKTKAMMERN liegt der BEZUGSPUNKT in größerer Tiefe als der MESSORT ($\Delta z \geq 0$), bei FLACHKAMMERN in geringerer Tiefe ($\Delta z \leq 0$).

ANMERKUNG 2 Im Gegensatz zu früheren Ausgaben dieses Dokuments wird nun auch bei FLACHKAMMERN eine von Null verschiedene BEZUGSPUNKTVERSCHIEBUNG Δz angewandt. Dies hat zur Folge, dass sich die Positionierung von FLACHKAMMERN nach den Festlegungen dieses Dokuments von der in früheren Ausgaben der Norm angegebenen POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT unterscheidet. Außerdem ist nun auch bei der Verwendung von FLACHKAMMERN die Anwendung des KORREKTIONSAKTORS k_r erforderlich (siehe Abschnitt A.3).

Tabelle 4 — Lage des BEZUGSPUNKTES, BEZUGSPUNKTVERSCHIEBUNG Δz und KORREKTIONSAKTOR k_r für KOMPAKT- und FLACHKAMMERN

Bauart oder Typ der IONISATIONSKAMMER	Lage des BEZUGSPUNKTES	BEZUGSPUNKT-VERSCHIEBUNG Δz	KORREKTIONSAKTOR k_r
KOMPAKTKAMMER, Radius des Messvolumens r (siehe Tabelle 1)	auf der Symmetrieachse der Kammer (siehe Tabelle 1)	$0,5 \cdot r$	$\frac{1}{1 - 0,006 \text{ mm}^{-1} \cdot \Delta z}$
IBA PPC05	1,00 mm unter der Außenseite der vorderen Kammerwand	−0,6 mm	0,996 4
IBA PPC40	1,00 mm unter der Außenseite der vorderen Kammerwand	−0,4 mm	0,997 6
PTW 23343 Markus	1,30 mm unter der Außenseite der Schutzkappe auf der vorderen Kammerwand	−0,3 mm	0,998 2
PTW 34001 Roos	1,12 mm unter der Außenseite der vorderen Kammerwand	−0,4 mm	0,997 6
PTW 34045 Advanced Markus	1,30 mm unter der Außenseite der Schutzkappe auf der vorderen Kammerwand	0,0 mm	1,000 0

ANMERKUNG 3 Die angegebene Positionierung bewirkt eine Korrektur aller dem Dosisgradienten am MESSORT proportionalen Messfehler, insbesondere des Einflusses der Verdrängung von Phantommaterial durch das Luftvolumen der IONISATIONSKAMMER einschließlich des Einflusses der Form des Luftvolumens auf den Eintritt von SEKUNDÄRELEKTRONEN in das Messvolumen [4]. Der Vorteil der hier angegebenen POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT gegenüber einem STÖRUNGSFAKTOR p_{dis} liegt darin, dass die POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT bei Photonen- und ELEKTRONENSTRAHLUNG für alle Tiefen einschließlich des Aufbaubereiches der Tiefendosisverteilung gilt, während sich Betrag und Vorzeichen von p_{dis} tiefenabhängig ändern können.

ANMERKUNG 4 Die in Tabelle 4 angegebenen Werte von Δz wurden experimentell [1], [2], [3], [4], [5] sowie durch Monte-Carlo-Rechnungen [6], [7], [44] ermittelt.

6.3 KALIBRIERFAKTOR, EINFLUSSGRÖßEN und BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG

Der KALIBRIERFAKTOR N eines IONISATIONSDOSIMETERS wird in einem Kalibrierlabor durch Vergleich mit einem NORMAL für die WASSER-ENERGIEDOSIS so ermittelt, dass sich unter BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG (siehe Tabelle 5) die WASSER-ENERGIEDOSIS D aus dem Produkt der UNKORRIGIERTEN ANZEIGE und des KALIBRIERFAKTORS N ohne Korrekturen ergibt. Das im Kalibrierlabor verwendete NORMAL muss auf ein PRIMÄRNORMAL rückführbar sein.

ANMERKUNG 1 Die mit verschiedenen PRIMÄRNORMALEN unter BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG (siehe Tabelle 5) bestimmten WASSER-ENERGIEDOSEN unterscheiden sich geringfügig (siehe z. B. [16], Bild 2.2a oder [41], Bild 1). Dies führt dazu, dass sich KALIBRIERFAKTOREN für ein und dasselbe DOSIMETER, die auf unterschiedliche PRIMÄRNORMALE rückführbar sind, ebenfalls unterscheiden können. WASSER-ENERGIEDOSEN, die unter ansonsten gleichen Bedingungen mit DOSIMETERN gemessen werden, deren KALIBRIERFAKTOREN auf unterschiedliche PRIMÄRNORMALE rückführbar sind, können sich somit ebenfalls geringfügig unterscheiden. Dies ist ggf. beim Vergleich von DOSISMESSUNGEN zu beachten.

ANMERKUNG 2 Bei den Vergleichsmessungen im Rahmen der Messtechnischen Kontrollen für Therapiedosimeter werden von den Messstellen DOSIMETER als Referenz benutzt, deren KALIBRIERFAKTOREN auf das PRIMÄRNORMAL für die WASSER-ENERGIEDOSIS der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) rückführbar sind. Bei diesen Vergleichsmessungen können Abweichungen aufgrund der Rückführbarkeit auf unterschiedliche PRIMÄRNORMALE (siehe Anmerkung 1) vermieden werden, wenn die überprüften Therapiedosimeter ebenfalls rückführbar auf das PRIMÄRNORMAL der PTB kalibriert sind.

Bei einer DOSISMESSUNG (und ebenso bei der Kalibrierung eines DOSIMETERS) wird die UNKORRIGIERTE ANZEIGE des DOSIMETERS von zahlreichen Größen beeinflusst, die selbst nicht Gegenstand der Messung sind. Diese sogenannten EINFLUSSGRÖßEN können von außen auf das DOSIMETER einwirken (z. B. Umgebungstemperatur, Luftdruck, Kammer-spannung der IONISATIONSKAMMER), als Geräteeigenschaften aus dem DOSIMETER selbst stammen (z. B. NULLANZEIGE, Anlaufzeit) oder als Größen des STRAHLUNGSFELDES in Erscheinung treten (z. B. FELDGRÖßE, DOSISLEISTUNG bei der Messung der DOSIS, STRAHLUNGSQUALITÄT).

Es muss daher festgelegt werden, auf welche Werte der EINFLUSSGRÖßEN sich der KALIBRIERFAKTOR bezieht. Bei DOSISMESSUNGEN unter BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG (d. h. alle EINFLUSSGRÖßEN haben ihren BEZUGSWERT angenommen) ist der KALIBRIERFAKTOR ohne Korrekturen anwendbar. Die wichtigsten EINFLUSSGRÖßEN bei DOSISMESSUNGEN mit IONISATIONSKAMMERN und die zugehörigen BEZUGSWERTE sind in Tabelle 5 angegeben.

Tabelle 5 — BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG (EINFLUSSGRÖßEN und BEZUGSWERTE)

EINFLUSSGRÖßE	BEZUGSWERT
STRAHLUNGSQUALITÄT	^{60}Co -Gammastrahlung
Strahlungseinfallsrichtung	festgelegte Vorzugsrichtung
Dosisleistung	keine Sättigungsverluste
Homogenität der radialen Dosisverteilung	konstante Dosis
Phantommaterial	Wasser
Phantomabmessungen	Quasi-unendlicher Halbraum ^a
Temperatur	293,15 K
Druck	101,325 kPa
Luftfeuchte	relative Luftfeuchte 50 %
Kammerspannung	bei der Kalibrierung festgelegt
Polarität der Kammerspannung	bei der Kalibrierung festgelegt
NULLANZEIGE	vernachlässigbar
MESSTIEFE	5 cm
Positionierung der IONISATIONSKAMMER	BEZUGSPUNKT in 5 cm Tiefe auf dem ZENTRALSTRAHL
Abstand Quelle — MESSORT	100 cm
FELDGRÖßE in 5 cm Tiefe	10 cm × 10 cm
relativer Anstieg der Tiefendosiskurve in 5 cm Tiefe	$-0,006 \text{ mm}^{-1}$
^a Das heißt so groß, dass eine weitere Vergrößerung keine Änderung des MESSWERTES zur Folge hat.	

6.4 KORREKTIONSFAKTOREN für PHOTONEN- und ELEKTRONENSTRAHLUNG

6.4.1 Allgemeines

Messungen der WASSER-ENERGIEDOSIS finden in der Regel unter Bedingungen statt, bei denen nicht alle EINFLUSSGRÖßEN ihre BEZUGSWERTE annehmen (siehe Tabelle 5). Die Auswirkungen der Abweichung der EINFLUSSGRÖßEN von ihren BEZUGSWERTEN müssen durch Korrekturen berücksichtigt werden. Ein KORREKTIONSFAKTOR berücksichtigt die Auswirkung einer EINFLUSSGRÖßE, die sich innerhalb ihres NENNGEBRAUCHSBEREICHES ändert, während alle übrigen EINFLUSSGRÖßEN bei dem für sie festgelegten BEZUGSWERT verbleiben. Die KORREKTIONSFAKTOREN werden in den folgenden Abschnitten im Einzelnen behandelt.

ANMERKUNG Mitunter ist es aus praktischen Erwägungen nicht möglich, die Wirkung einer EINFLUSSGRÖßE durch genau einen KORREKTIONSFAKTOR zu beschreiben. Die verschiedenen Aspekte der Auswirkung, die eine solche EINFLUSSGRÖßE auf die DOSISMESSUNG hat, werden dann durch mehrere KORREKTIONSFAKTOREN berücksichtigt, z. B. wird der Einfluss der Temperatur durch die KORREKTIONSFAKTOREN k_p und k_T berücksichtigt.

In der Praxis entscheidet die angestrebte MESSUNSICHERHEIT darüber, welche Einflüsse durch Korrekturen berücksichtigt werden müssen oder ggf. vernachlässigt werden dürfen. Um bei einer DOSISMESSUNG eine möglichst kleine MESSUNSICHERHEIT zu erreichen, sind für alle EINFLUSSGRÖßEN KORREKTIONSFAKTOREN anzuwenden, wenn deren Wert um mehr als 0,001 von eins abweicht. Die STANDARDMESSUNSICHERHEIT der KORREKTIONSFAKTOREN ist bei der Ermittlung der MESSUNSICHERHEIT der WASSER-ENERGIEDOSIS (siehe Abschnitt 9) zu berücksichtigen, ebenso der durch nicht erfolgte Anwendung von Korrekturen (vernachlässigte Einflüsse) entstehende Beitrag zur MESSUNSICHERHEIT.

6.4.2 KORREKTIONSFAKTOR k_p zur Berücksichtigung des Einflusses der Luftdichte

Der KORREKTIONSFAKTOR k_p berücksichtigt bei offenen IONISATIONSKAMMERN die Einflüsse des Luftdrucks p und der Temperatur T im Messvolumen der Kammer. Er wird nach der Gleichung (5)

$$k_p = \frac{p_0 T}{p T_0} \quad (5)$$

berechnet. Die BEZUGSWERTE von Luftdruck und Temperatur sind nach Tabelle 5 $p_0 = 101,325 \text{ kPa}$ und $T_0 = 293,15 \text{ K}$ ($= 20 \text{ °C}$).

ANMERKUNG 1 Nähere Ausführungen zur Ermittlung des Luftdruckes finden sich in [21].

Bei der Berechnung von k_p nach Gleichung (5) ist die Temperatur in der Einheit Kelvin zu verwenden.

6.4.3 KORREKTIONSFAKTOR k_h zur Berücksichtigung des Einflusses der Luftfeuchte

Eine Korrektur für den Einfluss der Luftfeuchte k_h ist innerhalb der durch DIN EN 60731 festgelegten Grenzen des Mindest-Nenngebrauchsbereiches der relativen Luftfeuchte von 30 % bis 75 % und einer absoluten Luftfeuchte (Wasserdampfdichte) kleiner als 20 g/m^3 nicht erforderlich; außerhalb dieses Bereiches sollten IONISATIONSKAMMERN nicht verwendet werden. Der Einfluss der Luftfeuchte auf das ANSPRECHVERMÖGEN einer IONISATIONSKAMMER ist im Unsicherheitsbudget zu berücksichtigen.

ANMERKUNG Weitere Informationen zum Einfluss der Luftfeuchte auf das ANSPRECHVERMÖGEN von IONISATIONSKAMMERN finden sich in Anhang F.

6.4.4 KORREKTIONSFAKTOR k_S zur Berücksichtigung der unvollständigen Sättigung durch Rekombination

In IONISATIONSKAMMERN tritt ein Verlust der durch ionisierende Strahlung im Messvolumen erzeugten Ionen durch Rekombination auf. Dieser Effekt, der als „unvollständige Sättigung“ (der Ladungssammlung) bezeichnet wird, führt dazu, dass die an den Elektroden gesammelte (d. h. gemessene) elektrische Ladung stets kleiner ist als die im Messvolumen durch ionisierende Strahlung erzeugte Ladung. Dieser Effekt wird durch den KORREKTIONSFAKTOR k_S berücksichtigt.

ANMERKUNG Ausführlichere Betrachtungen zu den auftretenden Rekombinationseffekten finden sich in [8], [9], [10], [11], [12], [13] sowie in Anhang D, Abschnitt D.1.

Das Ausmaß der Rekombination von Ladungsträgern (und damit der Wert des KORREKTIONSFAKTORS k_S) hängt unter anderem von der DOSISLEISTUNG oder der Dosis je Puls, von der Geometrie der IONISATIONSKAMMER und von der Kammerspannung ab.

Für die in Tabelle 6 angegebenen Bauarten von IONISATIONSKAMMERN wird der KORREKTIONSFAKTOR k_S für gepulste Strahlung nach folgender Gleichung berechnet:

$$k_S = 1 + \frac{\gamma + \delta \cdot D_P}{U} \quad (6)$$

Dabei sind

- D_P die WASSER-ENERGIEDOSIS je Puls am MESSORT,
- U die Kammerspannung,
- γ, δ Koeffizienten, deren Werte Tabelle 6 zu entnehmen sind.

Gleichung (6) gilt nur für die in Tabelle 6 angegebenen Bereiche der Pulsdosen D_P und Kammerspannungen U sowie für Pulslängen von 3,5 μ s bis 5 μ s. Die Pulswiederholfrequenz muss kleiner als der Kehrwert der IONENSAMMELZEIT sein.

ANMERKUNG 1 Die Bedingungen, unter denen die angegebenen Koeffizienten gelten, werden z. B. in [13], [42] näher erläutert.

Tabelle 6 — Werte der Koeffizienten γ und δ zur Berechnung des KORREKTIONSFAKTORS k_S nach Gleichung (6) für einige häufig verwendete Bauarten von IONISATIONSKAMMERN

Typbezeichnung der IONISATIONSKAMMER	γ V	δ V mGy ⁻¹	WASSER-ENERGIEDOSIS je Puls D_P mGy	Kammer- spannung U V	IONENSAMMELZEIT ms
KOMPAKTKAMMERN					
IBA CC13	0,27	5,9	0,1 bis 0,8	300	0,17 bei 300 V
IBA FC65-G	0,23	4,1	0,1 bis 0,8	300	0,19 bei 300 V
NE 2571	0,26	5,1	0,1 bis 0,8	300	0,20 bei 300 V
PTW 23331 Rigid	0	5,68	0,25 bis 2,1	50 bis 400	0,20 bei 400 V
PTW 23332 Rigid	0,13	1,05	0,15 bis 0,5 > 0,5 bis 5,0	100 bis 250 250 bis 400	0,09 bei 400 V

Typbezeichnung der IONISATIONSKAMMER	γ V	δ V mGy ⁻¹	WASSER-ENERGIEDOSIS je Puls D_p mGy	Kammer- spannung U V	IONENSAMMELZEIT ms
PTW 30006/30013 Farmer	0	3,44	0,15 bis 0,35 > 0,35 bis 42	100 bis 300 300 bis 400	0,13 bei 400 V
PTW 31002 Semiflex PTW 31010 Semiflex	0,38	2,40	0,15 bis 0,6 > 0,6 bis 5,5	100 bis 300 300 bis 400	0,10 bei 400 V
PTW 31013 Semiflex	0,35	3,3	0,1 bis 0,8	300	0,15 bei 300 V
PTW 31021 Semiflex 3D	0,15	2,69	0,2 bis 3,0	400	0,12 bei 400 V
PTW 31022 PinPoint 3D	0,38	1,02	0,2 bis 3,0	300	0,05 bei 300 V
FLACHKAMMERN					
IBA PPC05	0,33	0	0,1 bis 0,75	100	0,02 bei 100 V
IBA PPC40	0,07	1,54	0,25 bis 0,5 > 0,5 bis 2,0	100 bis 150 150 bis 500	0,09 bei 300 V
PTW 23343 Markus	0,32	1,99	0,15 bis 0,55 > 0,55 bis 3,0	100 bis 250 250 bis 300	0,09 bei 300 V
PTW 34001 Roos	0,06	1,69	0,15 bis 0,5 > 0,5 bis 42	50 bis 200 200 bis 400	0,13 bei 200 V
PTW 34045 Advanced Markus	0,43	0,49	0,5 bis 1,0 > 1,0 bis 5,5	50 bis 200 200 bis 300	0,02 bei 300 V
SNC 125c	0,28	2,85	0,2 bis 1,6	300	0,13 bei 300 V
SNC 600c	0,04	3,87	0,2 bis 1,6	300	0,2 bei 300 V
SNC 350p	0,30	1,69	0,2 bis 1,6	200	0,16 bei 200 V

ANMERKUNG 2 Die in Tabelle 6 angegebenen Werte wurden [13], [15], [19] entnommen.

Sind die Bedingungen für die Anwendbarkeit der Gleichung (6) und der Daten aus Tabelle 6 nicht gegeben oder sind für die verwendete IONISATIONSKAMMER keine Daten angegeben, dann ist k_s nach der in Abschnitt D.2 beschriebenen Methode zu ermitteln.

Bei längeren Makropulsen (Pulsdauer > 5 μ s) oder bei höheren Pulsdosen (> 120 mGy je Puls) wird k_s nach der in [42] und [43] beschriebenen Vorgehensweise bestimmt. Für gepulste und periodisch abgelenkte Strahlung („swept beam“ oder „scanning beam technique“ bei ELEKTRONENSTRAHLUNG) wird der KORREKTIONSFAKTOR k_s nach der in IAEA TRS-398 [16], Kapitel 4.4.3.4 beschriebenen Methode bestimmt.

6.4.5 KORREKTIONSFAKTOR k_p zur Berücksichtigung der Polarität der Kammerspannung

Die Abhängigkeit des Betrages der ANZEIGE eines IONISATIONSDOSIMETERS von der Polarität der Kammerspannung rührt unter anderem daher, dass die Anzahl der Elektronen, die aus dem umgebenden Material in die Messelektrode einschließlich Zuleitung ein- und aus ihr austreten, verschieden ist. Die Differenz der Ladungen dieser Elektronen erhöht oder erniedrigt die ANZEIGE, was beim Umpolen der Kammerspannung sichtbar wird.

Der Polaritätseffekt tritt sowohl bei PHOTONEN- als auch bei ELEKTRONENSTRAHLUNG auf. Er hängt von der Strahlungsart und -qualität, von der MESSTIEFE im PHANTOM, von der FELDGRÖÖE, sowie (wesentlich) von der Kammerbauart, insbesondere von Material, Größe und Dicke der Messelektrode, und der Kammerspannung (siehe z. B. Bild D.1) ab. Der Polaritätseffekt weist auch eine Exemplarstreuung auf; er muss daher für die verwendete IONISATIONSKAMMER unter den bei der DOSISMESSUNG herrschenden Bedingungen bestimmt werden.

Der KALIBRIERFAKTOR einer Kammer gilt für die im Kalibrierschein angegebene Polarität der Kammerspannung, er wird also nicht aus den über beide Polaritäten gemittelten Beträgen der ANZEIGE bestimmt. Wird die Kammer unter Messbedingungen benutzt, so kann sich der Polaritätseffekt — trotz gleicher Polarität wie bei der Kalibrierung — gegenüber der Kalibrierung ändern. Diese Änderung wird durch den KORREKTIONSFAKTOR k_p korrigiert, der nach der Gleichung (7)

$$k_p = \frac{\left(\frac{M_1 + M_2}{M_1}\right)_{\text{Mess}}}{\left(\frac{M_1 + M_2}{M_1}\right)_{\text{Kal}}} \quad (7)$$

bestimmt wird. Dabei sind

M_1 der Betrag der ANZEIGE bei der im Kalibrierschein angegebenen Polarität der Kammerspannung;

M_2 der Betrag der ANZEIGE bei der entgegengesetzten Polarität der Kammerspannung.

Der Index „Kal“ bezieht sich auf die Messung unter BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG, der Index „Mess“ auf die Messung unter den Bedingungen der DOSISMESSUNG. Beide ANZEIGEN M_1 und M_2 sind mit der gleichen DOSIS zu erzeugen; kann dies nicht gewährleistet werden, so sind die ANZEIGEN auf die DOSIS oder ein dosisproportionales Monitorsignal zu normieren. Alle ANZEIGEN sind bezüglich der NULLANZEIGE und des Einflusses der Luftdichte zu korrigieren.

Wenn der Polaritätseffekt der IONISATIONSKAMMER bei den BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG [d. h. der Nenner in Gleichung (7)] nicht im Kalibrierschein angegeben ist, so muss er durch Messungen im ^{60}Co -Strahlungsfeld ermittelt werden. Steht keine ^{60}Co -Gammastrahlung zur Verfügung, so dürfen Messungen zur näherungsweisen Bestimmung des Nenners in Gleichung (7) ersatzweise in dem Photonenstrahlungsfeld mit der niedrigsten verfügbaren Grenzenergie (möglichst nicht größer als 6 MeV) durchgeführt werden. In diesem Fall ergibt sich bei der niedrigsten verfügbaren Photonenenergie für den KORREKTIONSFAKTOR k_p automatisch der Wert 1.

Oftmals tritt nach einer Änderung der Polarität der Kammerspannung eine Drift der ANZEIGE auf. Nach jedem Umpolen der Kammerspannung muss deshalb gewartet werden, bis sich die ANZEIGE hinreichend stabilisiert hat, bevor mit der Datenerfassung begonnen wird. In der Regel ist eine Vorbestrahlung mit einer Dosis von etwa 1 Gy ausreichend. Die Änderung der Polarität der Kammerspannung muss nach Herstelleranweisung ausgeführt werden.

6.4.6 KORREKTIONSFAKTOR k_p zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Positionierung von IONISATIONSKAMMERN bei der Kalibrierung und bei der Messung

Bei der Kalibrierung einer IONISATIONSKAMMER im Kalibrierlabor mit ^{60}Co -Gammastrahlung wird — abweichend von der POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT in 6.2 — der BEZUGSPUNKT der IONISATIONSKAMMER in die Bezugstiefe im PHANTOM gebracht. Der KORREKTIONSFAKTOR k_p berücksichtigt die unterschiedliche Positionierung bei der Kalibrierung und der Messung (siehe Anhang A).

ANMERKUNG 1 Bei der Kalibrierung werden Ionisationskammern abweichend von der in 6.2 angegebenen POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT mit dem BEZUGSPUNKT am MESSORT positioniert, damit künftig mögliche neue Erkenntnisse über die Verschiebung des EFFEKTIVEN MESSPUNKTES nicht zu Änderungen der KALIBRIERFAKTOREN führen.

ANMERKUNG 2 Bei einer DOSISMESSUNG führt eine von der in 6.2 angegebenen POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT abweichende Positionierung der IONISATIONSKAMMER mit dem BEZUGSPUNKT am MESSORT *auch bei gleichzeitigem Weglassen des KORREKTIONSFAKTORS k_r* zu falschen Ergebnissen (außer im ^{60}Co -Strahlungsfeld). Der Grund hierfür liegt in den KORREKTIONSFAKTOREN $k_{Q,M}$ (siehe 7.1) bzw. $k_{E,M}$ (siehe 8.1), deren Werte ebenfalls nur für die Positionierung der IONISATIONSKAMMER nach der in 6.2 angegebenen POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT gelten (siehe auch Anhang B).

Der KORREKTIONSFAKTOR k_r wird nach der Beziehung in Gleichung (8)

$$k_r = \frac{1}{1 + \delta_{Co} \cdot \Delta z_{Co}} \quad (8)$$

berechnet. Dabei ist

- Δz_{Co} die Verschiebung des effektiven Messpunktes, die für eine DOSISMESSUNG im ^{60}Co -Strahlungsfeld gilt (siehe Tabelle 4);
- δ_{Co} der relative Gradient der Tiefendosiskurve unter BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG im ^{60}Co -Strahlungsfeld (siehe Tabelle 5).

Bei der Berechnung von k_r sind die Vorzeichen von δ_{Co} und Δz_{Co} zu beachten.

ANMERKUNG 3 Bei KOMPAKTKAMMERN ergibt sich (wegen $\Delta z_{Co} \geq 0$ und $\delta_{Co} < 0$) stets $k_r \geq 1$, bei FLACHKAMMERN ist $k_r \leq 1$.

6.4.7 KORREKTIONSFAKTOR k_T zur Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur, außer auf die Luftdichte

Die Temperatur beeinflusst das ANSPRECHVERMÖGEN nicht nur über die Luftdichte (siehe KORREKTIONSFAKTOR k_ρ nach 6.4.2, sondern auch über Bauteile des Anzeigegerätes und der IONISATIONSKAMMER. In der Regel ist der funktionale Zusammenhang zwischen k_T und der Temperatur nicht bekannt. In diesem Fall muss für k_T der Wert 1 angenommen werden, eventuelle Temperatureinflüsse müssen im Unsicherheitsbudget berücksichtigt werden.

7 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei PHOTONENSTRAHLUNG

7.1 Allgemeines

Bei der Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS in Photonenstrahlungsfeldern wird der KORREKTIONSFAKTOR $k_{Q,M}$ angewandt [siehe Gleichung (2)]. Dieser Faktor berücksichtigt die Änderung des ANSPRECHVERMÖGENS der IONISATIONSKAMMER infolge der unterschiedlichen STRAHLUNGSQUALITÄTEN bei der Kalibrierung und der DOSISMESSUNG.

ANMERKUNG Der Index „M“ im Symbol $k_{Q,M}$ verdeutlicht, dass dieser KORREKTIONSFAKTOR den Einfluss der STRAHLUNGSQUALITÄT unter (beliebigen) Messbedingungen berücksichtigt (siehe auch 6.1, Anmerkung).

Da reale IONISATIONSKAMMERN keine punktförmigen Detektoren sind, sondern ein endlich ausgedehntes Messvolumen besitzen, wird das ANSPRECHVERMÖGEN einer IONISATIONSKAMMER von der STRAHLUNGSQUALITÄT, die in der *Umgebung* des MESSORTES vorliegt, beeinflusst (VOLUMENEFFEKT).

Die STRAHLUNGSQUALITÄT in der Umgebung des MESSORTES im PHANTOM wird hauptsächlich von der STRAHLUNGSQUALITÄT der einfallenden PHOTONENSTRAHLUNG (siehe 7.3), der FELDGRÖÖE, der MESSTIEFE und dem Abstand des MESSORTES vom ZENTRALSTRAHL bestimmt. Darüber hinaus beeinflusst jedoch auch die Anwesenheit der IONISATIONSKAMMER das STRAHLUNGSFELD in der Umgebung des MESSORTES (Störung der Sekundärelektronenfluenz durch die IONISATIONSKAMMER, HOHLRAUMEFFEKT).

Auf Grund der Vielzahl von EINFLUSSGRÖßEN, die die STRAHLUNGSQUALITÄT (und damit das ANSPRECHVERMÖGEN der IONISATIONSKAMMER) bestimmen, werden — ähnlich den BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG von DOSIMETERN — für die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS in hochenergetischen Photonenstrahlungsfeldern REFERENZBEDINGUNGEN FÜR DIE DOSISMESSUNG definiert (siehe 7.2). Bei DOSISMESSUNGEN unter diesen REFERENZBEDINGUNGEN sind die Werte des KORREKTIONSFAKTORS $k_{Q,M}$ mit der kleinsten MESSUNSICHERHEIT bekannt; bei Abweichung von den REFERENZBEDINGUNGEN erhöht sich im Allgemeinen die MESSUNSICHERHEIT der $k_{Q,M}$ -Werte.

In diesem Dokument wird der KORREKTIONSFAKTOR für den Einfluss der STRAHLUNGSQUALITÄT unter (beliebigen) Messbedingungen als Produkt

$$k_{Q,M} = k_{Q,R} \cdot k_{NR,Q} \quad (9)$$

dargestellt. Dabei ist

- $k_{Q,R}$ der KORREKTIONSFAKTOR zur Berücksichtigung der Änderung der STRAHLUNGSQUALITÄT zwischen den BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG und den REFERENZBEDINGUNGEN FÜR DIE DOSISMESSUNG bei PHOTONENSTRAHLUNG (siehe 7.4);
- $k_{NR,Q}$ ein Faktor, der die zusätzliche Änderung des ANSPRECHVERMÖGENS DER IONISATIONSKAMMER bei Messungen unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN, d.h. bei Abweichung der MESSTIEFE, des Abstandes vom Zentralstrahl, der FELDGRÖßE, des Fokus-Oberflächen-Abstandes sowie der Homogenität der radialen Dosisverteilung von den in Tabelle 7 angegebenen Referenzwerten, aber bei Beibehaltung des STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX', berücksichtigt (siehe 7.5).

ANMERKUNG Durch den Faktor $k_{NR,Q}$ wird der unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN, insbesondere bei Messungen am Feldrand oder in den STRAHLUNGSFELDERN filterfreier Beschleuniger auftretende VOLUMENEFFEKT, sowie die unter NICHT-REFERENZBEDINGUNGEN, insbesondere bei veränderter FELDGRÖßE und bei Messungen außerhalb des Feldrandes auftretende Änderung des energieabhängigen ANSPRECHVERMÖGENS der IONISATIONSKAMMER berücksichtigt. Nähere Ausführungen zu $k_{NR,Q}$ finden sich in Anhang C und Anhang E.

7.2 REFERENZBEDINGUNGEN für die Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS bei PHOTONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern

Die REFERENZBEDINGUNGEN FÜR DIE DOSISMESSUNG in hochenergetischen Photonenfeldern sind in Tabelle 7 angegeben. Bei Messungen unter REFERENZBEDINGUNGEN ist der Einfluss der STRAHLUNGSQUALITÄT durch den KORREKTIONSFAKTOR $k_{Q,R}$ nach Gleichung (11) zu berücksichtigen; der KORREKTIONSFAKTOR $k_{NR,Q}$ hat in diesem Fall den Wert 1.

Tabelle 7 — REFERENZBEDINGUNGEN FÜR DIE DOSISMESSUNG in hochenergetischen Photonenstrahlungsfeldern. Die Unterschiede zu den in Tabelle 5 angegebenen BEZUGSBEDINGUNGEN FÜR DIE KALIBRIERUNG sind hervorgehoben.

Einflussgröße	Referenzwert
Strahlungseinfallrichtung	festgelegte Vorzugsrichtung
Dosisleistung	keine Sättigungsverluste
Homogenität der radialen Dosisverteilung	konstante Dosis
Phantommaterial	Wasser
Phantomabmessungen	Quasi-unendlicher Halbraum ^a
Temperatur	293,15 K
Druck	101,325 kPa

Einflussgröße	Referenzwert
Luftfeuchte	relative Luftfeuchte 50 %
Kammerspannung	wie bei der Kalibrierung
Polarität der Kammerspannung	wie bei der Kalibrierung
NULLANZEIGE	vernachlässigbar
MESSTIEFE	10 cm
Positionierung der IONISATIONSKAMMER	nach der POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT (siehe 6.2) auf dem ZENTRALSTRAHL
Fokus-Oberflächen-Abstand	100 cm
FELDGRÖÖE an der Phantomoberfläche	10 cm × 10 cm
^a Das heißt so groß, dass eine weitere Vergrößerung keine Änderung des MESSWERTES zur Folge hat.	

Falls der in Tabelle 7 angegebene Wert der FELDGRÖÖE an der Phantomoberfläche nicht einstellbar ist, darf für DOSISMESSUNGEN unter REFERENZBEDINGUNGEN die FELDGRÖÖE 10 cm × 10 cm auch in der MESSTIEFE eingestellt werden. Ebenso darf, falls der angegebene Fokus-Oberflächen-Abstand nicht einstellbar ist, auch ein Fokus-Messort-Abstand von 100 cm verwendet werden. Diese Modifikationen haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf die MESSUNSICHERHEIT von $k_{Q,R}$.

7.3 Kennzeichnung und Ermittlung der STRAHLUNGSQUALITÄT der einfallenden PHOTONENSTRAHLUNG

Die Nutzstrahlung von ^{60}Co -Gammastrahlungsquellen enthält neben der vom Radionuklid ausgehenden Strahlung auch Sekundärstrahlung, die innerhalb des radioaktiven Materials selbst, in der Abschirmung und an den Blenden entsteht. Für die meisten Anwendungen genügt jedoch zur Kennzeichnung der STRAHLUNGSQUALITÄT die Nennung des Radionuklids.

Bei hochenergetischer PHOTONENSTRAHLUNG aus Beschleunigern mit EFFEKTIVEN BESCHLEUNIGUNGSSPANNUNGEN von 1 MV bis 25 MV hängt die spektrale Flussdichte der Nutzstrahlung von der Maximalenergie der Elektronen (entsprechend der EFFEKTIVEN BESCHLEUNIGUNGSSPANNUNG) und deren Energieverteilung, vom Targetmaterial und der Targetdicke, vom Material und der Dicke des AUSGLEICHFILTERS und vom Aufbau des STRAHLERKOPFES ab (siehe DIN 6809-1). Deshalb reicht es nicht aus, die STRAHLUNGSQUALITÄT beim Eintritt der Strahlung in ein PHANTOM allein durch die Angabe der EFFEKTIVEN BESCHLEUNIGUNGSSPANNUNG zu charakterisieren. Zur Dosisermittlung wird die STRAHLUNGSQUALITÄT der einfallenden PHOTONENSTRAHLUNG durch den STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q gekennzeichnet. Der STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q ist der Quotient der ANZEIGEN eines IONISATIONSDOSIMETERS in 20 cm und 10 cm Tiefe in einem Wasserphantom bei dem konstanten Fokus-Messort-Abstand von 100 cm und der FELDGRÖÖE 10 cm × 10 cm am MESSORT.

In diesem Dokument wird der STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q aus dem Verhältnis der ANZEIGEN M_{20} in der Tiefe 20 cm und M_{10} in der Tiefe 10 cm in einem Wasserphantom bei konstantem Fokus-Oberflächen-Abstand von 100 cm und einer FELDGRÖÖE an der Oberfläche von 10 cm × 10 cm ermittelt. Die Kammer ist nach der in 6.2 angegebenen POSITIONIERUNGSVORSCHRIFT zu positionieren. Der Zusammenhang wird durch Gleichung (10) beschrieben:

$$Q = 1,2661 \cdot \frac{M_{20}}{M_{10}} - 0,0595 \quad (10)$$

Die beiden ANZEIGEN sind mit derselben Anzahl Monitor-Einheiten zu erzeugen (bzw. auf die ANZEIGE eines geeigneten Dosismonitors zu normieren); auf die Änderung der Luftdichte während der Messung ist zu achten, ggf. ist ihre Auswirkung zu korrigieren.

ANMERKUNG Eine eventuelle Änderung der Sättigungskorrektur oder des Polaritätseffektes mit der MESSTIEFE kann in der Regel bei der Anwendung von Gleichung (10) vernachlässigt werden.

Gleichung (10) gilt in gleicher Weise für Beschleuniger mit und ohne AUSGLEICHSFILTER.

7.4 Messung der WASSER-ENERGIEDOSIS unter REFERENZBEDINGUNGEN

7.4.1 Allgemeines

Bei DOSISMESSUNGEN unter REFERENZBEDINGUNGEN gilt $k_{NR,Q} = 1$ und somit nach Gleichung (9) $k_{Q,M} = k_{Q,R}$. Die Bestimmung der Werte von $k_{Q,R}$ ist im folgenden Abschnitt beschrieben.

7.4.2 Werte des KORREKTIONSFAKTORS $k_{Q,R}$

Für die in Tabelle 8 angegebenen Ionisationskammertypen wird der KORREKTIONSFAKTOR $k_{Q,R}$ nach Gleichung (11) berechnet:

$$k_{Q,R} = \frac{1 + e^{A \cdot (0,57 - Q_0)}}{1 + e^{A \cdot (Q - Q_0)}} \quad (11)$$

Die Parameter A und Q_0 sowie die relative STANDARDMESSUNSICHERHEIT $u(k_{Q,R})$ der berechneten Werte $k_{Q,R}$ sind Tabelle 8 zu entnehmen. Die Gleichung (11) gilt für folgende Bereiche des STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q :

- bei Verwendung von KOMPAKTKAMMERN: $0,50 \leq Q \leq 0,84$,
- bei Verwendung von FLACHKAMMERN: $0,62 \leq Q \leq 0,81$.

ANMERKUNG 1 Mit der in Anhang B beschriebenen Methode wurden die für KOMPAKTKAMMERN in [14], [15], [16], [17] und für FLACHKAMMERN in [18], [19] angegebenen k_Q -Werte für die Verwendung mit diesem Dokument umgerechnet und an eine Ausgleichskurve der Form (11) angepasst.

Gleichung (11) gilt in gleicher Weise für Beschleuniger mit und ohne AUSGLEICHSFILTER. Bei Beschleunigern ohne AUSGLEICHSFILTER ist für $k_{Q,R}$ eine zusätzliche UNSICHERHEIT von 0,3 % zu berücksichtigen; diese UNSICHERHEIT darf verringert werden bzw. muss vergrößert werden, wenn genauere Kenntnisse über die MESSUNSICHERHEIT des entsprechenden KORREKTIONSFAKTORS vorhanden sind.

ANMERKUNG 2 Bislang sind in der Literatur nur wenige Daten zu $k_{Q,R}$ -Faktoren für Beschleuniger ohne AUSGLEICHSFILTER verfügbar. Die z. B. in [101], [124], [125] angegebenen Informationen legen jedoch nahe, dass bei gleichem STRAHLUNGSQUALITÄTSINDEX Q die $k_{Q,R}$ -Werte bei Beschleunigern mit und ohne AUSGLEICHSFILTER nur geringfügig voneinander abweichen. Diese Abweichung wird hier — solange keine genaueren Daten verfügbar sind — durch eine zusätzliche MESSUNSICHERHEIT berücksichtigt.